

На правах рукописи

*AllHez6*

**НЕЗНАНОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ**

**МАЯТНИКОВЫЙ ДАТЧИК КОНТРОЛЯ УРОВНЯ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ  
СЪЕМОМ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

**Есипов Виталий Николаевич**

**Официальные оппоненты: Грязин Дмитрий Геннадиевич,**

доктор технических наук, доцент, главный метролог метрологической службы ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»» (г. Санкт-Петербург)

**Алалуев Роман Владимирович,**

кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», доцент кафедры «Приборы управления» (г. Тула)

**Ведущая организация:**

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

Защита состоится «25» мая 2018 года в 11<sup>30</sup> часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.099.03, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева, Белгородского государственного национального исследовательского университета, по адресу: 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева и на сайте <https://www.swsu.ru/ds/d999.099.03/DisserNeznanovA.I.pdf>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 999.099.03

Милостная  
Наталья Анатольевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Датчики уровня являются одним из главных элементов систем стабилизации и навигации, широко применяются в геофизике, при строительстве различных объектов, в научных исследованиях, при контроле неровности различных объектов.

Актуальной сферой использования указанных датчиков является измерение поперечной негоризонтальности железнодорожного пути в динамическом режиме. Бесперебойность, безопасность движения, комфорт пассажиров в значительной степени зависят от состояния пути. Таким образом, задача поддержания исправного состояния железнодорожного пути очень важна. Для решения этой задачи проводится систематический контроль и текущее содержание пути, заключающееся в его выправке и стабилизации в плане, горизонте и по направлению с помощью специальных путевых машин.

Непрерывный контроль пути при нагрузках, близких к нагрузкам поездов со скоростями до 100 км/ч и выше, осуществляется измерительными комплексами, которые размещаются в вагонах-лабораториях.

Задача текущего содержания железнодорожного пути сводится к обеспечению требуемых геометрических параметров пути. При этом допускаемая поперечная негоризонтальность составляет  $\pm 4,6$  угл. мин., что эквивалентно превышению одного рельса над другим  $\pm 2$  мм при базе колеи 1520 мм. Скорость выправки достигает при этом 2 км/ч. Допустимая погрешность измерения негоризонтальности железнодорожного пути составляет  $\pm 1,14$  угл. мин при диапазоне измерения  $1^\circ$ . Измерения осуществляются в условиях трехкомпонентной вибрации, создаваемой рабочими органами путевых машин, с амплитудой ускорения (2-8) g на частоте (33-45) Гц по каждой компоненте. Диапазон температур, при которых работают рассматриваемые датчики составляет от минус  $10^\circ\text{C}$  до плюс  $+40^\circ\text{C}$ .

Качество выправки пути зависит в значительной степени от работы системы управления органами машины. Прибором, который формирует информацию о негоризонтальности железнодорожном пути, является датчик уровня.

На сегодняшний день базовым измерителем негоризонтальности железнодорожного пути является прибор ELT-133.00 австрийской фирмы «Plasser&Theurer», построенный на основе механического маятника и реализующий тем самым прямой метод измерения. Основными его недостатками являются высокая стоимость прибора и затраты на техническое обслуживание. Также он плохо приспособлен к российским климатическим условиям, и вследствие этого обладает неудовлетворительной точностью. Кроме того прибор имеет значительные габаритные размеры (350×145×415 мм) и вес (около 30 кг). Фазовое запаздывание в полосе частот до 0,5 Гц составляет около  $50^\circ$ , а отклонение АЧХ достигает 25 %.

Таким образом, из выше сказанного следует, что у отечественной промышленности имеется потребность в точных, малогабаритных и достаточно дешевых средствах контроля уровня железнодорожного пути.

Указанная задача может быть решена посредством применения в приборах вместо непосредственно механических маятников жидкостных двухкомпонентных и жидкостно-механических маятников, что может позволить улучшить динамические характеристики, а также уменьшить вес и габаритные размеры.

На сегодняшний день известны технические решения применения жидкостных маятников для контроля уровня пути. Съём информации в таких

датчиках осуществляется с помощью ультразвука. Теоретические и экспериментальные исследования показали превосходство динамических и массо-габаритных характеристик таких жидкостных датчиков над характеристиками прибора ELT-133.00. Тем не менее, их применение на практике затруднено, поскольку под воздействием вибраций, которые имеют место при выправке пути, происходит разрушение границы отражения ультразвука и потеря работоспособности датчика. Для устранения этого недостатка было предложено заменить границу отражения ультразвука на механическую в виде металлической пластины со смещенным центром масс.

Проведенный анализ технической и теоретической литературы по вопросам построения маятниковых приборов контроля уровня пути, а также по ультразвуковым методам измерений показал, что на сегодняшний день не разработан принцип построения предлагаемых средств, отсутствует математическое описание работы механического маятника на движущемся основании, полностью помещенного в жидкость. Также отмечаем, что недостаточно исследована работа ультразвуковой измерительной подсистемы, не исследованы метрологические характеристики маятникового датчика с ультразвуковой системой съема информации.

**Объектом исследования** является средство контроля уровня железнодорожного пути, определяющего его отклонение от поперечной горизонтальности, содержащее механический маятниковый чувствительный элемент, с ультразвуковым съемом информации, которое в дальнейшем будет называться датчиком.

**Предметом исследования** являются математические модели механической и ультразвуковой подсистем датчика, анализ статических и динамических характеристик, показателей точности.

**Целью диссертационной работы** является улучшение динамических характеристик средств контроля уровня железнодорожного пути, позволяющее повысить эксплуатационные характеристики устройств текущего содержания железнодорожного пути.

Указанная цель исследований требует решения следующих **задач**:

- разработка принципиальной схемы построения датчика контроля уровня железнодорожного пути с механическим маятниковым чувствительным элементом, полностью погруженным в однородную вязкую жидкость, и теоретическое обоснование возможности контроля угла отклонения от горизонтальности с помощью ультразвука;
- разработка математического описания движения маятникового элемента датчика, установленного на основании, совершающем угловые колебания в условиях вибрации и получение аналитических зависимостей для частных динамических характеристик;
- исследование статической и динамических характеристик датчика, его показателей точности;
- разработка опытного образца датчика, проведение его экспериментальных исследований.

**Научная новизна работы:**

1. Впервые получена математическая модель, описывающая распространение ультразвуковых волн в полости датчика, отличающаяся от известных тем, что полностью погруженный в жидкость маятниковый механический

чувствительный элемент выполняет роль отражателя ультразвука и учетом наклонного падения волны на поверхность пьезоприемника.

2. Получена математическая модель, описывающая динамику маятникового чувствительного элемента, установленного на основании, подверженном угловым колебаниям и вибрации, отличающаяся от известных учетом присоединенного момента инерции жидкости.

3. Получены аналитические зависимости для определения статических и динамических параметров датчика с ультразвуковым съемом информации, в котором маятниковый чувствительный элемент полностью погружен в жидкость.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в том, что разработанные и защищенные патентами РФ принципиальные схемы датчика, аналитические зависимости для статической и динамической характеристик, методика определения параметров присоединенной жидкости, проведенный анализ погрешности позволяют проанализировать влияние конструктивных параметров датчика на его метрологические характеристики и оптимизировать их. Указанные зависимости являются основой для проектирования аналогичных датчиков.

**Методы и средства исследований.** Для решения поставленных научных задач использовались методы теории интегрального исчисления, теории дифференциальных уравнений, в том числе их численного решения с использованием ЭВМ, методы теоретической механики, в том числе теории колебаний, методы теории точности, методы теории акустических волн.

Для проведения экспериментальных исследований использовался модуль аналого-цифрового преобразования, подключенный к ПЭВМ, стандартные электроизмерительные приборы (осциллограф, генератор), а также специально разработанные средства: стенд для исследования статической характеристики, стенд для исследования динамических характеристик датчика, автоматизированный комплекс для исследования температурной точностной характеристики датчика. Обработка данных выполнялась на ПЭВМ с применением стандартных функций сред, а также с использованием оригинальных алгоритмов в средах автоматизации математических расчетов MathCAD и MS Excel.

**Личный вклад автора** заключается в анализе текущего состояния средств контроля уровня железнодорожного пути, в разработке и анализе математической модели работы акустической подсистемы (статической характеристики) датчика, в разработке и анализе модели движения маятникового элемента датчика в условиях угловых колебаний основания и вибраций, в получении и анализе математических выражений для динамических характеристик датчика, в исследовании влияния неточности отдельных элементов, а также изменения температуры на точность датчика, в планировании и проведении экспериментов, в разработке программных и аппаратных средств проведения экспериментов, в формулировке выводов по результатам теоретических и экспериментальных исследований, включая рекомендации по оптимизации конструктивных элементов и режимов, применяемых в датчике.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель ультразвуковой подсистемы датчика, учитывающая наклонное падение ультразвуковой волны на пьезоприемник, позволяет анализировать работу акустической подсистемы съема информации о негоризонтальности железнодорожного пути.

2. Математическая модель, описывающая динамику маятникового чувствительного элемента, полностью погруженного в жидкость, подверженного

угловым колебаниям и вибрации, учитывающая присоединенный момент инерции жидкости, позволяет анализировать динамические характеристики датчика контроля уровня железнодорожного пути, в котором маятник полностью погружен в жидкость.

3. Результаты исследований статики, динамики, а также точности маятникового датчика с ультразвуковым съемом информации позволяют решать задачу расчета и получения требуемых статических и динамических характеристик датчика контроля уровня железнодорожного пути.

4. Разработанные принципиальные схемы датчика контроля уровня железнодорожного пути с ультразвуковым съемом информации, в котором маятниковый чувствительный элемент полностью погружен в однородную вязкую жидкость, защищенные патентами РФ, позволяют реализовывать датчики с улучшенными динамическими характеристиками.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов исследований подтверждается использованием апробированных и обоснованных методов и методик обработки экспериментальных данных, сравнением результатов теоретического моделирования характеристик датчика с результатами экспериментальных исследований. Апробация результатов диссертационного исследования проводилась на базе ФГБУ «Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск».

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 международных и 2 всероссийских конференциях: X, XI Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (Москва, 2008, 2011), XVIII Международном научно-техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (Алушта, 2009), I, II Международной научно-технической интернет-конференции «Информационные системы и технологии» (Орел, 2011, 2013), VI Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» (Орел, 2014), IV, VIII Международной научно-технической конференции «Проблемы информатизации» (Киев, 2015, 2017).

**Публикации.** По теме диссертационной работы всего опубликовано 13 научных работ, в том числе 5 в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Получены два патента Российской Федерации на изобретение.

**Структура и объем диссертационной работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, который включает 98 наименований, а также содержит 5 приложений. Работа изложена на 116 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, определена ее цель и задачи, кратко раскрыто научное и практическое значение работы.

**В первой главе** проанализированы условия эксплуатации датчиков, проведен анализ состояния практических разработок и теоретических исследований в области средств контроля уровня железнодорожного пути.

Максимальный наклон базы, на которой устанавливается прибор, не превышает  $1^\circ$  на прямых участках пути при допустимой негоризонтальности пути  $\pm 4,6$  угл. мин. При этом частота колебаний, с учетом места установки прибора, не превышает 0,5 Гц для максимальной производительности путевой машины и в перспективе, для ее

увеличения, достигнет значения 1 Гц. Допустимая абсолютная погрешность измерения негоризонтальности железнодорожного полотна датчиком, входящим в автоматическую цепь управления путевой машиной не должна превышать  $\pm 0,5$  мм, что составляет  $\pm 1,14$  угл. мин. Приборы измерения уровня на железнодорожном транспорте работают в условиях тепловой нагрузки, определяемой диапазоном температур от минус  $10^{\circ}$  С до плюс  $40^{\circ}$  С. Измерение и контроль негоризонтальности осуществляется в условиях трехкомпонентной вибрации с амплитудой ускорения (2-8)g на частотах до (33-45) Гц по каждой компоненте, создаваемой рабочими органами машин.

Проведенный анализ состояния практических разработок показал, что улучшение технических характеристик приборов с прямым методом измерения возможно на основе перехода от механических маятников к маятникам, полностью погруженным в однородную вязкую жидкость, что позволит улучшить динамические характеристики, уменьшить габаритные размеры и вес. Съём информации об угловых рассогласованиях между маятником и корпусом может быть осуществлен с помощью ультразвукового метода измерения. Применение ультразвука позволяет с одной стороны, сканировать состояние маятника, не оказывая существенных воздействий на него, а с другой – повысить метрологические характеристики датчиков.

В литературе подробно освещены общие вопросы работы механических колебательных систем, в том числе в фундаментальных работах А.Н. Крылова, Л.И. Мандельштама, К. Магнуса, П.Л. Капицы. Комплексное исследование приборов с механическим маятником для измерения уровня железнодорожного пути проведено В.Я. Распоповым и Ю.В. Ивановым (ТулГУ). В работах В.Н. Есипова (ОрелГТУ) получена математическая модель движения чувствительного элемента жидкостно-механического датчика угловой скорости и исследован его угловой дрейф при круговых вибрациях корпуса. Однако в указанных работах отсутствует описание влияния жидкости, движущейся вместе с маятниковым элементом, на динамические характеристики прибора.

Вопросы построения и математическое описание двухкристалльных акустических систем измерения подробно рассмотрены в работах В. Илгунаса (Каунасский политехнический институт им. А. Снечкуса, Вильнюс), W.J. Fry (University of Illinois, USA), D.C. Denney (US Naval Academy, Illinois). Однако в этих работах не учитывается наличие отражателя ультразвука и его наклонное падение на пьезоприемник. В работах А.В. Есипова (ОрелГТУ) также не учитывается, что ультразвуковая волна падает на пьезоприемник под углом, пропорциональным углу наклона датчика.

Обзор публикаций показал, что отсутствуют аналитические описания движения механического маятника, полностью погруженного в однородную жидкость, учитывающие совместное воздействие вибраций, угловых и переносных движений основания, и ультразвуковой подсистемы съема информации датчика, а также не исследованы точностные характеристики и не определены потенциальные метрологические возможности маятникового датчика с ультразвуковым съемом информации.

**Во второй главе** разработаны принципиальные схемы датчика уровня пути, в которых маятниковая пластина является отражателем ультразвука.

В схеме, приведенной на рисунке 1.а, реализуется амплитудный метод съема информации. При возникновении углового рассогласования между корпусом датчика 1 и маятниковой пластиной 3, которая размещена в цилиндрической камере датчика 2, полностью заполненной однородной вязкой жидкостью, посредством специальных опор или торсионного подвеса 4, происходит отклонение центра фронта ультразвуковой

волны, излучаемой пьезоизлучателем 5, относительно центра пьезоприемника 6, а также изменение угла падения фронта волны на пьезоприемник. Вследствие этого изменяется амплитуда выходного напряжения пьезоприемника, которое детектируется посредством амплитудного детектора 9. Для генерации электрических колебаний ультразвуковой частоты служит генератор 7; для согласования электрических параметров пьезоприемника и амплитудного детектора, а также предварительного усиления сигнала служит согласующее устройство 8.

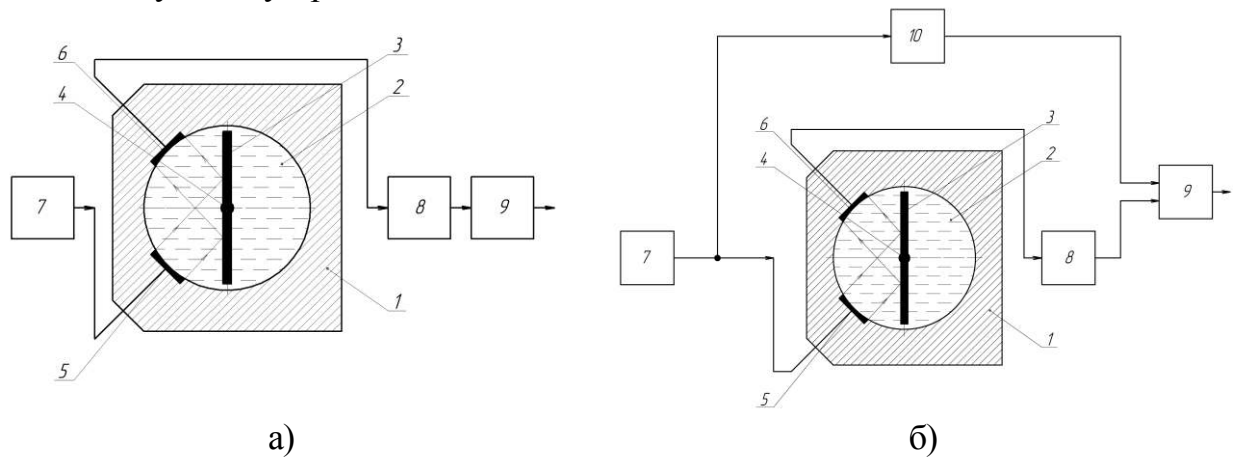


Рисунок 1 – Принципиальные схемы датчика контроля уровня железнодорожного пути с ультразвуковым съемом информации: а) с амплитудным методом съема информации (Патент РФ на изобретение №2392585); б) с фазовым методом съема информации (Патент РФ на изобретение №2517785)

В схеме, приведенной на рисунке 1.б, реализуется фазовый метод съема информации. При возникновении углового рассогласования между корпусом датчика и маятниковой пластиной происходит изменение разности фаз между напряжением на пьезоизлучателе и пьезоприемнике, которое детектируется посредством фазового детектора 9. Для компенсации разности фаз при нулевом угле наклона корпуса служит блок установки начального фазового сдвига 10.

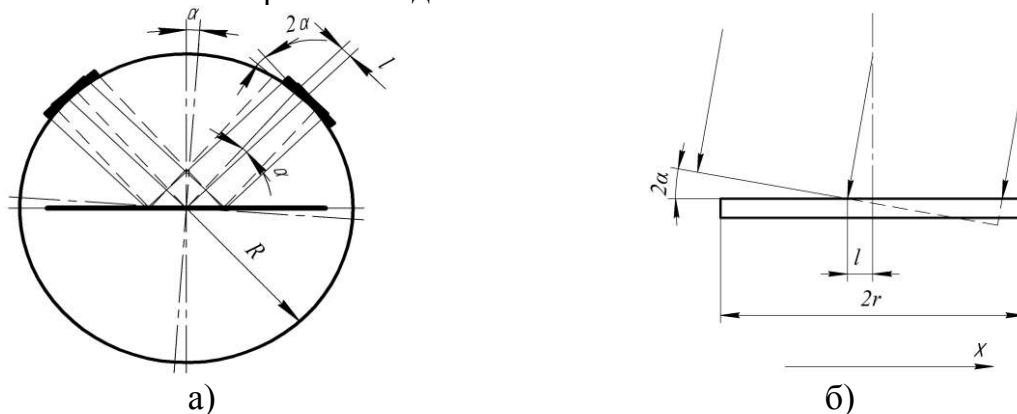


Рисунок 2 – Распространение ультразвуковой волны в камере датчика: а) отражение от маятниковой пластины; б) наклонное падение на пьезодиск

В результате исследования ультразвуковой подсистемы датчиков с амплитудным методом съема информации рассмотрено распространение ультразвуковой волны в камере датчика и ее наклонное падение на дисковый пьезоприемник (рисунок 2), вследствие чего отдельные элементы его поверхности возбуждаются с различной фазой:

$$\varphi = 2\pi \cdot (x \cdot \sin(2\alpha) / \lambda), \quad (1)$$

где  $x$  – координата вдоль поверхности диска;  $\alpha$  – угол наклона датчика;  $\lambda$  – длина



ультразвуковой волны.

Амплитуда выходного сигнала пьезоприемника пропорциональна интегралу таких колебаний:

$$U_{\text{пр}}(\alpha) = \frac{1}{C_0} \int_S dQ = U_0 \cdot K_{\text{дат}} \cdot \int_S \sin(2\pi ft + \varphi) \cdot dS, \quad (2)$$

где  $C_0$  – емкость пьезодиска;  $Q$  – пьезоэлектрический заряд;  $U_0$  – амплитуда входного напряжения пьезоприемника;  $f$  – частота ультразвуковой волны;  $K_{\text{дат}}$  – коэффициент, учитывающий прямой и обратный пьезоэффект, а также ослабление ультразвуковой волны, при ее распространении в жидкости;  $S$  – площадь поверхности пьезодиска.

В результате интегрирования выражения (2) с учетом выражения (1) получена математическая модель ультразвуковой подсистемы датчика, которая может быть использована для расчета его статических характеристик:

$$U_{\text{пр}} = U_0 \cdot K_{\text{дат}} \cdot \frac{2 \cdot J_1(\kappa(\alpha) \cdot (r - l/2))}{\kappa(\alpha) \cdot r}, \quad (3)$$

где  $J_1$  – функция Бесселя первого рода первого порядка,  $r$  – радиус пьезодиска,  $l = 2R \cdot \text{tg}(\alpha)$  – смещение центра фронта ультразвуковой волны относительно центра пьезоприемника,  $R$  – радиус цилиндрической камеры датчика,  $\kappa(\alpha) = 2\pi \cdot (f/c) \cdot \sin(2\alpha)$ ,  $c$  – скорость ультразвука в жидкости.

На основе полученной модели теоретически исследовано влияние геометрических параметров пьезоэлементов и акустической камеры датчика на параметры статической характеристики, а именно диапазон преобразований датчика и его чувствительность. Исследования показывают, что параметры статики датчика в значительной степени зависят от частоты ультразвука и геометрических размеров используемых пьезодисков и в меньшей степени зависят от размеров цилиндрической камеры датчика. Также исследования показывают, что датчик может применяться как на ровных участках железнодорожного пути, так и поворотах.

**В третьей главе** изложены результаты теоретических исследований динамических характеристик датчика: разработана математическая модель механической подсистемы датчика уровня пути, получены зависимости для определения динамических характеристик датчиков, проведено их теоретическое исследование, проведен анализ влияния вибрации на датчик. Показано, что датчик уровня с маятником, полностью погруженным в однородную вязкую жидкость, превосходит по динамическим характеристикам используемые в настоящее время приборы.

Математическая модель механической подсистемы получена в предположении, что угловые рассогласования между корпусом и жидкостью — малые величины. При этом предполагается, что некоторый объем жидкости движется вместе с маятниковой пластиной как единое целое, а вязкое трение, возникающее на границе этого объема и остальной жидкостью, оказывает демпфирующее свойство на весь маятник в целом. Положение маятникового чувствительного элемента определяется системами координат, представленными на рисунке 3.

Система координат  $OXY$  связана с тележкой, положение которой относительно неподвижной системы координат  $O_0X_0Y_0$  определяется углом  $\gamma$ .  $O_0Y_0$  – вертикаль места. Система координат  $O_1X_1Y_1$  связана с корпусом датчика. Ее начало (точка  $O_1$ ) является проекцией оси подвеса маятника на плоскость  $XY$ . Оси  $OX$  и  $O_1X_1$ ,  $OY$  и  $O_1Y_1$  соответственно параллельны. Расстояние от оси подвеса маятника

(точки  $O_1$ ) до точки  $O$  соответствует высоте установки корпуса датчика и равно  $L$ . Расстояние между точкой  $O_1$  и центром тяжести маятника  $C$  равно  $d$ . Положение маятника в системе координат  $OXY$  определяется углом  $\varphi$  между осью  $OY$  и линией  $O_1C$ . Ось подвеса маятника подвержена линейной вибрации, которая определяется виброперемещениями  $x_B$  и  $y_B$ , которые соответственно направлены вдоль осей  $OX_1$  и  $OY_1$ .

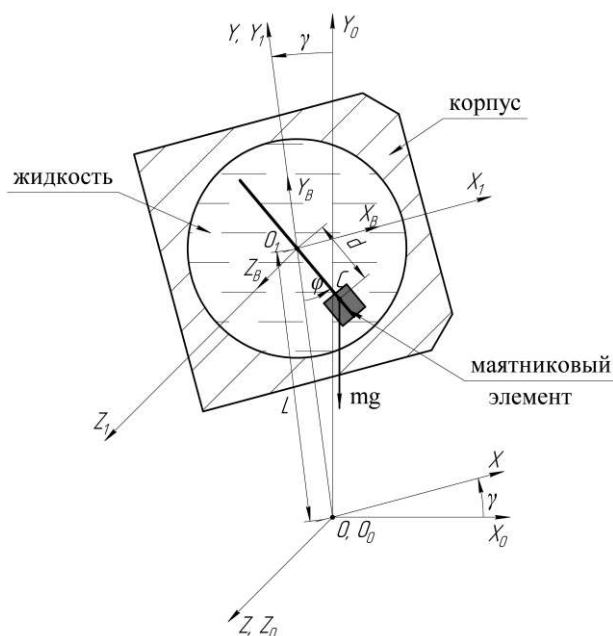


Рисунок 3 – Системы координат, определяющие движение маятникового чувствительного элемента

При указанных условиях математическая модель движения маятника под воздействием угловых колебаний площадки и трехкомпонентной вибрации имеет вид:

$$\begin{aligned} & (md^2 + J)\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + md(g \cos \gamma - L\dot{\gamma}^2 + \ddot{y}_B + x_B\ddot{\gamma} + 2\dot{x}_B\dot{\gamma} - \\ & - y_B\dot{\gamma}^2)\sin \varphi + md(g \sin \gamma - L\ddot{\gamma} + \ddot{x}_B - y_B\ddot{\gamma} - 2\dot{y}_B\dot{\gamma} - x_B\dot{\gamma}^2)\cos \varphi + \\ & + md^2\ddot{\gamma} = -K\varphi - K\gamma, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $m$  – масса маятникового чувствительного элемента,  $d$  – смещение центра масс маятника относительно оси подвеса,  $g$  – ускорение свободного падения,  $J$  – присоединенный момент инерции жидкости,  $b$  – абсолютный коэффициент демпфирования маятника,  $K$  – жесткость торсионного подвеса,  $L$  – высота установки датчика относительно площадки, совершающей угловые колебания,  $\gamma$  – амплитуда угловых колебаний основания.

На основе уравнения (4) получены выражения для коэффициента динамичности и фазового запаздывания датчика, которые имеют вид:

$$V = \frac{1 + \frac{md(L-d)}{md^2 + J}\eta^2}{\sqrt{\left[1 - \eta^2 \left(1 + \frac{mdL}{2(md^2 + J)}\gamma_0^2\right)\right]^2 + 4D^2\eta^2}}, \quad (5)$$

$$\Phi = -\arctg \left( \frac{2D\eta}{1 - \eta^2 \left[ 1 + \frac{mdL}{2(md^2 + J)} \gamma_0^2 \right]} \right), \quad (6)$$

где  $D$  – относительный коэффициент демпфирования;  $\eta = \omega/\omega_0$  – относительная безразмерная частота,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{mdg + K}{md^2 + J}}$  – собственная частота недемпфированных колебаний маятника в жидкости,  $J$  – присоединенный момент инерции жидкости.

Присоединенный момент инерции жидкости  $J$  и коэффициент демпфирования  $D$  для конкретных геометрических параметров пластины и вязкости жидкости могут быть определены на основе параметров свободных колебаний пластины в жидкости в соответствии с уравнениями:

$$J = md^2 \left[ \left( \frac{\omega_0^V}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right], \quad (7)$$

$$2\pi \cdot \frac{D}{\sqrt{1 - D^2}} = \ln \left( \frac{A_m}{A_{m+1}} \right), \quad (8)$$

где  $\omega_0^V$  – частота собственных колебаний пластины в воздухе;  $A_m$  и  $A_{m+1}$  – значения ближайших максимумов на графике собственных колебаний пластины в жидкости.

Анализ коэффициента динамичности и фазового запаздывания датчика был выполнен для различных значений вязкости жидкости, заполняющей его рабочую камеру, и для различных вариантов установки датчика (для различных значений соотношения  $L/d$ ). В результате сделаны выводы:

- коэффициент динамичности существенно зависит от отношения высоты установки датчика к значению смещения центра масс маятниковой пластины (соотношения  $L/d$ ) и вязкости жидкости, заполняющей камеру датчика;
- фазовое запаздывание в меньшей степени зависит от соотношения  $L/d$  и существенно зависит от вязкости жидкости, заполняющей камеру датчика;
- в рабочем диапазоне частот амплитудные искажения не превышают 0,1, а фазовое запаздывание не превышает 7,5°.

Таким образом, предлагаемый датчик при меньших габаритных размерах превосходит по динамическим характеристикам применяемый в настоящее время прибор ELT133.00 и его отечественный аналог ИН-2, а также микромеханические приборы.

Численное интегрирование уравнения динамики маятникового элемента в условиях угловых колебаний и вибраций показал, что маятниковый элемент возбуждается вибрацией, но при этом отрабатывает и полезную составляющую сигнала в соответствии с АЧХ и ФЧХ. При этом также имеет место известный для маятниковых приборов вибрационный сдвиг нуля. Однако, как показывают результаты численного интегрирования, с применением серийно выпускаемых промышленностью амортизаторов и электронной фильтрации сигнала, можно добиться существенного

уменьшения влияния вибрации на выходной сигнал датчика таким образом, что погрешность вследствие вибрации будет существенно ниже допустимой погрешности датчика ( $\Delta\alpha = 0,007^0 < \Delta\alpha_{\max} = 0,02^0$ ).

**В четвертой главе** проанализированы вопросы точности маятникового датчика уровня пути с ультразвуковым съемом информации: выявлены источники основной и дополнительной погрешности, определены количественно их возможные значения, проанализировано их влияние на результирующую погрешность датчика. К таким источникам погрешности относятся:

- погрешность  $\Delta\alpha$ , вызванная неточностью изготовления корпуса датчика;
- нестабильность амплитуды входного сигнала;
- нестабильность частоты входного сигнала;
- температурная зависимость скорости звука в жидкости  $c$ ;
- температурная нестабильность коэффициента ослабления ультразвука в жидкости  $\beta$ ;
- температурная нестабильность пьезомодуля  $d_{33}$ .

Погрешность, вызванная неточностью изготовления корпуса, может быть численно определена при калибровке и уменьшена путем внесения поправки в выходной сигнал датчика посредством электронного модуля. Погрешность, обусловленная нестабильностью амплитуды входного сигнала, не превышает 0,07%; погрешность вследствие нестабильности частоты входного сигнала не превышает  $0,5 \cdot 10^{-4}$  %. Погрешности, вследствие температурной нестабильности скорости и коэффициента ослабления ультразвука в жидкости, а также пьезомодуля  $d_{33}$ , существенно превышают допустимую погрешность измерения. Предложен метод уменьшения результирующей дополнительной погрешности датчика путем термостатирования.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что наибольший вклад в результирующую погрешность датчика вносит изменение амплитуды выходного сигнала вследствие температурной нестабильности коэффициента ослабления ультразвука в жидкости (рисунок 4.а). Как показывают исследования, статическая характеристика смещается пропорционально во всем диапазоне преобразований (рисунок 4.б), что позволяет определить параметры режима термостатирования, по характеристике, полученной при нулевом угле наклона (рисунок 5).

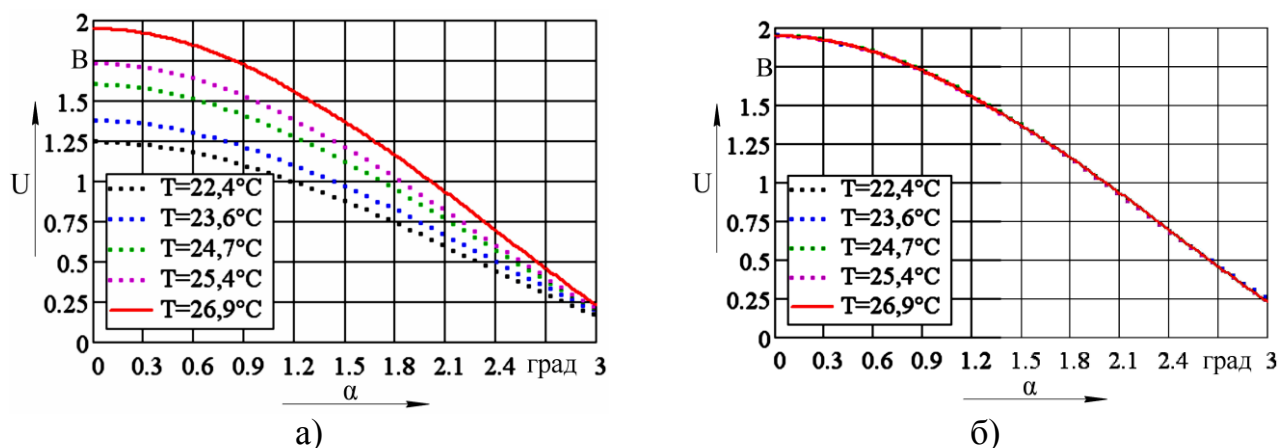


Рисунок 4 – Статические характеристики датчика: а) при различной температуре; б) приведенные к одному значению

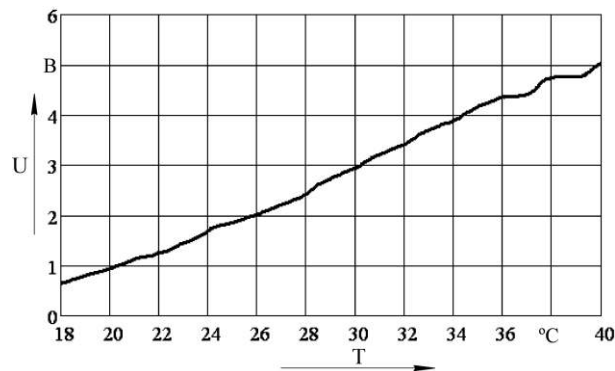
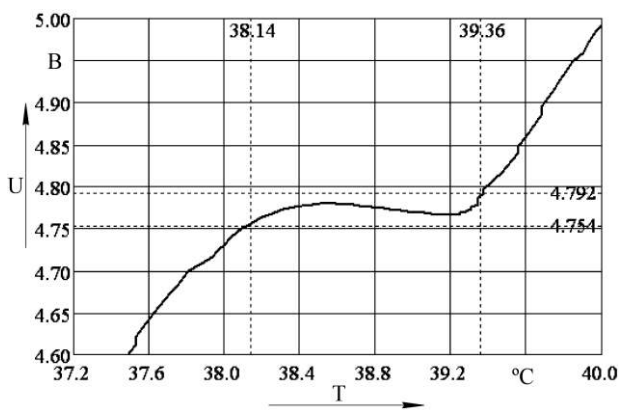
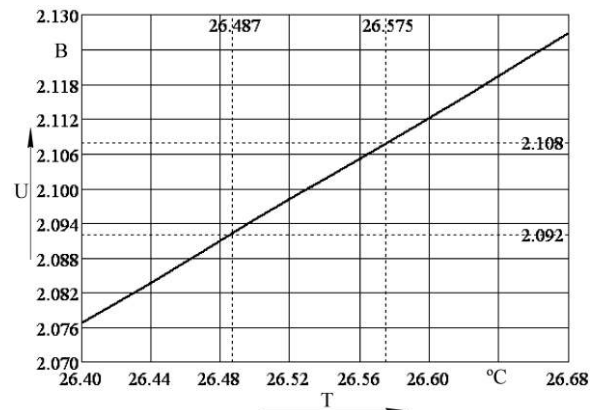


Рисунок 5 – Зависимость выходного напряжения датчика от температуры в точке  $\alpha=0^\circ$

Показано, что на зависимости выходного напряжения датчика от температуры в точке  $\alpha=0^\circ$  могут быть условно выделены линейный и нелинейные участки. Анализ показывает, что при термостатировании в нелинейной области зависимости (рисунок 6.а) допустимое отклонение температуры термостатирования относительно номинальной для достижения требуемой точности датчика может быть больше, чем на линейном участке (рисунок 6.б), что позволяет снизить технические требования к системе термостатирования ( $1,2^\circ\text{C}$  и  $0,088^\circ\text{C}$  соответственно) или в альтернативе повысить точность датчика.



а)



б)

Рисунок 6 – Допустимое отклонение температуры термостатирования от номинальной при термостатировании: а) в нелинейной области характеристики; б) в линейной области характеристики

Исследования показывают, что при реализации режима термостатирования с параметрами, определенными на рисунке 6.а, может быть достигнута требуемая точность датчика: погрешность не будет превышать  $0,6\%$  при диапазоне измерений  $3^\circ$ .

**В пятой главе** описаны разработанные стенды и методики, позволяющие осуществить экспериментальные исследования статической, динамических и точностных характеристик датчика, а также приведены результаты экспериментальных исследований, позволившие сделать вывод об адекватности теоретических моделей и зависимостей, полученных в предыдущих разделах.

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны и реализованы экспериментальные комплексы – соответственно для исследования статической, динамических характеристик, а также стенд для исследования влияния температуры на точность датчика. Указанные комплексы включают как серийно выпускаемые электроизмерительные приборы, так и оригинальные технические средства и программы и алгоритмы, позволяющие автоматизировать эксперимент и

обработку его результатов. Для обработки результатов применялись такие программные продукты, как Mathcad и MS Excel.

Статические характеристики исследовались для опытных образцов датчиков с диаметром цилиндрической камеры 30 мм и 60 мм, заполненной моторным маслом (SAE 20W-50). Для датчика с камерой диаметром 60 мм использовались попарно пьезоэлементы диаметром 10 мм толщиной 1 мм и пьезоэлементы диаметром 18 мм толщиной 1,4 мм (рисунок 7). Для датчика с камерой диаметром 30 мм использовались попарно пьезоэлементы диаметром 6 мм толщиной 0,67 мм и пьезоэлементы диаметром 10 мм толщиной 1 мм (рисунок 8).

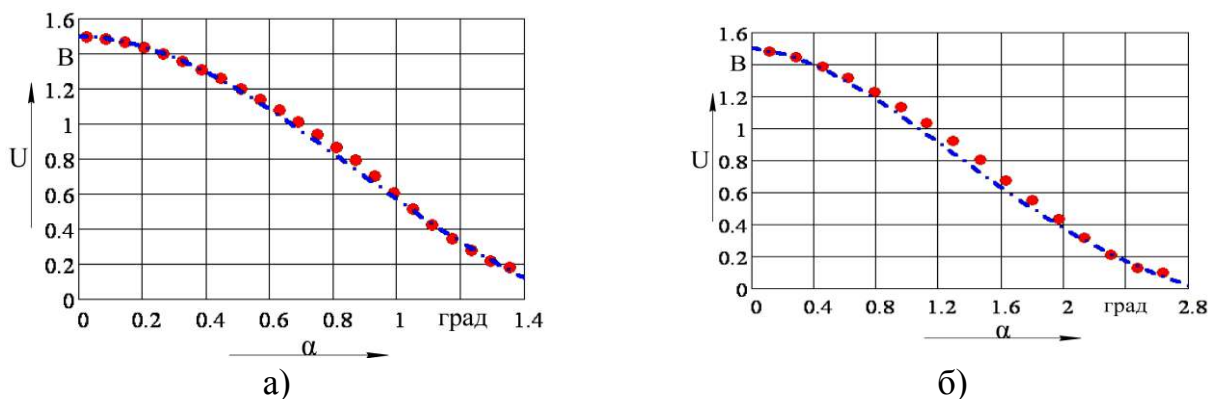


Рисунок 7 – Теоретические и экспериментальные статические характеристики датчика с камерой диаметром 60 мм: а) пьезодиски диаметром 18 мм, частота 1,9 МГц; б) пьезодиски диаметром 10 мм, частота 2,14 МГц

● ● ● Экспериментальная — — — Теоретическая

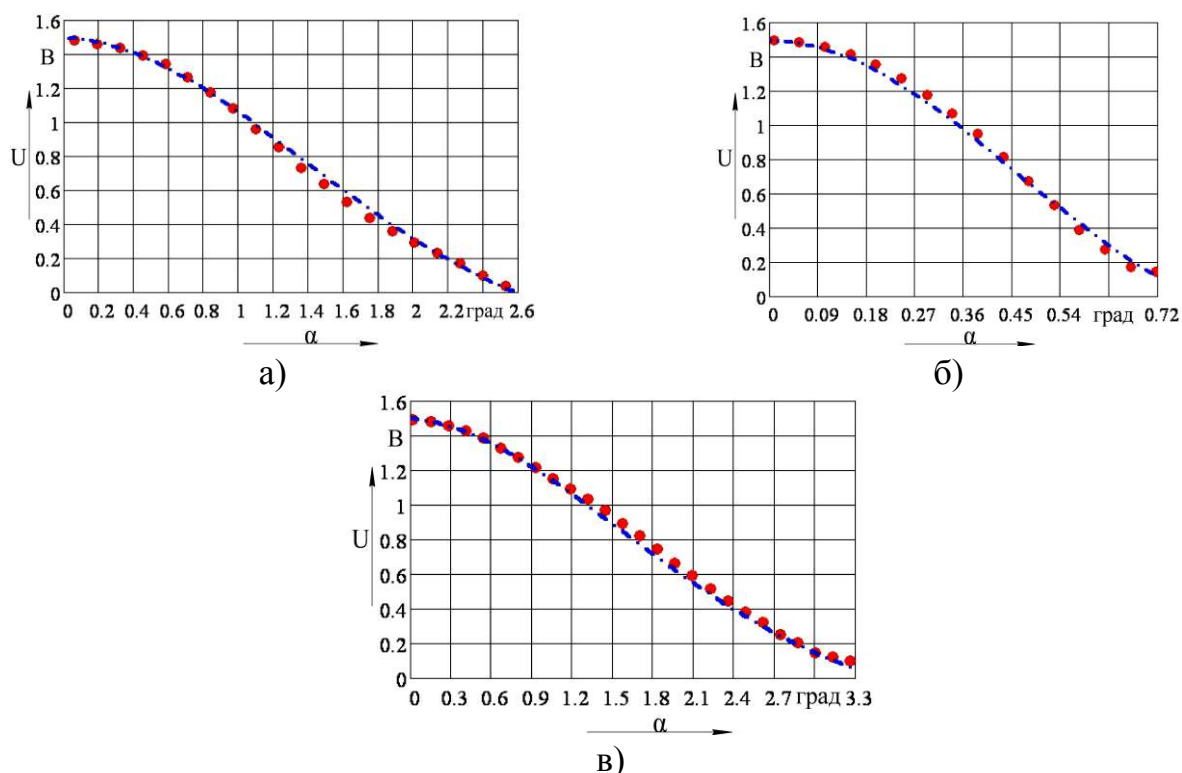


Рисунок 8 – Теоретические и экспериментальные статические характеристики датчика с камерой диаметром 30 мм: а) пьезодиски диаметром 10 мм, частота 2,14 МГц; б) пьезодиски диаметром 10 мм, частота 6,54 МГц; в) пьезодиски диаметром 6 мм, частота 2,87 МГц

● ● ● Экспериментальная — — — Теоретическая

Результаты исследований показали, то диапазон преобразований и чувствительность датчика существенно зависит от диаметра используемых пьезодисков и частоты ультразвука и в меньшей степени зависит от размеров акустической камеры датчика. Максимальное отклонение теоретических и экспериментальных значений статической характеристики не превышает 4,2 % для датчика с камерой диаметром 30 мм и 5,8 % для датчика с камерой диаметром 60 мм относительно максимального значения выходного сигнала, что говорит об адекватности математической модели акустической подсистемы датчика.

Также получены экспериментальные статические характеристики при использовании фазового метода съема информации (рисунок 9), которые показывают, что датчик с таким методом съема информации может применяться на прямых участках железнодорожного пути.

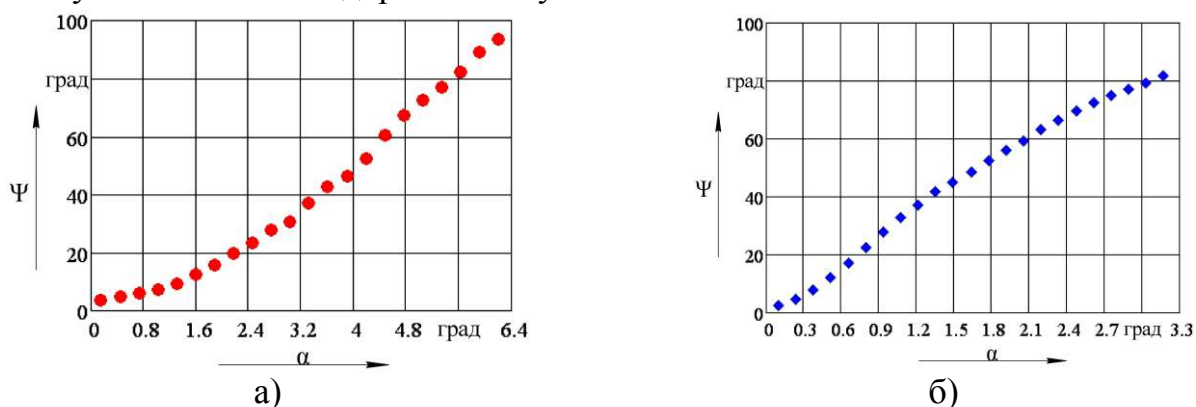


Рисунок 9 – Статическая характеристика датчика при использовании фазового метода съема информации: а) диаметр камеры 30 мм, пьезодиски диаметром 10 мм, частота 2,14 МГц; б) диаметр камеры 60 мм, пьезодиски диаметром 6 мм, частота 2,87 МГц

Динамические характеристики исследовались для датчика с диаметром цилиндрической камеры 30 мм, которая поочередно заполнялась маслами с различной вязкостью: трансформаторным, моторным (SAE 20W-50) и касторовым (рисунок 10). При этом соотношение  $L/d$  составляло 15,6. Максимальное отклонение экспериментальных значений АЧХ и ФЧХ датчика от теоретических не превышает 3,5 %, что говорит об адекватности полученной математической модели механической подсистемы датчика и выражений для его динамических характеристик.

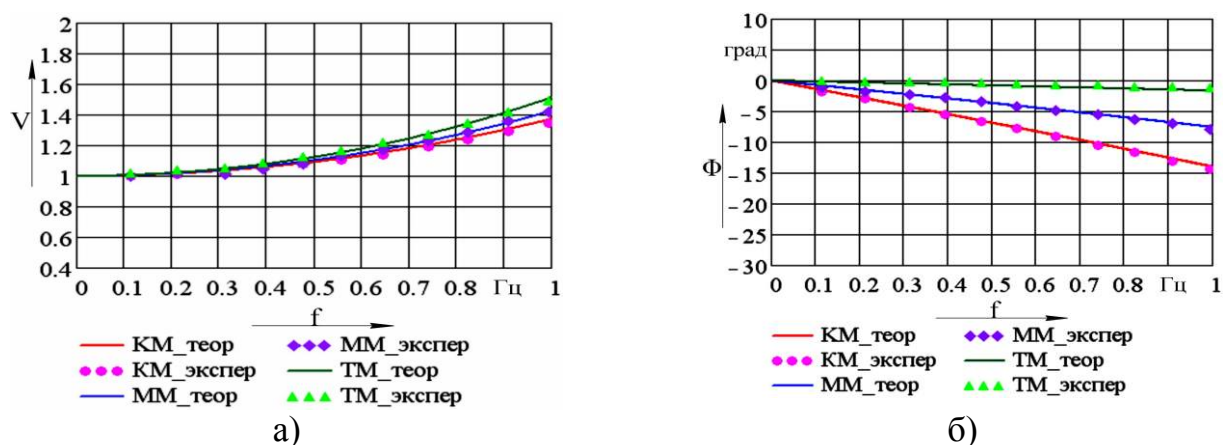


Рисунок 10 – Теоретические и экспериментальные динамические характеристики датчика: а) АЧХ; б) ФЧХ (ТМ – трансформаторное масло; ММ – моторное масло (SAE 20W-50); КМ – касторовое масло)



Также результаты экспериментальных исследований подтверждают превосходство динамических характеристик исследуемого датчика в полосе рабочих частот над характеристиками известного прибора ELT-133 фирмы «Plasser&Theurer», его отечественным аналогом ИН-2 (ТулГУ), а также микромеханическим акселерометром ADXL203 (Analog Devices) и датчиками компенсационного типа (рисунок 11).

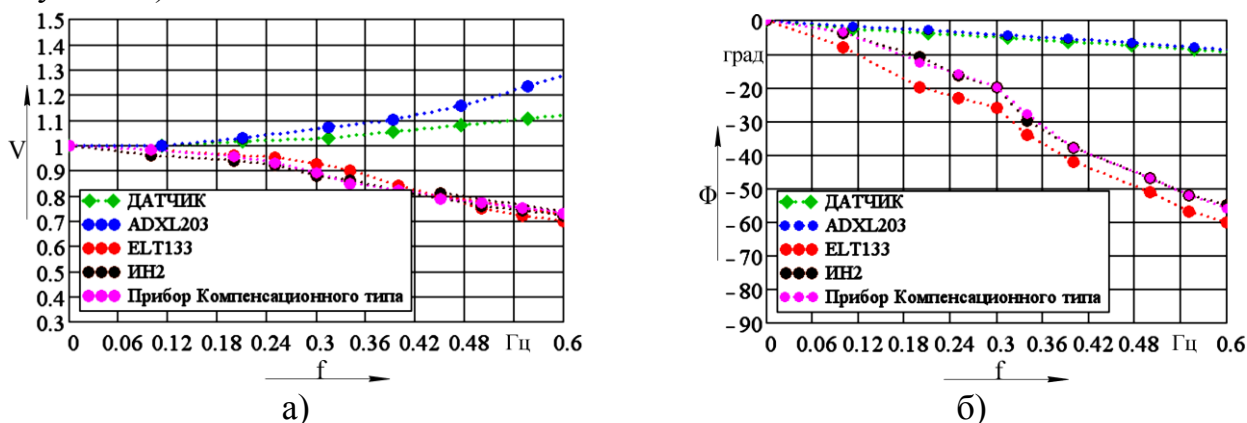


Рисунок 11 – Динамические характеристики исследуемого и известных датчиков:  
а) АЧХ; б) ФЧХ

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны и проанализированы схемы маятникового датчика контроля уровня железнодорожного пути с ультразвуковым съемом информации, в которых маятниковый механический элемент, полностью погруженный в однородную вязкую жидкость, используется в качестве отражателя ультразвука, а съем информации об угле наклона осуществляется амплитудным или фазовым методом. Получено два патента РФ на изобретение: №2392585 и №2517785.

2. Получена математическая модель ультразвуковой подсистемы датчика, позволяющая определить его статические характеристики.

3. Получены и проанализированы статические характеристики опытных образцов датчика. Исследуемый датчик позволяет обеспечить чувствительность 17,8 мВ/угл. мин при напряжении питания электрической цепи 5 В (для сравнения у прибора ELT133.00 чувствительность 12 мВ/угл. мин при напряжении питания электрической цепи 24 В).

4. Проанализированы особенности динамики маятникового элемента датчика, учитывающие вибрацию и угловую составляющую движения основания, на котором он установлен, а также влияние жидкости на движение маятника. Получены математическая модель движения маятникового чувствительного элемента, полностью погруженного в жидкость, а также выражения для динамических характеристик датчика, анализ которых показывает, что разработанный датчик при меньших массо-габаритных параметрах превосходит известные датчики по частным динамическим характеристикам: отклонение АЧХ в частотном диапазоне до 0,5 Гц не превышает 8,5 %, а фазовое запаздывание не превышает 7,5 ° (для сравнения у прибора ELT133.00 отклонение АЧХ в этом диапазоне частот составляет 25 %, а фазовое запаздывание 50 °).

5. Проанализированы составляющие погрешности датчика. Предложены и теоретически обоснованы методы уменьшения составляющих основной и дополнительной статической погрешности датчика, позволяющие уменьшить



предельную абсолютную погрешность до допустимого значения  $\pm 1,14$  угл. мин в диапазоне рабочих температур от минус 10 °С до плюс 40 °С.

6. Полученные аналитические выражения позволяют рассчитывать статические, динамические и точностные характеристики датчика с ультразвуковым съемом информации, в котором маятниковый механический чувствительный элемент полностью погружен в однородную вязкую жидкость, и являются основой для создания методики проектирования подобных датчиков.

7. Разработаны и созданы экспериментальные комплексы для исследования статических, динамических и точностных характеристик датчика, включающие опытные образцы датчиков, специально созданные средства измерений, испытаний, стандартные электроизмерительные приборы, типовое и оригинальное программное обеспечение. Анализ результатов, проведенных с помощью указанных комплексов экспериментальных исследований, показал адекватность полученных математических моделей подсистем датчика и выражений для расчета его метрологических характеристик.

**Рекомендации.** Результаты диссертационной работы могут использоваться при проектировании маятниковых датчиков контроля уровня железнодорожного пути с ультразвуковым съемом информации.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Перспективными направлениями дальнейших исследований по рассматриваемой теме являются:

- разработка математического описания и анализ работы акустического канала при реализации фазового метода съема информации;
- более глубокий анализ зависимости параметров присоединенной жидкости от геометрических размеров маятникового механического чувствительного элемента.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1 **Незнанов, А.И.** Математическое моделирование статистической характеристики гидроакустического датчика негоризонтальности с механическим маятниковым чувствительным элементом / В.Н. Есипов, А.И. Незнанов // Датчики и системы. - 2010. - №4. - С. 18-20.

2 **Незнанов, А.И.** Гидроакустические средства измерения негоризонтальности железнодорожного пути / В.Н. Есипов, А.И. Незнанов, А.А. Рыбин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2010. - №6. - С. 60-66.

3 **Незнанов, А.И.** Статические характеристики гидроакустических маятниковых датчиков контроля уровня железнодорожного пути с амплитудным методом съема информации / А.И. Незнанов, В.Н. Есипов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2013. - №2. - С. 118-123.

4 **Незнанов, А.И.** Динамические характеристики гидроакустического датчика неровности железнодорожного пути с маятниковым механическим чувствительным элементом / А.И. Незнанов, В.Н. Есипов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – №3. - С. 112-116.

5 **Незнанов, А.И.** Датчик контроля поперечной неровности железнодорожного пути с маятниковым элементом, полностью погруженным в жидкость // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – №5. - С. 139-146.

Статьи в прочих изданиях

6 **Незнанов, А.И.** Статистические характеристики гидроакустического датчика

негоризонтальности с механическим маятниковым чувствительным элементом / В.Н. Есипов, В.А. Жердов, А. И. Незнанов // Известия Орловского государственного технического университета. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2007. - №4. - С. 4-8.

7 **Незнанов, А.И.** Гидроакустические датчики негоризонтальности с механическим маятниковым чувствительным элементом / В.Н. Есипов, А.И. Незнанов // Сб. материалов 10-й Всероссийской научн.-техн. Конференции «Состояния и проблемы измерений» – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – с. 54-55.

8 **Незнанов, А.И.** Гидроакустические датчики негоризонтальности железнодорожного пути / В.Н. Есипов, А.И. Незнанов // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: Труды XVIII Международного научно-технического семинара. – М.: МИРЭА, 2009, с. 178.

9 **Незнанов, А.И.** Алгоритм автоматизации построения экспериментальных АЧХ и ФХЧ датчика негоризонтальности железнодорожного пути / А.И. Незнанов // Информационные системы и технологии. В 3 т. Т. 3 / Орел : Изд-во ФГОУ ВПО "Госуниверситет - УНПК", 2011. - С. 183-188.

10 **Незнанов, А.И.** Ультразвуковой датчик малых углов наклона [Электронный ресурс] / А.И. Незнанов, В.Н. Есипов // Информационные системы и технологии. ИСиТ-2013: материалы II Международной научно-технической интернет-конференции. – (Орел, 1 апреля – 31 мая 2013 г.). – Сетевое научное издание «Информационные ресурсы, системы и технологии» (свидетельство о регистрации СМИ: Эл № ФС 77-51946). – Режим доступа: <http://irsit.ru/files/article/297.pdf>.

11 **Незнанов, А.И.** Модель функции преобразования акустического датчика негоризонтальности железнодорожного пути [Электронный ресурс] / А.И. Незнанов, В.Н. Есипов // Информационные технологии в науке, образовании и производстве. ИТНОП-2014: материалы VI Международной научно-технической конференции. – (Орел, 22-23 мая 2014 г.). – Сетевое научное издание «Информационные ресурсы, системы и технологии» (свидетельство о регистрации СМИ: Эл № ФС 77 - 51946). – Режим доступа: <http://irsit.ru/files/article/416.pdf>.

12 **Незнанов, А.И.** Датчик неровности для автоматических систем выправки железнодорожного пути / А.И. Незнанов // IV Международная научно-техническая конференция «Проблемы информатизации»: сборник тезисов докладов. – (Киев, 9-10 апреля 2015 г.). – Киев: Государственный университет телекоммуникаций, 2015. – С. 69.

13 **Незнанов, А.И.** Ultrasonic sensor based on a pendulum fully immersed in liquid for measurement of the misalignment of rail levels / А.И. Незнанов, В.Н. Есипов // VIII Международная научно-техническая конференция «Проблемы информатизации»: сборник тезисов докладов. – (Киев, 11-12 апреля 2017 г.). – Киев: Государственный университет телекоммуникаций, 2017. – С. 222.

#### Объекты интеллектуальной собственности

14 Пат. 2392585 РФ, МКИ G 01 С 9/18. Датчик угла отклонения от вертикали / Есипов В.Н, **Незнанов А.И.** - № 2009110608/28; заявл. 23.03.2009, опубл. 20.06.2010.

15 Пат. 2517785 РФ С1 МПК G01С9/18 Датчик угла наклона / **Незнанов А.И.**, Есипов В.Н.- № 2012153275/28; заявл. 10.12.2012, опубл. 27.05.2014.