

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

На правах рукописи

*АИИИИИ*

**НЕЗНАНОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ**

УДК 621.317.39:531.74.082.4

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

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
доцент В.Н. ЕСИПОВ

Орел, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ .....	14
1.1 Условия эксплуатации датчиков контроля уровня железнодорожного пути.....	14
1.2 Анализ существующих средств измерения и контроля уровня железнодорожного пути .....	17
1.3 Обзор публикаций по теме исследований .....	22
1.4 Выводы и задачи исследования.....	29
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СЪЕМА ИНФОРМАЦИИ.....	32
2.1 Принцип построения маятникового датчика контроля уровня железнодорожного пути с ультразвуковым съемом информации.....	32
2.2 Разработка основ теории ультразвуковой подсистемы датчика .....	35
2.3 Исследование влияния конструктивных параметров на статическую характеристику датчика.....	40
2.4 Выводы.....	43
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ПУТИ С МАЯТНИКОВЫМ МЕХАНИЧЕСКИМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ, ПОЛНОСТЬЮ ПОГРУЖЕННЫМ В ЖИДКОСТЬ.....	45
3.1 Разработка математической модели механической подсистемы датчика.....	45
3.2 Определение параметров жидкости, присоединенной к механическому маятнику.....	50
3.3 Анализ динамических характеристик датчика .....	54
3.4 Влияние вибрации на датчик и уменьшение ее воздействия .....	60
3.5 Выводы.....	65

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МАЯТНИКОВОГО ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ СЪЕМОМ ИНФОРМАЦИИ .....	68
4.1 Анализ источников погрешности датчика .....	68
4.2 Исследование влияния температуры на точность датчика.....	71
4.3 Рекомендации по повышению точности датчика.....	76
4.4 Выводы.....	81
ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ маятникового ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ уровня ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ с ультразвуковым съемом информации.....	83
5.1 Конструкция экспериментального датчика.....	83
5.2 Аппаратурная реализация и методика проведения экспериментальных исследований датчика.....	85
5.3 Результаты экспериментальных исследований датчика .....	95
5.4 Выводы.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	123

## ВВЕДЕНИЕ

**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. Во многих как специальных, так и общепромышленных задачах датчики уровня применяются для измерения и контроля угла наклона объекта как в статическом, так и в динамическом режиме. При этом требования к их техническим характеристикам все время повышаются.

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 важная. 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 [1].

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 [1, 2]. Скорость выправки достигает при этом достигает 2 км/ч. Допустимая погрешность измерения негоризонтальности железнодорожного пути составляет  $\pm 1,14$  угл. мин при диапазоне измерения  $1^\circ$  [3]. 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 °С до плюс +40 °С [1].

Качество выправки пути зависит в значительной степени от работы системы управления органами машины. Одним из приборов, который формирует информацию о негоризонтальности железнодорожном пути, является измеритель 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 [1]. 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°, 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 негоризонтальности железнодорожного пути.

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

На сегодняшний день известны технические решения применения жидкостных маятников для контроля негоризонтальности пути. Съём информации в таких датчиках осуществляется с помощью ультразвука [4, 5]. Теоретические и экспериментальные исследования показали превосходство

динамических и массо-габаритных характеристик таких датчиков над характеристиками прибора ELT-133.00 [6]. 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 [7].

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.

Практическому решению сформулированных задач посвящена данная работа, состоящая из введения, пяти глав, заключения и списка используемых источников.

**В первой главе** проанализированы требования, предъявляемые к техническим характеристикам датчиков, проведен анализ практических разработок и теоретических исследований в области средств контроля негоризонтальности железнодорожного пути. Показано, что разработка таких приборов требует проведения теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку принципа построения датчика уровня с механическим маятником, полностью погруженным в однородную вязкую жидкость, теоретическое обоснование возможности контроля угла отклонения от горизонтальности с помощью ультразвука, получение адекватных математических моделей работы подсистем указанного датчика, получение математических выражений для его метрологических характеристик, исследование его показателей точности.

**Во второй главе** разработана принципиальная схема маятникового датчика контроля уровня железнодорожного пути с ультразвуковым съемом информации, приведено его теоретическое описание, получена и

проанализирована математическая модель ультразвуковой подсистемы датчика, которая является статической характеристикой датчика.

**В третьей главе** проведено теоретическое исследование работы датчика контроля негоризонтальности железнодорожного пути с маятником, полностью погруженным в однородную вязкую жидкость, в динамическом режиме, разработана обобщенная математическая модель механической подсистемы датчика, учитывающая измеряемые угловые колебания, а также вибрацию основания, на которое установлен датчик, получены зависимости для определения динамических характеристик датчика, проведен их теоретический анализ. Показано, что датчики уровня с маятником, полностью погруженным в однородную вязкую жидкость, превосходят по динамическим характеристикам используемые в настоящее время приборы.

**В четвертой главе** проведено теоретическое исследование показателей точности маятникового датчика контроля уровня пути с ультразвуковым съемом информации, рассмотрена характеристика составляющих общей погрешности, получены численные оценки составляющих погрешности, предложены методы уменьшения основной и дополнительной погрешности датчика. Показана возможность обеспечения датчиком требуемой точности при измерении и контроле поперечной негоризонтальности железнодорожного пути.

**В пятой главе** описаны конструкции опытных образцов датчика, рассмотрены методика и аппаратная реализация экспериментальных исследований, описаны и проанализированы их результаты, доказана адекватность разработанных теоретических математических моделей характеристик датчика.

**В заключении** описаны основные результаты работы, сделаны выводы.

**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.

#### **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.**

1. Теоретически обоснована возможность построения датчика, в котором маятниковый механический элемент, полностью погруженный в

однородную жидкость, используется в качестве отражателя ультразвука, а съем информации о негоризонтальности, воздействующей на датчик, осуществляется посредством сопряженного с маятниковым элементом акустического канала. Разработаны защищенные патентами РФ принципиальные схемы датчика.

2. Полученная математическая модель для определения статической характеристики датчика позволяет проанализировать влияние геометрических и электрических параметров элементов акустического канала на характеристику датчика, ее параметры (диапазон преобразований, чувствительность) и оптимизировать параметры этих элементов.

3. Полученное уравнение движения маятникового элемента датчика, установленного на основании, подверженном угловым колебаниям и вибрации, в совокупности с математическими выражениями для определения динамических характеристик датчика и методикой определения параметров движения присоединенной жидкости позволяет проанализировать влияние конструкционных параметров маятникового элемента и параметров присоединенной жидкости на динамические характеристики датчика, а также на погрешность датчика, обусловленную вибрацией, оптимизировать при необходимости параметры маятникового элемента.

4. Анализ составляющих погрешности датчика позволяет проанализировать основную и дополнительную погрешности, а также позволяет оптимизировать режим его термостатирования.

5. Полученные аналитические выражения для статической и динамических характеристик датчика, проведенный анализ точности являются основой для его проектирования.

6. Разработаны конструкции и изготовлены опытных образцов датчика.

7. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований показано превосходство исследуемого датчика по динамическим характеристикам, а также возможность достижения им более высокой

чувствительности к углу наклона по сравнению с базовым измерителем негоризонтальности ELT-133.00 (фирма «Plasser&Theurer», Австрия), которым комплектуются путевые машины.

**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 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». Также результаты исследований используются в учебном процессе на кафедре «Приборостроение, метрология и сертификация» Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева.

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 литературы, который включает 98 наименований, а также содержит 5 приложений. Работа изложена на 116 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 5 таблиц.

## ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

### 1.1 Условия эксплуатации датчиков контроля уровня железнодорожного пути

Задача текущего содержания пути заключается в обеспечении требуемых геометрических параметров железнодорожного полотна. Для решения указанной задачи производится выправка пути с помощью путевых машин со скоростью 3-4 км/ч.

Основное требование к выправочным устройствам – обеспечить выправку пути с заданной точностью и без снижения производительности и качества работ. Команды управления работой выправочного устройства формируются на основе измерения положения пути посредством маятникового датчика. В качестве возмущений для него принимается негоризонтальность пути и вибрация рабочих органов железнодорожной машины.

К основным видам неровностей относятся [1]:

- 1) периодические неровности в вертикальной плоскости, обусловленные просадкой шпал в местах стыка рельсовых звеньев;
- 2) случайные неровности в вертикальной плоскости, обусловленные просадкой шпал;
- 3) периодические неровности на поверхности рельса в вертикальной плоскости, обусловленные волнообразным износом рельса;
- 4) периодические неровности в горизонтальной плоскости, обусловленные особенностями динамического взаимодействия ходовых частей с рельсами (волнообразные неровности в плане).

Негоризонтальность железнодорожного пути по уровню определяется характером связи между случайными неровностями рельс в продольном профиле. При проектировании приборов, которые представляют собой колебательные звенья с большим коэффициентом демпфирования,

достаточно рассматривать поперечные неровности, обусловленные просадкой рельсовых нитей в стыках, которая вызвана интенсивным разрушением балластного слоя из-за существенных динамических нагрузок, возникающих при взаимодействиях колеса и рельса в месте стыка, и, кроме того, вследствие недостаточной жесткости скрепления рельсовых звеньев. Период стыковых неровностей зависит от стандартной длины рельса [1, 3].

В продольном профиле пути функция возмущения может быть описана аппроксимирующими формулами, которые представлены в таблице 1.1.1. Значения амплитуд, которые входят в формулы, зависят от типа рельса и состояния пути (в таблице 1.1.1 приведенные значения соответствуют условиям для рельса Р50). Для более тяжелых типов рельс свойственна меньшая просадка. Например, если для рельсов типа Р50 глубину стыковой неровности принять за 100 %, то для рельсов типа Р65 эта величина будет составлять уже около 75 % [1, 3].

Таблица 1.1.1 – Периодические неровности железнодорожного пути [1]

Вид неровностей	Функция возмущения	Амплитуда, мм			Длина неровности, м
		Обозначение	Состояние пути		
			Хор	Удовл	
Стыковые в продольном профиле	$\eta_1=A[\cos(2\pi x/L_p)-1]$	A	3	10	$L_p=12,5$
	$\eta_2=A_1[\cos(2\pi x/L_p)-1]+A_2[\cos(4\pi x/L_p)-1]$	$A_1$	3	10	
		$A_2$	2	8	
	$\eta_3=-a/ \sin(\pi x/L_p) $	a	6	25	$L_p=25$
	$\eta_4=-/a_1\sin(\pi x/L_p)+a_2\sin(3\pi x/L_p) $	$a_1$	8	20	
		$a_2$	4	10	
Примечание: $\eta$ – величина неровности; A – амплитуда неровности в мм; $x$ – текущая координата; $L_p$ – длина рельсового пути					

Для приведенных в таблице 1.1.1 параметров возмущений, частота колебаний колесной пары машины или измерительной тележки не

превышает 0,3 Гц. Это соответствует максимальной производительности, которая составляет 2000 м/ч для машин типа ДСП и ВПО. Максимальный наклон базы, на которую устанавливается прибор, при этом не превышает 1 ° [1, 3].

Периодическая негоризонтальность пути в горизонтальной плоскости приводит к извилистому движению измерительной тележки. Аналогично формулам таблицы 1.1.1, волнообразная негоризонтальность в плане может быть описана синусоидой:

$$\eta_H = A \cdot \sin(2\pi x / L_H), \quad (1.1.1)$$

где  $A = 1 - 3$  мм,  $L_H = 10 - 25$  м.

При малых скоростях движения выправочных машин, что имеет место на практике, влиянием этой неровности можно пренебречь [1, 3].

В зоне расположения рабочих органов имеют место наиболее интенсивные вибрационные возмущения, которые оказывают влияние на прибор, установленный в этой зоне. Виброускорения, действующие на площадке измерительной тележки существенно ниже. В таблице 1.1.2 для примера приводятся вибрационные возмущения машины ВПО–3–3000. При этом следует отметить, что частота основной гармоники вибрации для большинства путевых машин находится в пределах от 33 до 45 Гц.

Таблица 1.1.2 – Вибрационные возмущения машины ВПО–3–3000 [1]

Измерительные оси	Амплитуды виброускорений, м/с <sup>2</sup>	
	Машина неподвижна	Скорость движения машины 2000 м/ч
x	21,2	21,2
y	15,0	16,9
z	26,7	75,4

Из выше сказанного следует, что измерители поперечной негоризонтальности железнодорожного пути работают в условиях трехкомпонентной вибрации, при которой необходимо измерять полезный



сигнал, частотный диапазон которого не превышает 0,5 Гц. С учетом увеличения производительности путевых машин, в перспективе, частота полезного сигнала может достигать значения 1 Гц. Также следует отметить, что приборы контроля уровня пути работают в условиях тепловой нагрузки, которая определяется диапазоном изменения температуры от минус 10 до плюс 40 °С [1].

Вследствие необходимости точного закрепления пути в выправленном положении возникают требования по точности отработки команд выправочными устройствами. Это накладывает требования на точность прибора, который контролирует негоризонтальность железнодорожного пути. Требования, предъявляемые к точности прибора, измеряющего негоризонтальность, являются более жесткими, чем требования, предъявляемые непосредственно к негоризонтальности пути. Для обеспечения точности выправки пути  $\pm 2$  мм ( $\pm 4,6$  угл. мин.), соответствующей хорошему состоянию пути, требования к точности прибора составляют  $\pm 0,5$  мм ( $\pm 1,14$  угл. мин.) [1]. Таким образом, датчики уровня пути, работающие в составе путевых машин, должны обладать погрешностью измерения, не превышающей  $\pm 1,14$  угл. мин.

## **1.2 Анализ существующих средств измерения и контроля уровня железнодорожного пути**

В основе известных к настоящему времени датчиков контроля негоризонтальности железнодорожного пути лежит свойство физического маятника: базовая линия маятника, находящегося в состоянии равновесия, совпадает с местной вертикалью или горизонталью. Указанные датчики по методу измерений уровня пути могут быть разделены на две группы: маятниковые датчики прямого измерения и датчики, реализующие компенсационный метод измерения [2].

Датчики, реализующие прямой метод измерения, строят на основе маятников, которые характеризуются значительной собственной массой, имеют относительно небольшой период собственных колебаний и достаточно большой относительный коэффициент демпфирования. Такой маятник является сам по себе эффективным фильтром для высокочастотного возмущения [3]. В основу датчиков, которые реализуют компенсационный метод измерения, положены микромеханические акселерометры, имеющие малый период собственных колебаний. Вследствие этого они очень восприимчивы к высокочастотным вибрационным возмущениям, и в итоге выходной сигнал датчика сильно искажается. Помимо этого, вибрация способна привести к механическому разрушению маятниковой подсистемы таких датчиков, что накладывает серьезные ограничения на их применение на реальных объектах. Кроме того, как отмечено в работе [2] фазочастотная характеристика приборов компенсационного типа в рабочей полосе частот значительно хуже, чем у приборов прямого измерения. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать датчики уровня пути, построенные на основе прямых методов измерений.

В России связи широкое распространение на железных дорогах получили путевые машины австрийской фирмы «Plasser&Theurer». Прибор ELT-133.00, которым комплектуются эти машины, и его характеристики принято считать базовыми. Характеристики вновь разрабатываемых приборов, относящихся к данному классу, должны соответствовать характеристикам прибора ELT-133.00 [1, 2].

Конструкция прибора ELT-133.00 упрощенно представлена на рисунке 1.2.1. В корпусе 1, который может быть выполнен способом литья, размещается достаточно массивный маятник 3, демпфирование его колебаний осуществляется силиконовой жидкостью 2 с большим значением вязкости. Визуализация показаний прибора происходит на шкале 5 посредством кулисного стрелочного механизма 4. Преобразование угла поворота в напряжение происходит за счет применения кругового высокоточного потенциометра, основой которого является напыленный

резистивный слой. Связь маятника с осью вращения движка потенциометра осуществляется посредством шкивов 7, 8, а также гибкой передачи 6, которая может быть, например, выполнена в виде стального тросика или кордовой нити. В состав гибкой передачи может быть включена пружина небольшой жесткости для компенсации ее возможной слабину [2].

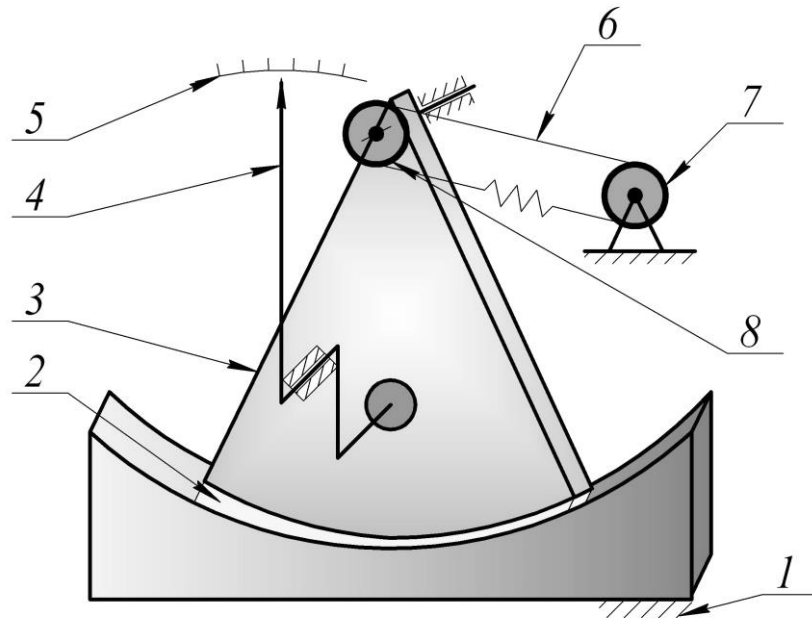


Рисунок 1.2.1 – Схема датчика ELT-133.00: 1 – корпус; 2 – жидкость; 3 – маятник; 4 – стрелочный кулисный механизм; 5 – шкала; 6 – гибкая передача; 7,8 – шкивы на осях потенциометра и маятника соответственно

Для изучения вопроса о возможности построения на отечественной элементной базе (при существенном снижении стоимости) прибора с характеристиками, аналогичными характеристикам прибора ELT-133.00, на кафедре «Приборы управления» Тульского государственного университета был разработан прибор ИН-1, который имел в своей конструкции проволочный потенциометрический преобразователь [1, 2]. Лабораторные испытания опытного образца прибора ИН-1 показали, что использование проволочного потенциометра не позволяет обеспечить требуемый порог чувствительности. Кроме того, линейно-ступенчатый сигнал, формируемый потенциометром, затрудняет его обработку, гибкая связь между шкивом маятника и потенциометром показала свою низкую надежность [1]. В силу указанных причин, тот же коллектив научно-технических сотрудников

разработал вторую модель прибора – ИН-2. В этом приборе непосредственно на оси подвеса маятника устанавливается индукционный преобразователь углов типа 45Д-20Б [1, 2]. Конструкция прибора ИН-2 упрощенно представлена на рисунке 1.2.2.

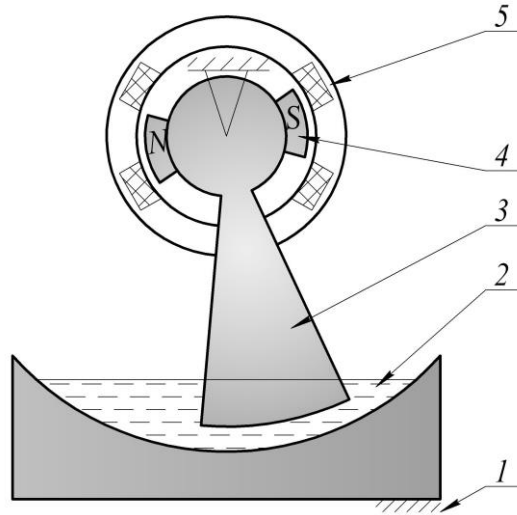


Рисунок 1.2.2 – Схема датчика ИН-2 (ТулГУ): 1 – корпус;  
2 – демпфирующая жидкость; 3 – маятник;  
4, 5 – ротор и статор датчика угла индукционного типа

На кафедре «Приборостроение, метрология и сертификация» Орловского государственного технического университета (ОрелГТУ) была разработана конструкция датчика, в котором за базовую линию принимается местная горизонталь – граница раздела двух несмешивающихся жидкостей с различной плотностью (рисунок 1.2.3) [4].

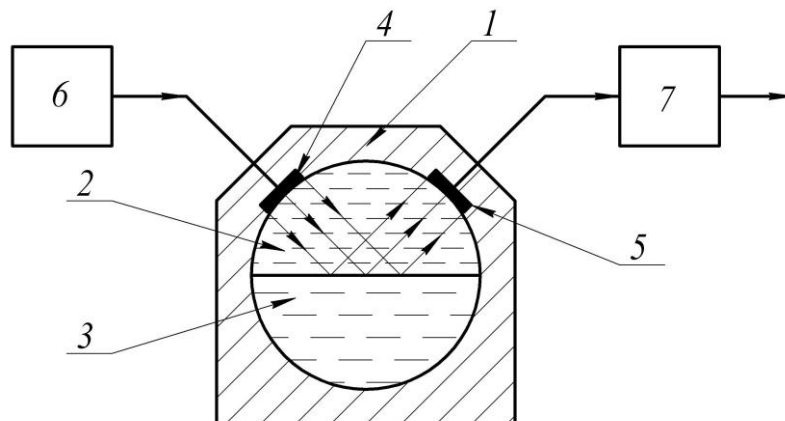


Рисунок 1.2.3 – Жидкостный датчик неровности (ОрелГТУ):  
1 – корпус; 2, 3 – несмешивающиеся жидкости; 4 – пьезоизлучатель; 5 – пьезоприемник; 6 – генератор УЗ частот; 7 – амплитудный детектор

При наклоне корпуса 1 указанного датчика, равному измеряемому углу наклона объекта, изменяется угол между направлением ультразвуковых волн, излучаемых пьезоизлучателем 4 и местной горизонталью, геометрически совпадающей с границей раздела двух несмешивающихся жидкостей 2 и 3, полностью заполняющих рабочую камеру датчика. Вследствие этого углового рассогласования уменьшается количество энергии ультразвуковых волн, падающих на пьезоприемник 5, в результате чего уменьшается амплитуда генерируемого им напряжения, а, следовательно, и напряжение на выходе амплитудного детектора 7. Возбуждение ультразвуковых волн пьезоприемником осуществляется за счет генератора ультразвуковых частот 6. Жидкостный датчик фактически не имеет ограничений по порогу чувствительности, обусловленного трением. Ультразвуковая подсистема съема информации является бесконтактной и также не оказывает ограничения на порог чувствительности. Также, как показывают результаты исследований, жидкостные датчики обладают намного меньшими массогабаритными параметрами по сравнению с приборами ELT-133.00, ИН-1, ИН-2, а также улучшенными по сравнению с ними динамическими характеристиками [8].

Недостатком указанного датчика является частичное разрушение границы раздела жидкостей под воздействием вибрации, что может привести к потере его работоспособности. Этот недостаток может быть устранен заменой отражающей ультразвук поверхности на механическую пластину со смещенным центром масс, которая может быть подвешена в камере датчика на торсионе, обладающем малой жесткостью, или с помощью осей установлена в специальных опорах, обладающих малым коэффициентом трения [7, 9].

Основные технические параметры проанализированных средств контроля негоризонтальности железнодорожного пути представлены в таблице 1.2.1.

Таблица 1.2.1 – Основные технические параметры средств контроля уровня железнодорожного пути

Прибор	Технические параметры				
	Напряжение питания, В	Масса, кг	Габаритные размеры, см	Чувствительность, мВ/угл. мин	Частотный диапазон, Гц
ELT-133.00	24	30	35x14,5x41,5	12	0,5
ИН-2	24	20	34x13x36,5	10	0,5
Жидкостный датчик	5	3	10x10x10	6,5	1

### 1.3 Обзор публикаций по теме исследований

Исследуемый датчик негоризонтальности железнодорожного пути представляет собой систему, состоящую из двух подсистем: маятниковой механической подсистемы, которая позволяет задавать базовую линию (совпадающую с местной вертикалью), относительно которой собственно измеряется угол наклона объекта и акустической подсистемы, с помощью которой осуществляется съем информации об угле наклона. Таким образом, представляет интерес рассмотреть публикации, которые посвящены исследованиям указанных подсистем датчика.

Первой классификацией приборов, работа которых основана на свойствах колебательного движения тела при выводе его из положения равновесия под воздействием «восстанавливающих» сил, является фундаментальная работа академика А.Н. Крылова [10]. А.Н. Крылов в разделе «Общие замечания об устройстве регистрирующих приборов» рассматривает три основных типа таких приборов в соответствии с их назначением:

- 1) приборы, которые не должны откликаться на воздействие возмущающих сил, например, кренометры, паллографы, мореграфы и т.п.;
- 2) приборы, которые предназначены для записи возмущающей силы, например, индикаторы, гальванометры и т.п.;
- 3) приборы, которые предназначены для записи импульса силы, например, баллистический гальванометр.

Также в отмеченной работе академик Крылов дает рекомендации, которыми следует руководствоваться при проектировании подобных приборов. Практически ценными для настоящей диссертационной работы являются следующие положения [1]:

- 1) во-первых, необходимо иметь четкое представление о характере возмущающих сил: являются ли они периодическими или нет, если являются периодическими, то нужно ли знать их период, если они не являются периодическими, то как они нарастают;
- 2) если прибор не должен откликаться на действие возмущающих сил, то в этом случае период его свободных колебаний (если у него несколько степеней свободы, то наименьший из периодов его основных колебаний) должен быть существенно больше периода возмущающей силы.

В работе [11] рассматривался вопрос выбора диапазона частот и влияние коэффициента демпфирования на частотные характеристики прибора. В частности показано, что при прочих одинаковых условиях прибор обладает наименьшей частотной погрешностью при относительном коэффициенте демпфирования, равном 0,6 – 0,7. Максимальная частота изменения величины, измеряемой прибором, не должна превышать, при этом, 0,1 – 0,15 от собственной частоты прибора [1].

Отметим также работу известного немецкого ученого К. Магнуса [12]. К. Магнус в разделе «Гармонические возмущающие функции» рассмотрел дифференциальные уравнения движения механического осциллятора, который состоит из пружины, массы и элемента демпфирования, для трех типов возмущений: 1) возмущение осуществляется за счет периодического движения точки подвеса пружины; 2) возмущение

осуществляется за счет колебаний корпуса демпфера; 3) возмущение осуществляется за счет движения основания, с которым соединены пружина и корпус демпфера. На основании полученных дифференциальных уравнений вводятся понятия амплитудной и фазовой характеристики: коэффициент динамичности, который показывает во сколько раз амплитуда колебаний осциллятора отличается от амплитуды внешнего возмущения, и фазовое запаздывание колебаний осциллятора по отношению к колебаниям возмущающего воздействия.

В разделе работы [13] «Основы теории маятникового кренометра» рассматриваются элементы теории и проектирования прибора, который близок по своему назначению к измерителям негоризонтальности железнодорожного пути. Главное внимание в указанной работе уделяется исследованиям вынужденных колебаний. В работе получены результаты, которые сейчас являются широко известными [1]:

- 1) «амплитуда вынужденных колебаний пропорциональна амплитуде горизонтальных перемещений точки подвеса кренометра»;
- 2) «период вынужденных колебаний равен периоду возмущающей силы»;
- 3) «чем больше период качки (корабля), тем меньше влияние ее частоты на показания кренометра».

Для измерителей уровня пути практически наиболее важным представляется первый из указанных выше результатов, поскольку размещение датчика негоризонтальности на путевой машине схоже с размещением кренометра на корабле. Кроме того по возмущающим воздействиям поперечные колебания путевой машины схожи с бортовой качкой корабля [1]. Также эти вопросы рассматривались академиком Л.И. Мандельштамом в лекциях, прочитанных им в 1930-1933 гг., которые позднее были опубликованы [14].

Комплексные исследования приборов, измеряющих негоризонтальность железнодорожного пути выполнены в уже отмеченной работе [1]. В главе «Маятниковые датчики прямого измерения» получено выражение, описывающее движение маятникового элемента датчика, на



который воздействуют измеряемые колебания и вибрация от рабочих органов путевой машины. Указанное уравнение (1.3.1) получено на основе предположения, что основание, на которое установлен датчик, подвержено угловым колебаниям в соответствии с законом  $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$  ( $\gamma_0$  и  $\omega$  – соответственно амплитуда и частота колебаний основания) и линейной вибрации, определяемой компонентами  $x_6, y_6, z_6$ . Также уравнение учитывает высоту установки датчика относительно измеряемого объекта  $L$ . Данное уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} md^2\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + md(g - L\dot{\gamma}^2 + \ddot{y}_6 + x_6\ddot{\gamma} + 2\dot{x}_6\dot{\gamma} - y_6\dot{\gamma}^2)\phi = \\ = md[(L-d)\ddot{\gamma} - g\gamma + y_6\ddot{\gamma} + 2\dot{y}_6\dot{\gamma} + x_6\dot{\gamma}^2 - \ddot{x}_6] - M_0 \text{sign}(\dot{\phi} + \dot{\gamma}), \end{aligned} \quad (1.3.1)$$

где  $m$  и  $d$  — соответственно масса и смещение центра масс маятникового чувствительного элемента,  $b$  — абсолютный коэффициент демпфирования маятника,  $M_0$  — модуль моментов сил трения в подшипниках оси подвеса маятника,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\gamma$  — угол, характеризующий отклонение уровня железной дороги от горизонта [1].

На основе уравнения движения (1.3.1) получены выражения для частных динамических характеристик маятниковых датчиков: коэффициента динамичности и фазового запаздывания, которые имеют следующий вид [1]:

$$V = \frac{1 + \left(\frac{L}{d} - 1\right)\eta^2}{\sqrt{\left(1 - \eta^2 \left(1 - 0,5 \frac{L}{d} \gamma_0^2\right)\right)^2 + (2D\eta)^2}}, \quad \text{tg } \psi = \frac{2D\eta}{1 - \eta^2}. \quad (1.3.2)$$

Также с помощью полученного уравнения исследовано влияние вибрации (называемой «косой») оси подвеса маятника совместно с угловыми колебаниями основания на динамику маятникового элемента, а также возникающие при этом погрешности измерения уровня железнодорожного пути.

В результате анализа результатов отмеченных исследований получены следующие результаты [1]:

- 1) «при активном демпфировании, что имеет место в конструкции известных приборов, собственные колебания практически не имеют места и движение носит характер вынужденных колебаний под действием внешних возмущений»;
- 2) ««косая» вибрация порождает так называемый вибрационный сдвиг нуля, т.е. изменение среднего положения маятника, относительно которого он совершает колебания на частоте внешней вибрации»;
- 3) «маятник отслеживает колебания основания с отставанием по фазе и амплитудными искажениями, определяемыми высотой подвеса маятника, коэффициентом демпфирования и расстоянием от центра тяжести маятника до оси подвеса».

Дифференциальное уравнение (1.3.1) и выражения для динамических характеристик (1.3.2) получены для указанных ранее приборов ELT 133.00 и ИН-2, которые отличаются от исследуемого датчика тем, что их маятник лишь частично погружен в демпфирующую жидкость и имеет сравнительно большую массу, что позволяет не учитывать инерционные свойства жидкости при его колебаниях, а также допускать момент трения в опорах пренебрежимо малым по сравнению с моментом восстановительных сил. В исследуемом датчике необходимо учитывать влияние жидкости, окружающей маятниковую пластину на ее динамику при воздействии на датчик угловых колебаний основания и вибрации.

Впервые понятие присоединенной массы жидкости было сформулировано Дюбуа в 1776 г., который исследовал экспериментально малые колебания сферического маятника. Точное математическое выражение для присоединенной массы шара было получено в работах Грина (1833 г.) и Стокса (1843 г.) [15]. Присоединенная масса жидкости плоской пластины исследовалась во многих работах, как отечественных, так и зарубежных ученых. Среди отечественных работ следует отметить работы Л. И. Седова [16], и А. М. Полунина [17] основные результаты которых систематизированы профессором А.И. Короткиным в работе [15]. В этих работах определены аналитические выражения для присоединенных

моментов инерции плоских пластин и цилиндрических тел, плавающих в невязкой жидкости с заданной плотностью. Среди зарубежных стоит отметить работу А. Лакиса [18], в которой приведены результаты экспериментов и компьютерного моделирования с помощью метода конечных элементов по определению резонансной частоты изгибных колебаний пластины в зависимости от величины погружения. В настоящей работе показана существенная зависимость собственной частоты колебаний пластины от относительной величины погружения пластины.

В рассмотренных работах подразумеваются изгибные колебания пластины, зажатой с одной или двух сторон, что отличает ее от маятниковой пластины, закрепленной на оси подвеса, а также в них не учитывается влияние вязкости жидкости на частоту собственных колебаний и коэффициент их затуханий. Также в указанных работах не учитывается, что колебания пластины совершаются с малой частотой и амплитудой. Таким образом, в указанных работах не рассмотрен вопрос малых низкочастотных колебаний маятника в виде плоской пластины со смещенным центром масс, подвешенной на торсионе и полностью погруженной в однородную жидкость, обладающей существенной вязкостью.

Вопросы построения акустических измерительных каналов нашли широкое отражение во многих работах как отечественных, так и зарубежных ученых. В работе [19] рассмотрена общая теория и разновидности акустических волн, а также приведены математические модели их распространения, включая изменение их параметров при отражении от различных типов препятствий. Аналогичным вопросам посвящена работа [20], в которой особое внимание уделяется вопросам изменения параметров акустических волн при падении из жидкой среды на металлическую пластину конечной толщины, за которой находится аналогичная жидкость, что весьма близко к условиям, имеющих место в исследуемом датчике. Также вопросы теории излучения, распространения акустических волн и прохождения ими различных препятствий описаны во многих зарубежных работах, например [21, 22].

Вопросы, посвященные применению ультразвука для измерения различных физических величин, а также вопросы, посвященные технической реализации различных ультразвуковых методов измерений нашли широкое отражение в таких работах как [23, 24]. Особое внимание стоит уделить работам [25, 26], а также работе [27], в которых исследована теория работы ультразвукового двухкристального интерферометра, длина которого близка к размеру акустической камеры исследуемого датчика. Такой интерферометр состоит из излучающего дискового пьезоэлемента, рабочей камеры, представляющей трубку диаметром больше чем диаметр пьезоэлементов и пьезоприемника. Информативным параметром такого интерферометра является амплитуда выходного сигнала пьезоприемника. В работе [28] описаны процедура и результаты измерений зависимости коэффициента поглощения ультразвука и вязкости касторового масла от температуры интерферометрическим методом. Заметим, что исследуемый датчик также имеет излучающий и приемный пьезоэлементы, акустически сопряженные посредством маятникового отражателя, а его рабочая камера также заполняется касторовым или близким к нему по свойствам маслом. Таким образом, теоретические и экспериментальные сведения, содержащихся в этих работах позволяют понять принцип прямого и обратного пьезоэлектрического преобразования с учетом особенностей реальных свойств среды распространения ультразвука и расстояния между пьезокристаллами, а также понять влияние возможного изменения этих параметров на выходной сигнал пьезоприемника.

Отдельно следует отметить большое количество работ посвященных теории колебаний пьезоэлементов и возбуждения ими ультразвуковых волн. В работах [29, 30] приведены распространенные пьезоэлектрические материалы, а также основные разновидности выпускаемых промышленностью пьезоэлементов, их характеристики и области применения. В работах [31, 32] широко рассмотрены вопросы режимов возбуждения и приема пьезоэлектрических элементов, согласование их с

рабочей средой и с электрическими цепями, а также распространенные виды конструкций преобразователей на основе пьезоэлементов.

Наиболее близкой к настоящему исследованию является работа [33], в которой рассматривается теория работы и вопросы точности рассмотренного выше жидкостного датчика негоризонтальности. Однако эта работа не учитывает ряд теоретических положений и экспериментальных данных, описанных в работах [25, 28]. Кроме того, маятник в виде пластины со смещенным центром масс физически отличается от жидкостного маятника по механическим и гидродинамическим свойствам, а также изменение температуры не столь существенно влияет на геометрические параметры механического маятника по сравнению с жидкостным. Указанные обстоятельства не позволяют применять теорию [6] жидкостных датчиков к датчикам, в которых механический маятниковый чувствительный элемент полностью погружен в жидкость.

Таким образом, анализ литературных источников показал, что отсутствуют публикации, в которых исследуется акустический метод съема информации в датчиках с маятниковым механическим чувствительным элементом, а также отсутствуют публикации, в которых исследуется динамика маятниковой пластины, полностью погруженной в однородную вязкую жидкость, при вынужденных угловых колебаниях датчика с малой частотой и амплитудой в условиях вибрации.

#### **1.4 Выводы и задачи исследования**

Проведенный обзор работ, посвященных методам и средствам контроля негоризонтальности железнодорожного пути, и их анализ позволяют сделать выводы:

1. Характеристики существующих на сегодняшний день приборов не в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым к ним при решении задачи динамического контроля негоризонтальности железнодорожного пути.

2. Анализ известных на сегодняшний день методов построения датчиков негоризонтальности железнодорожного пути, реализующих прямой метод измерения, показал перспективность датчиков с ультразвуковым съемом информации.

3. Проведенный обзор публикаций в рассматриваемых областях науки и техники не позволил выявить аналитическое описание механической подсистемы датчика с механическим маятниковым чувствительным элементом, полностью погруженным в однородную вязкую жидкость, учитывающее совместное воздействие углового движения основания и его вибрации. Также обзор публикаций не позволил выявить математического описания ультразвуковой подсистемы съема информации датчика с маятниковым механическим чувствительным элементом, которое достаточно хорошо соответствовало бы экспериментальным данным.

4. Не исследован вопрос точности, и не определены потенциальные метрологические характеристики датчика с ультразвуковым съемом информации, в котором маятниковый механический чувствительный элемент полностью погружен в однородную вязкую жидкость.

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

Объектом исследования в данной работе является система, состоящая из маятниковой механической подсистемы в виде корпуса, с полостью, полностью заполненной вязкой жидкостью и размещенной в ней на торсионном подвесе или в специальных опорах пластиной со смещенным центром масс, и ультразвуковой подсистемы съема информации. Механическая подсистема выступает первичным преобразователем угла негоризонтальности в угловое рассогласование между корпусом и базовой линией отсчета (местной вертикалью, определяемой маятниковым чувствительным элементом), ультразвуковая подсистема является вторичным преобразователем углового рассогласования между корпусом и базовой

линией отсчета в выходной электрический сигнал. Эту систему, в дальнейшем, будем называть датчиком.

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.

## ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СЪЕМА ИНФОРМАЦИИ

### 2.1 Принцип построения маятникового датчика контроля уровня железнодорожного пути с ультразвуковым съемом информации

Как показано в предыдущем разделе в датчиках негоризонтальности прямого измерения за базовую линию принимается местная вертикаль физического маятника либо горизонталь поверхности жидкости, либо граница раздела двух несмешивающихся жидкостей. Результаты исследований указанных вариантов показывают, что датчики с двумя несмешивающимися жидкостями обладают повышенными динамическими характеристиками, имея при этом существенно меньшие массо-габаритные размеры. Съем информации о наклоне в таких датчиках осуществляется с помощью ультразвука. Существенным недостатком таких датчиков является разрушение границы раздела жидкостей под действием вибрации, которая имеет место при работе датчика в составе ремонтно-восстановительного комплекса, и, как следствие, потеря работоспособности датчика [34].

В исследуемом датчике его рабочая камера полностью заполнена однородной вязкой жидкостью, а вместо границы раздела жидкостей за базовую линию принимается местная вертикаль маятниковой пластины, которая подвешена в корпусе датчика на торсионе, обладающем малой жесткостью. При наклоне корпуса 1 датчика, пропорциональном негоризонтальности пути, возникают угловые рассогласования между корпусом и маятниковой пластиной 3, помещенной в камере заполненной вязкой жидкостью 2 (Приложение А). Пластина закреплена в корпусе с помощью подвеса 4. В корпусе с помощью специальных держателей установлены дисковые ультразвуковые пьезоизлучатель 5, питаемый от электрического генератора 7 и пьезоприемник 6. Выходной сигнал пьезоприемника поступает на согласующее устройство 8, которое



осуществляет предварительное усиление выходного сигнала пьезоприемника и согласование импедансов, а затем на амплитудный детектор 9 (рисунок 2.1.1) [35, 36].

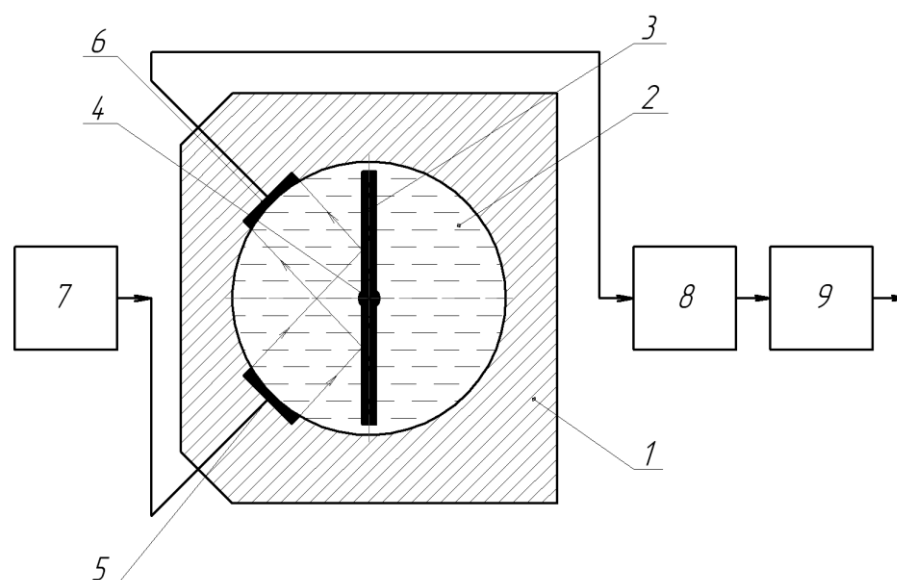


Рисунок 2.1.1 – Обобщенная принципиальная схема датчика с амплитудным съемом информации: 1 – корпус; 2 – цилиндрическая камера, заполненная жидкостью; 3 – маятниковая пластина; 4 – подвес; 5 – излучатель ультразвука; 6 – приемник ультразвука; 7 – генератор; 8 – согласующее устройство; 9 – амплитудный детектор

При возникновении угловых рассогласований между корпусом и пластиной ультразвуковые волны, генерируемые пьезоизлучателем, несколько меняют свое направление распространения и отражаются под углом, пропорциональным углу наклона корпуса. Также в этом случае ультразвук падает на пьезоприемник не нормально, а под углом, пропорциональным углу наклона датчика. Вследствие этого, как будет математически показано ниже, изменяется амплитуда выходного сигнала пьезоприемника. В результате напряжение на выходе амплитудного детектора пропорционально наклону датчика и, следовательно, измеряемой негоризонтальности пути.

Также возможен вариант построения датчика, принципиальная схема которого приведена на рисунке 2.1.2, в котором в качестве информативного параметра об угле наклона используется разность фаз между напряжением на

пьезоизлучателе и пьезоприемнике [37]. Конструкция такого датчика аналогична конструкции датчика [35] и отличается лишь схемой обработки информации (вместо амплитудного используется фазовый детектор) (Приложение Б). Разность фаз между входным и выходным напряжением датчика возникает вследствие изменения длины акустического пути при повороте корпуса датчика относительно маятника и соответствующего изменения времени прохождения ультразвуковыми волнами расстояния от излучателя до приемника.

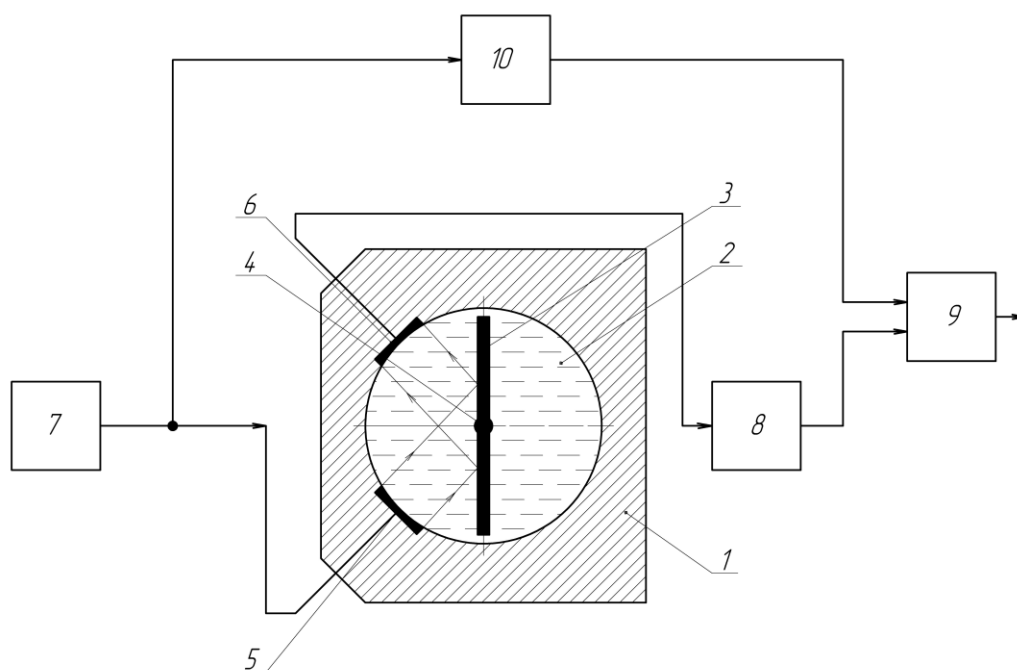


Рисунок 2.1.2 – Обобщенная принципиальная схема датчика с фазовым съемом информации: 1 – корпус; 2 – цилиндрическая камера, заполненная жидкостью; 3 – маятниковая пластина; 4 – подвес; 5 – излучатель ультразвука; 6 – приемник ультразвука; 7 – генератор; 8 – согласующее устройство; 9 – фазовый детектор; 10 – блок установки начальной фазы

Отметим также, что поскольку ультразвуковая подсистема съема информации является бесконтактной, а масса механического маятника существенно ниже чем у известных приборов, то исследуемый датчик, по сравнению с его механическими аналогами (ELT-133.00, ИН-1, ИН-2), имеет существенно более низкие ограничения по порогу чувствительности, которые могут быть вызваны трением в подвесе маятника и подсистеме съема информации.

## 2.2 Разработка основ теории ультразвуковой подсистемы датчика

Покажем, что в датчиках, построенных по схеме, представленной на рисунке 2.1.1, при возникновении угловых отклонений корпуса будет изменяться амплитуда выходного сигнала. Определим зависимость напряжения на пьезоприемнике при возникновении угловых рассогласований между корпусом датчика, в котором установлены пьезоизлучатель и пьезоприемник и маятниковой пластиной, направленной вдоль местного вектора силы тяжести.

Известна функция, связывающая входное напряжения пьезоизлучателя и выходное напряжение пьезоприемника, расположенных напротив друг друга на расстоянии  $L$  [25]:

$$U_{\text{пр}} = U_0 \cdot \frac{C'}{\sin \left\{ \left[ 2\pi \left( \frac{L}{\lambda} \right) + a \right] - j \left[ \beta \left( \frac{L}{\lambda} \right) + b \right] \right\}}, \quad (2.2.1)$$

где  $U_0$  – амплитуда входного напряжения пьезоприемника,  $\beta$  – коэффициент ослабления ультразвуковой волны в жидкости,  $L$  – геометрическое расстояние между источником и приемником ультразвука,  $\lambda$  – длина ультразвуковой волны в жидкости, параметр  $C'$  определяется выражением:

$$C' = \frac{(-2\chi / A_c \rho_c V_c) C}{\left[ A^2 - \left( \frac{\rho_{\text{ж}} c}{\rho_c V_c} \right)^2 \left( \frac{1}{1 - j \frac{\beta}{2\pi}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (2.2.2)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  и  $c$  – соответственно плотность жидкости и скорость звука в ней,  $\rho_c$  и  $V_c$  – соответственно плотность пьезокерамики и скорость звука в ней,  $A_c$  – площадь пьезодиска.

Параметры  $\chi$ ,  $A$  и  $C$  определяются выражениями:

$$\chi = (d_{33} / s_{33}) \cdot (A_c / T_c), \quad (2.2.3)$$

где  $d_{33}$  и  $s_{33}$  – соответственно пьезомодуль и коэффициент упругости пьезодиска,  $T_c$  – толщина пьезодиска;

$$A = \left( \frac{4\theta}{Q} \right) - \frac{\rho_d V_d}{\rho_c V_c}, \quad (2.2.4)$$

где  $\rho_d$  и  $V_d$  – соответственно плотность материала пьезодержателя и скорость звука в нем,  $\theta = \frac{\chi^2}{2\pi f C_0 A_c \rho_c}$ ,  $C_0$  – емкость пьезодиска,  $Q$  –

добротность пьезоэлемента;

$$C = \frac{Z_B}{\left[ 1 - \left( Z_B \left( 1 - j \frac{\beta}{2\pi} \right) / \rho_{жс} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \frac{\delta}{2} \left( \frac{Z_L}{\frac{A \cdot A_c \rho_c V_c}{4\chi^2} + Z_L} \right), \quad (2.2.5)$$

где  $Z_B = \rho_c V_c (A - 4j\theta)$ ,  $\delta = T_c / (d_{33} / s_{33})$ ,  $Z_L = -\frac{j}{2\pi f C_0}$ ,  $f$  – частота входного напряжения пьезоизлучателя.

Параметры  $a$  и  $b$  в (2.2.1) находятся из выражения:

$$a - jb = \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{(\rho_c V_c / \rho_{жс}) \left( 1 - j \frac{\beta}{2\pi} \right) (4\theta + 2jA)}{1 + \left( \frac{\rho_c V_c}{\rho_{жс}} \right)^2 \left( 1 - j \frac{\beta}{2\pi} \right)^2 (A^2 - 4j\theta A)} \right]. \quad (2.2.6)$$

В случае рассматриваемого датчика в выражение (2.2.1) необходимо ввести коэффициент отражения ультразвуковой волны на границе жидкость-пластина, т.е.

$$U_{\text{пр}} = U_0 \cdot \frac{C'}{\sin \left\{ \left[ 2\pi \left( \frac{L}{\lambda} \right) + a \right] - j \left[ \beta \left( \frac{L}{\lambda} \right) + b \right] \right\}} \cdot K_{\text{отр}}. \quad (2.2.7)$$

Коэффициент отражения на границе жидкость-пластина определяется выражением [38, 39]:

$$K_{\text{отр}} = \frac{m \sin \psi - j \sqrt{\cos^2 \psi - n^2}}{m \sin \psi + j \sqrt{\cos^2 \psi - n^2}}, \quad (2.2.8)$$

где  $m = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{ж}}$ ,  $n = c / V_{\text{п}}$ ,  $\rho_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{п}}$  – соответственно плотность материала маятниковой пластины и скорость ультразвука в ней,  $\psi$  – угол между направлением распространения ультразвука и границей раздела сред (угол скольжения).

Для рассматриваемой конструкции датчика:

$$\psi = 45^0 \pm \alpha, \quad (2.2.9)$$

где  $\alpha$  – измеряемый угол негоризонтальности железнодорожного пути.

Учитывая, что  $\alpha$  не превышает  $\pm 8^0$ , можно сделать вывод, что угол  $\psi$  лежит в диапазоне от  $37^0$  до  $53^0$ . Для случая изготовления маятниковой пластины датчика из меди и заполнения его рабочей камеры маслом (трансформаторным, моторным, касторовым) критический угол скольжения  $\psi_{\text{кр}} = 65^0$ . Для меньших (закритических) углов скольжения, которые имеет место в нашем случае, модуль коэффициента отражения равен единице. Таким образом, значение коэффициента отражения может быть исключено из дальнейших расчетов, а выражение для выходного напряжения пьезоприемника исследуемого датчика может рассматриваться в виде (2.2.1).

Выражение (2.2.7) справедливо только для перпендикулярного падения ультразвуковой волны на пьезоприемник, т.е. для угла наклона датчика  $\alpha = 0^0$ . Для ненулевого угла наклона датчика в выражение (2.2.7) необходимо ввести коэффициент, учитывающий наклонное падение ультразвука на приемник.

При повороте корпуса датчика на угол  $\alpha$ , равный углу негоризонтальности железнодорожного пути, происходит смещение направления ультразвуковой волны на угол  $\alpha$  и смещение центра фронта падающей на пьезоприемник ультразвуковой волны относительно его центра на величину:

$$l(\alpha) = 2 \cdot R \cdot \text{tg}(\alpha), \quad (2.2.10)$$

где  $R$  – радиус цилиндрической камеры датчика (рисунок 2.2.1.а).

Вследствие наклонного падения ультразвуковой волны отдельные участки пьезоприемника возбуждаются с различными фазами, вследствие чего элементарная площадка  $dS$  пьезоэлемента генерирует заряд, равный [40]:

$$dQ = K \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot dS, \quad (2.2.11)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий преобразование электрической энергии генератора в энергию ультразвуковой волны на пьезоизлучателе и преобразование давления ультразвука в заряд на пьезоприемнике,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота ультразвука,  $\varphi = 2\pi \cdot (x \cdot \sin(2\alpha) / \lambda)$  – фаза ультразвуковой волны вдоль оси  $x$  по поверхности пьезоэлемента (рисунок 2.2.1.б),  $\lambda$  – длина волны ультразвука в жидкости, заполняющей цилиндрическую камеру датчика.

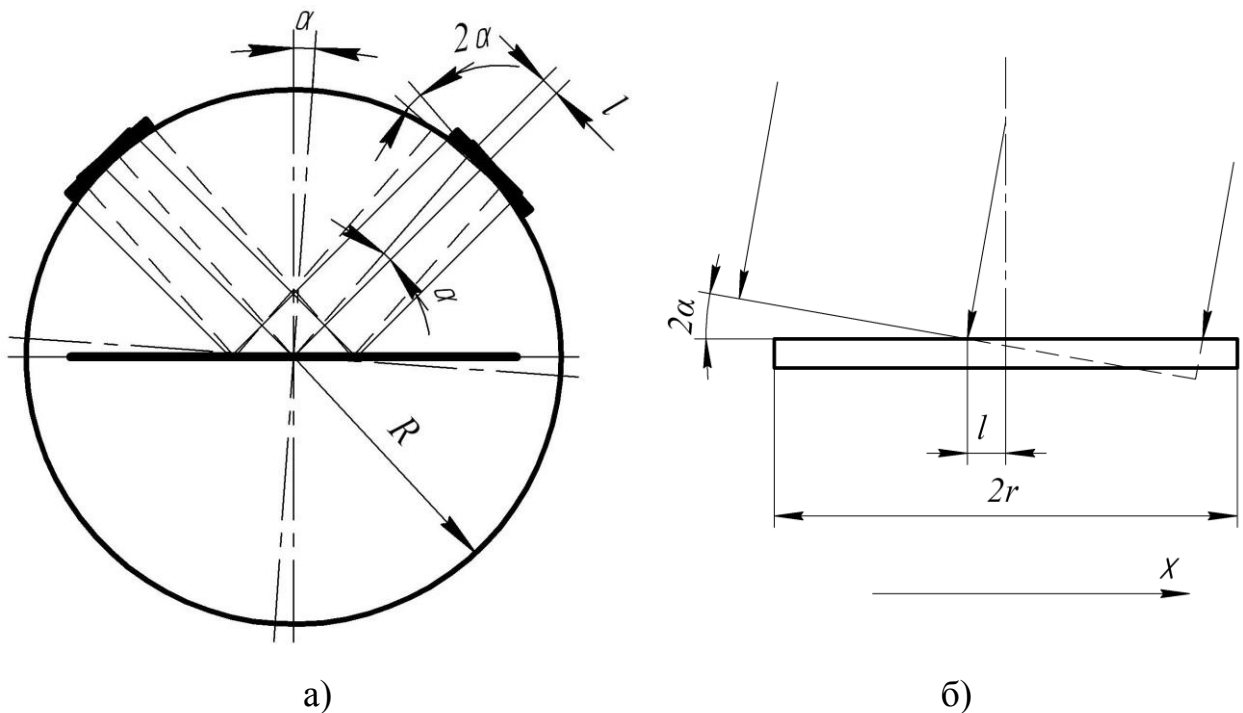


Рисунок 2.2.1 – Распространение ультразвуковой волны в камере датчика:  
а) отражение от маятниковой пластины; б) наклонное падение на пьезодиск

Совместим начало координат  $Oxy$  с центром дискового пьезоэлемента (окружность 1), тогда фронт падающей на него ультразвуковой волны можно представить в виде окружности 2 (рисунок 2.2.2).

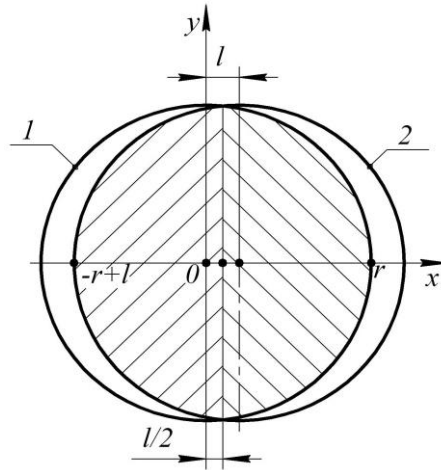


Рисунок 2.2.2 – Перекрытие поверхности пьезоэлемента фронтом падающей ультразвуковой волны

Выходное напряжение датчика определяется выражением:

$$U_{\text{пр}}(\alpha) = \frac{1}{C_0} \int_S dQ = U_0 \cdot K_{\text{дат}} \cdot \int_S \sin(2\pi ft + \varphi) \cdot dS, \quad (2.2.12)$$

где  $K_{\text{дат}} = \left| \frac{C'}{\sin \left\{ \left[ 2\pi \left( \frac{L}{\lambda} \right) + a \right] - j \left[ \beta \left( \frac{L}{\lambda} \right) + b \right] \right\}} \right|$  – коэффициент датчика,

связывающий напряжение на пьезоизлучателе и пьезоприемнике с учетом прямого и обратного пьезоэффекта, а также с учетом ослабления ультразвуковой волны при ее распространении в камере датчика.

В соответствии с рисунком 2.2.2 можно записать [41]:

$$\int_S \sin(2\pi ft + \varphi) \cdot dS = \int_{-r+l}^{l/2} \sqrt{r^2 - (x-l)^2} \cdot \sin \left( \omega t - \frac{x \cdot \sin(2\alpha)}{\lambda} \cdot 2\pi \right) dx + \int_{l/2}^r \sqrt{r^2 - x^2} \cdot \sin \left( \omega t + \frac{x \cdot \sin(2\alpha)}{\lambda} \cdot 2\pi \right) dx \approx 2 \cdot \frac{J_1(\kappa(\alpha) \cdot (r - l/2))}{\kappa(\alpha) \cdot r}, \quad (2.2.13)$$

где  $J_1$  – функция Бесселя первого рода первого порядка [42],  $r$  – радиус пьезодиска,  $\kappa(\alpha) = \frac{2\pi f \cdot \sin(2\alpha)}{c}$  [43].

Таким образом, с учетом (2.2.12) функция преобразования датчика принимает вид:

$$U_{\text{пр}}(\alpha) = U_0 \cdot K_{\text{дат}} \cdot \frac{2J_1(\kappa(\alpha) \cdot (R - l/2))}{\kappa(\alpha) \cdot R}. \quad (2.2.14)$$

Полученное выражение для статической характеристики позволяет определить диапазон преобразований и чувствительность датчика на основе значений параметров его конструктивных элементов.

### 2.3 Исследование влияния конструктивных параметров на статическую характеристику датчика

Промышленностью, в том числе отечественной, выпускаются дисковые пьезоэлементы с различными соотношениями диаметра к толщине. При этом толщина пьезоэлемента существенно влияет на его резонансную частоту [44, 45]. Из выражения (2.2.14) следует, что на форму статической характеристики, т.е. диапазон преобразования датчика, в существенной мере влияет произведение частоты сигнала на радиус пьезодиска. Статические характеристики датчика с различными параметрами  $f$ ,  $r$  и  $R$  представлены на рисунках 2.3.1-2.3.4. На этих графиках указаны параметры конструктивных элементов датчика:  $D$  – диаметр акустической камеры датчика,  $d$  – диаметр пьезоэлементов,  $f$  – частота ультразвука,  $U_0$  – напряжение генератора, питающего пьезоизлучатель.

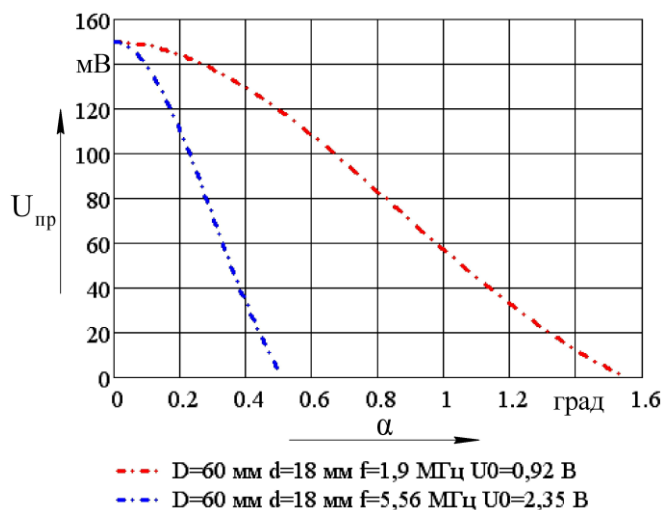


Рисунок 2.3.1 – Статические характеристики датчика с цилиндрической камерой диаметром 60 мм и пьезодисками диаметром 18 мм



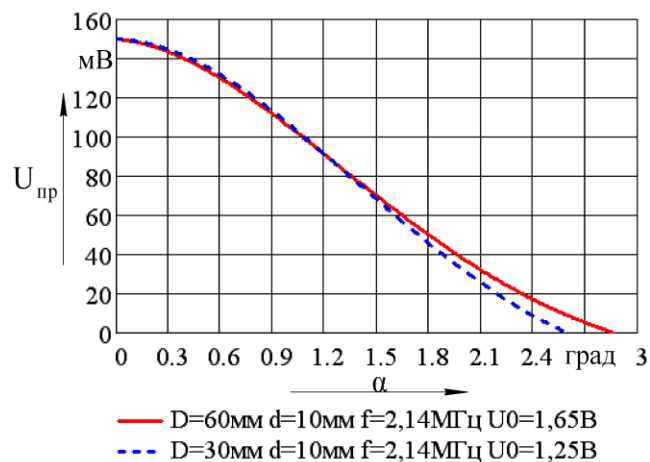


Рисунок 2.3.2 – Статические характеристики датчиков с различным размером камеры с пьезодисками диаметром 10 мм

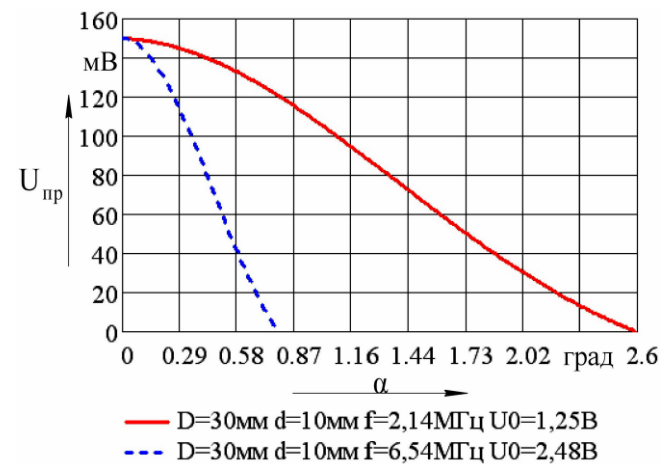


Рисунок 2.3.3 – Статические характеристики датчика с цилиндрической камерой диаметром 30 мм и пьезодисками диаметром 10 мм

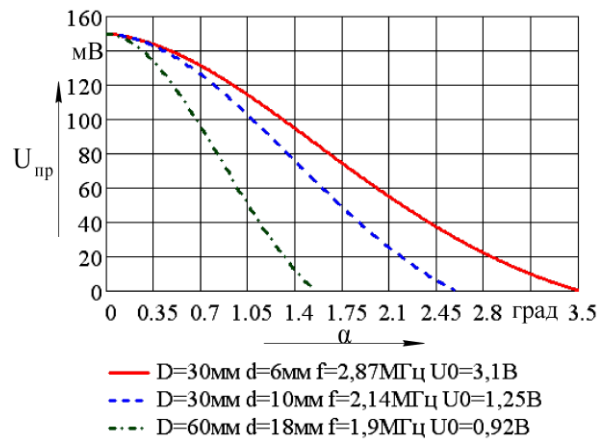


Рисунок 2.3.4 – Статические характеристики датчиков с различным размером камеры с пьезодисками, работающими на различных частотах

Таким образом, из вышеприведенных графиков функции преобразования датчика можно сделать выводы, что диапазон преобразований датчика определяется в основном геометрическими параметрами используемых в нем пьезоэлементов (рисунок 2.3.4) и их резонансной частотой (рисунки 2.3.1, 2.3.3) и в меньшей степени зависит от диаметра цилиндрической камеры датчика (рисунок 2.3.2). При этом, чем меньше диапазон преобразования датчика, тем большая чувствительность амплитуды выходного напряжения к измеряемому углу может быть достигнута (рисунки 2.3.1, 2.3.3, 2.3.4).

Выбирая пьезоэлементы с определенными геометрическими размерами и резонансной частотой можно достичь оптимального соотношения диапазона измерений и чувствительности датчика.

Также следует отметить, что варианты реализации датчика, представленные на рисунках 2.3.1 – 2.3.4 позволяют обеспечить требуемый диапазон измерений негоризонтальности на прямом участке пути  $1^\circ$ . Для использования датчика на поворотах, где негоризонтальность пути может достигать  $8^\circ$ , следует использовать пьезоэлементы диаметром 8 мм толщиной 2 мм, резонансная частота которых составляет 1,05 МГц. Пример характеристики датчика с такими пьезодисками представлен на рисунке 2.3.5.

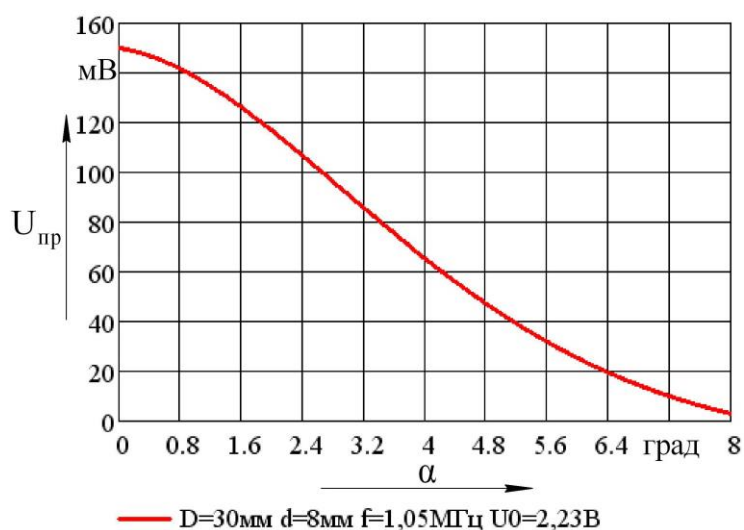


Рисунок 2.3.5 – Статические характеристики датчика с цилиндрической камерой диаметром 30 мм и пьезодисками диаметром 8 мм

Экспериментальные статические характеристики датчика при использовании фазового метода съема информации об угле наклона приведены на рисунке 2.3.6.

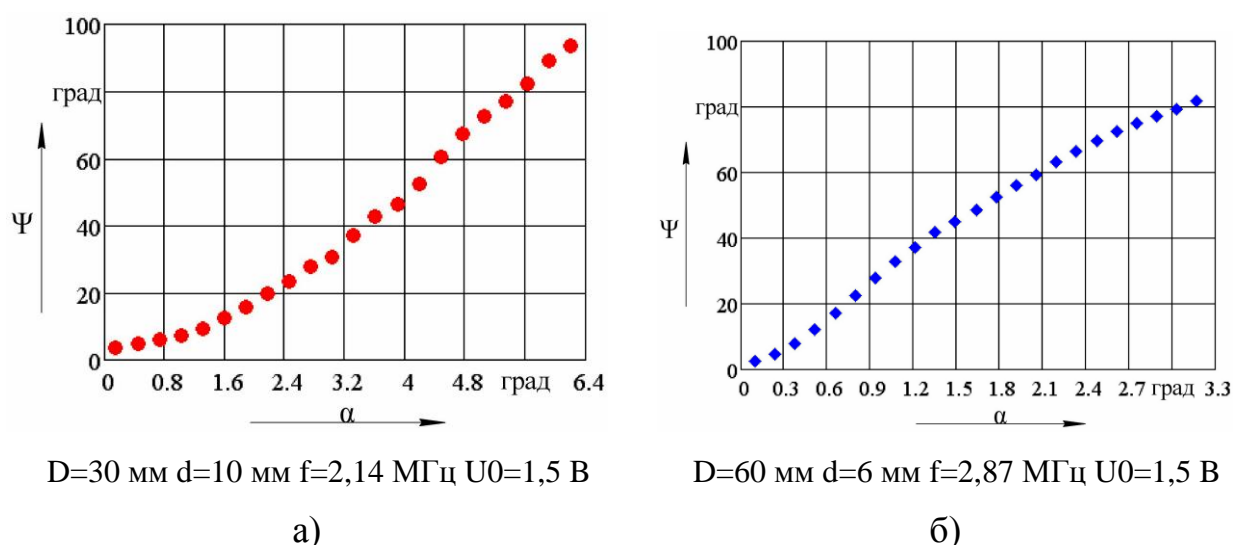


Рисунок 2.3.6 – Статические характеристики датчика при использовании фазового метода съема информации

Анализируя статические характеристики датчика с фазовым методом съема информации можно сделать вывод, что его функция преобразования также существенно зависит от геометрических размеров конструктивных элементов.

## 2.4 Выводы

1. Предложены принципиальные схемы датчика, реализующие акустический принцип измерения негоризонтальности железнодорожного пути при использовании маятникового механического элемента в качестве отражателя ультразвуковой волны.

2. Получена математическая модель, описывающая распространение ультразвуковых волн в полости датчика, обосновывающая возможность получения информации об угле негоризонтальности, являющаяся основой для статической характеристики датчика.

3. На основе полученной статической характеристики исследовано влияние размера акустической камеры, а также диаметра и резонансной частоты пьезодисков на форму статической характеристики датчика: сделаны

выводы о существенной зависимости диапазона преобразования от резонансной частоты и диаметра пьезодисков, а также о меньшей зависимости его от размера рабочей камеры датчика. Также сделан вывод о существенном увеличении чувствительности датчика с увеличением частоты ультразвука при одном и том же диаметре пьезодисков.

### **ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ПУТИ С МАЯТНИКОВЫМ МЕХАНИЧЕСКИМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ, ПОЛНОСТЬЮ ПОГРУЖЕННЫМ В ЖИДКОСТЬ**

#### **3.1 Разработка математической модели механической подсистемы датчика**

Как показано в предыдущей главе рассматриваемый датчик состоит из двух подсистем: механической подсистемы, которая осуществляет преобразование угла негоризонтальности в угловое рассогласование между корпусом и базовой плоскостью отсчета и акустической подсистемы, которая осуществляет преобразование угловых рассогласований между корпусом и маятником в изменение информативного параметра (амплитуды) выходного электрического сигнала пьезоприемника.

Для анализа динамических характеристик рассматриваемого датчика необходимо исследовать его подсистемы. Однако, учитывая, что динамические характеристики акустической подсистемы съема информации в основном определяются временем прохождения ультразвуковой волной расстояния от маятниковой пластины до пьезоприемника, которое для практически интересного варианта реализации рассматриваемого датчика не превышает значения  $4 \cdot 10^{-5}$  с, и учитывая, что частота угловых колебаний основания, на котором установлен датчик не превышает 1 Гц, можно сделать вывод, что динамические характеристики датчика определяются только характеристиками механической подсистемы.

Таким образом, задача исследования сводится к разработке и анализу модели движения маятникового чувствительного элемента датчика, установленного на основание, которое совершает угловые колебания и подвержено воздействию линейной вибрации.

Предположим, что неподвижная система координат  $O_0X_0Y_0$  ориентирована так, что начало отсчета (точка  $O_0$ ) находится в середине оси

колесной пары, ось  $O_0X_0$  направлена горизонтально, а ось  $O_0Y_0$  направлена по линии местной вертикали (рисунок 3.1.1).

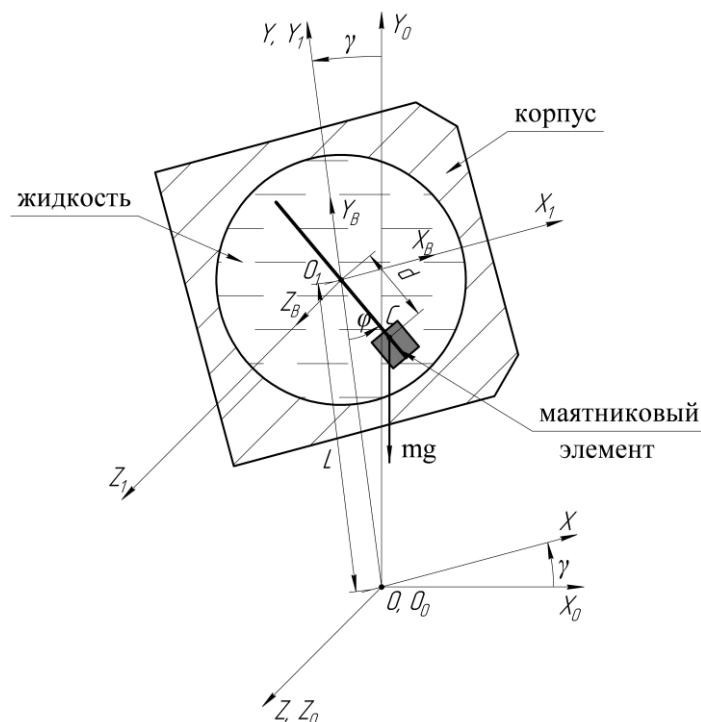


Рисунок 3.1.1 – Система координат, определяющая движение маятникового чувствительного элемента

Система координат  $OXY$  связана с основанием, на котором установлен датчик, положение которого относительно системы координат  $O_0X_0Y_0$  определяется углом  $\gamma$ . Система координат  $O_1X_1Y_1$  связана с корпусом датчика. Ее начало (точка  $O_1$ ) совпадает с геометрическим центром полости датчика. 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  $OY_1$ .

При построении математических моделей объектов, если они рассматриваются как системы с сосредоточенными параметрами, применяются уравнения Лагранжа второго рода [46]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3.1.1)$$

где  $E_k$  – кинетическая энергия системы;  $q_i$  – обобщенная координата;  $\dot{q}_i$  – обобщенная скорость;  $Q_i$  – обобщенная сила;  $n$  – число степеней свободы.

Воспользовавшись уравнением Лагранжа второго рода получим уравнение движения маятника:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_\varphi, \quad (3.1.2)$$

где  $T$  – кинетическая энергия маятникового элемента;  $Q_\varphi$  – обобщенная сила, имеющая размерность момента;  $\varphi$  – угловая координата, определяющая отклонение маятника от вертикали.

Обобщенная сила равна частной производной потенциальной энергии системы по соответствующей обобщенной координате, взятой с обратным знаком [1]:

$$Q_\varphi = - \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi}, \quad (3.1.3)$$

где  $\Pi$  – потенциальная энергия системы.

Рассматриваемая система обладает потенциальной энергией, равной:

$$\Pi = mgd \left[ \frac{L + R_k}{d} \cos \gamma - \cos(\varphi + \gamma) \right] + \Pi_{nd}, \quad (3.1.4)$$

где  $m$  – масса маятникового чувствительного элемента;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R_k$  – радиус колеса измерительной тележки, на которой установлен датчик;  $\Pi_{nd}$  – потенциальная энергия подвеса маятника, обусловленная силой упругости, возникающей при закручивании подвеса в виде торсиона.

Потенциальная энергия подвеса маятника, как следует из рисунка 1, определяется выражением:

$$\Pi_{n\partial} = \frac{1}{2} K \cdot (\varphi + \gamma)^2 = \frac{1}{2} K \cdot (\varphi^2 + 2 \cdot \varphi \cdot \gamma + \gamma^2), \quad (3.1.5)$$

где  $K$  – жесткость торсионного подвеса при закручивании.

Таким образом, из (3.1.3) с учетом (3.1.4) и (3.1.5) следует, что обобщенная сила равна:

$$Q_\varphi = -mgd \cdot \sin(\varphi + \gamma) - K \cdot \gamma - K \cdot \varphi. \quad (3.1.6)$$

Найдем кинетическую энергию системы. Для этого будем полагать, что масса маятника  $m$  сосредоточена в точке  $C$ . Координаты точки  $C$  в системе  $O_0X_0Y_0$  равны:

$$\begin{cases} x_0 = d \sin(\varphi + \gamma) - L \sin \gamma + x_B \cos \gamma - y_B \sin \gamma; \\ y_0 = L \cos \gamma - d \cos(\varphi + \gamma) + x_B \sin \gamma + y_B \cos \gamma. \end{cases} \quad (3.1.7)$$

Тогда проекции линейной скорости точки  $C$  соответственно равны:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = d(\dot{\varphi} + \dot{\gamma}) \cos(\varphi + \gamma) - L\dot{\gamma} \cos \gamma + \dot{x}_B \cos \gamma - \\ - x_B \dot{\gamma} \sin \gamma - \dot{y}_B \sin \gamma - y_B \dot{\gamma} \cos \gamma; \\ \dot{y}_0 = -L\dot{\gamma} \sin \gamma + d(\dot{\varphi} + \dot{\gamma}) \sin(\varphi + \gamma) + \dot{x}_B \sin \gamma + \\ + x_B \dot{\gamma} \cos \gamma + \dot{y}_B \cos \gamma - y_B \dot{\gamma} \sin \gamma. \end{cases} \quad (3.1.8)$$

Кинетическая энергия маятниковой пластины может быть определена по формуле [47]:

$$T_M = \frac{1}{2} m (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2). \quad (3.1.9)$$

Полная кинетическая энергия маятникового элемента  $T$  кроме кинетической энергии маятника включает также кинетическую энергию присоединенной жидкости, которая движется вместе с маятниковым механическим чувствительным элементом как единое целое:

$$T = T_M + T_{\text{ж}}, \quad (3.1.10)$$

где  $T_{\text{ж}}$  – кинетическая энергия присоединенной жидкости.

Присоединенную жидкость будем рассматривать как некоторое твердое тело, обладающее массой и коэффициентом вязкого трения об остальную жидкость, заполняющую камеру датчика. Кинетическая энергия этой жидкости равна:



$$T_{\text{ж}} = \frac{J \cdot \dot{\phi}^2}{2}, \quad (3.1.11)$$

где  $J$  – присоединенный момент инерции жидкости.

Таким образом, в соответствии (3.1.10), а также с учетом (3.1.8) и (3.1.11) находим выражение для кинетической энергии механической подсистемы датчика:

$$T = 0,5m \left\{ d^2 (\dot{\phi} + \dot{\gamma})^2 + L\dot{\gamma}^2 + \dot{x}_B^2 + \dot{y}_B^2 + x_B^2 \dot{\gamma}^2 + y_B^2 \dot{\gamma}^2 + 2[x_B \dot{y}_B \dot{\gamma} - \dot{x}_B y_B \dot{\gamma} - Ld\dot{\gamma}(\dot{\phi} + \dot{\gamma})\cos\varphi + d\dot{x}_B(\dot{\phi} + \dot{\gamma})\cos\varphi - L\dot{x}_B \dot{\gamma} + Ly_B \dot{\gamma}^2 + d\dot{x}_B \dot{\gamma}(\dot{\phi} + \dot{\gamma})\sin\varphi + d\dot{y}_B(\dot{\phi} + \dot{\gamma})\sin\varphi - dy_B \dot{\gamma}(\dot{\phi} + \dot{\gamma})\cos\varphi] \right\} + \frac{J\dot{\phi}^2}{2}. \quad (3.1.12)$$

Найдем производные от кинетической энергии (3.1.12) в соответствии с (3.1.2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} &= md \left\{ d(\dot{\phi} + \dot{\gamma}) + [\dot{x}_B - \dot{\gamma}(L + y_B)] \cos\varphi + (x_B \dot{\gamma} + \dot{y}_B) \sin\varphi \right\} + J\dot{\phi}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} &= md \left\{ d(\ddot{\phi} + \ddot{\gamma}) - [(L + y_B)\ddot{\gamma} - \ddot{x}_B - (x_B \dot{\gamma} + \dot{y}_B)\dot{\phi} + \dot{y}_B \dot{\gamma}] \cos\varphi + \right. \\ &\quad \left. + [(L + y_B)\dot{\gamma}\dot{\phi} + \ddot{y}_B + x_B \ddot{\gamma} + (\dot{\gamma} - \dot{\phi})\dot{x}_B] \sin\varphi \right\} + J\ddot{\phi}; \\ \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= md(\dot{\phi} + \dot{\gamma}) \left\{ [(L + y_B)\dot{\gamma} - \dot{x}_B] \sin\varphi + (x_B \dot{\gamma} + \dot{y}_B) \cos\varphi \right\}. \end{aligned}$$

Обобщенная сила, обусловленная силами вязкого трения маятникового элемента о демпфирующую жидкость, заполняющую цилиндрическую камеру датчика определяется выражением:

$$Q = -b\dot{\phi}, \quad (3.1.13)$$

где  $b$  – абсолютный коэффициент демпфирования маятника.

Пользуясь полученными значениями производных от кинетической энергии маятникового элемента, а также выражениями (3.1.2), (3.1.6) и (3.1.12) находим уравнение движения маятника в виде:

$$\begin{aligned} (md^2 + J)\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + md \left( g \cos\gamma - L\dot{\gamma}^2 + \ddot{y}_B + x_B \ddot{\gamma} + 2\dot{x}_B \dot{\gamma} - \right. \\ \left. - y_B \dot{\gamma}^2 \right) \sin\varphi + md \left( g \sin\gamma - L\ddot{\gamma} + \ddot{x}_B - y_B \ddot{\gamma} - 2\dot{y}_B \dot{\gamma} - x_B \dot{\gamma}^2 \right) \cos\varphi + \\ + md^2 \ddot{\gamma} = -K\phi - K\gamma \end{aligned} \quad (3.1.14)$$

В реальности углы  $\varphi$  и  $\gamma$  малые, поэтому справедливы допущения  $\sin \varphi \approx \varphi$ ,  $\sin \gamma \approx \gamma$ ,  $\cos \varphi \approx 1$  и  $\cos \gamma \approx 1$ . Тогда из (3.1.14) следует:

$$\begin{aligned} & \left( md^2 + J \right) \ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + md \left( g - L\dot{\gamma}^2 + \ddot{y}_B + x_B \ddot{\gamma} + 2\dot{x}_B \dot{\gamma} - \right. \\ & \left. - y_B \dot{\gamma}^2 \right) \varphi + K\varphi = md \left( (L-d)\ddot{\gamma} - g\gamma - \ddot{x}_B + y_B \ddot{\gamma} + 2\dot{y}_B \dot{\gamma} + x_B \dot{\gamma}^2 \right) - K\gamma. \end{aligned} \quad (3.1.15)$$

Возможны два частных случая:

а) вибрация оси подвеса маятника отсутствует ( $x_B = y_B = 0$ ,  $\gamma \neq 0$ ):

$$\left( md^2 + J \right) \ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + md \left( g - L\dot{\gamma}^2 \right) \varphi + K\varphi = md \left( (L-d)\ddot{\gamma} - g\gamma \right) - K\gamma; \quad (3.1.16)$$

б) имеет место только вибрация оси подвеса маятника ( $x_B \neq 0$ ,  $y_B \neq 0$ ,  $\gamma = 0$ ):

$$\left( md^2 + J \right) \ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + mgd\varphi + K\varphi = -md \left( \ddot{x}_B + \ddot{y}_B \varphi \right). \quad (3.1.17)$$

Таким образом, полученное уравнение (3.1.15) является обобщенной математической моделью движения маятникового чувствительного элемента в рассматриваемом датчике, который установлен на основании, совершающем угловые колебания в условиях вибрации. Уравнения (3.1.16) и (3.1.17) позволяют отдельно исследовать динамику маятника под воздействием угловых колебаний основания и под воздействием вибрации соответственно.

### **3.2 Определение параметров жидкости, присоединенной к механическому маятнику**

Отличительной особенностью исследуемого датчика является полное погружение его маятникового элемента, выполненного в виде плоской пластины со смещенным относительно оси подвеса центром масс, в однородную жидкость, полностью заполняющую цилиндрическую камеру, в которой установлен этот элемент. Это приводит к тому, что вместе с механическим маятником как единое целое с ним движется также некоторый объем жидкости, который характеризуется следующими параметрами:

упоминавшимся в предыдущем разделе присоединенным моментом инерции жидкости  $J$  и силой вязкого трения по контуру присоединенного объема жидкости, которая определяет значение ранее введенного абсолютного коэффициента демпфирования  $b$ . Как следует из уравнения (3.1.15) эти параметры непосредственно определяют динамические характеристики датчика и необходимо знать их реальные значения.

В ряде литературных источников [48 – 51] показано, что эти параметры зависят от многих факторов, таких как геометрические размеры маятниковой пластины, плотности, вязкости окружающей маятник жидкость, размера окружающей маятник камеры, амплитуды и частоты колебаний пластины. Таким образом, задача теоретического определения этих параметров является весьма сложной. Однако эти параметры могут быть получены экспериментально для конкретных геометрических параметров датчика и жидкости, заполняющей его камеру.

Для этого предположим, что маятниковая пластина датчика выведена из положения равновесия и отпущена, т.е. совершает собственные свободные колебания в камере, соответствующей геометрическим размерам камеры датчика, заполненной необходимой жидкостью. В этом случае свободные колебания маятниковой пластины описываются уравнением [52, 53]:

$$I \cdot \ddot{\varphi} + b \cdot \dot{\varphi} + K \cdot \varphi = 0, \quad (3.2.1)$$

где  $I$  – момент инерции маятникового элемента;  $b$  – коэффициент демпфирования;  $K$  – коэффициент жесткости.

С учетом ранее принятых обозначений получим уравнение колебаний рассматриваемой пластины:

$$(md^2 + J)\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + (mgd + K)\varphi = 0. \quad (3.2.2)$$

Введем следующие обозначения:

относительный коэффициент демпфирования [52]:  $D = \frac{1}{2} \frac{b}{(md^2 + J)\omega_0}$ ;

собственная частота недемпфированных колебаний пластины в вакууме

$$\text{(близка к частоте в воздухе): } \omega_0^V = \sqrt{\frac{mgd + K}{md^2}};$$

собственная частота недемпфированных колебаний пластины в жидкости:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mgd + K}{md^2 + J}};$$

постоянная времени недемпфированных колебаний пластины в жидкости:

$$T = \frac{1}{\omega_0};$$

собственная частота демпфированных колебаний пластины в жидкости [53]:

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - D^2}.$$

Тогда решением уравнения (3.2.2) является функция [54, 55]:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cdot e^{-D \frac{t}{T}} \cos(\omega_d t), \quad (3.2.3)$$

где  $\varphi_0$  – начальное отклонение маятниковой пластины от положения равновесия.

Пример графика свободных колебаний пластины представлен на рисунке 3.2.1.

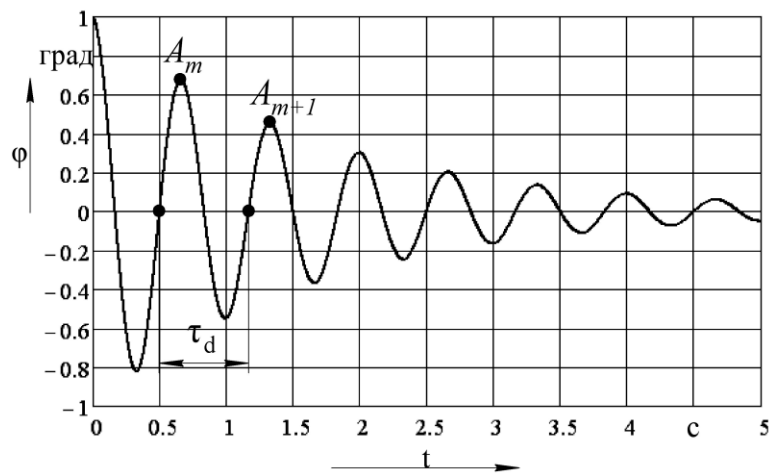


Рисунок 3.2.1 – Свободные колебания маятниковой пластины

Как следует из рисунка 3.2.1 исходными данными, получаемыми прямо из анализа графика свободных колебаний пластины являются: период

$\tau_d$  и частота  $\omega_d = 2\pi \frac{1}{\tau_d}$  собственных демпфированных колебаний пластины

и значения двух соседних максимумов  $A_m$  и  $A_{m+1}$ . Для нахождения собственной частоты недемпфированных колебаний пластины  $\omega_0$  и зависящих от нее искомым параметров  $J$  и  $b$  присоединенной жидкости необходимо знать относительный коэффициент демпфирования  $D$ .

Пусть в некоторый момент времени  $\tau_0$  на определенном отрезке времени измерений отклонение пластины от положения равновесия достигает наибольшего положительного значения

$A_m = \varphi_0 \cdot e^{-D \frac{\tau_0}{T}} = \varphi_0 \cdot e^{-D \omega_d \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\xi^2}}}$ , т.е.  $\cos(\omega_d t) = 1$ . Через время, равное периоду собственных демпфированных колебаний пластины отклонение от положения равновесия составит:

$$A_{m+1} = \varphi_0 \cdot e^{-D \frac{\tau_0 + \tau_d}{T}} = \varphi_0 \cdot e^{-D \omega_d \frac{\tau_0 + \tau_d}{\sqrt{1-D^2}}}. \quad (3.2.4)$$

Взяв отношение указанных максимумов, получим уравнение относительно  $\xi$ :

$$\frac{A_m}{A_{m+1}} = e^{D \omega_d \frac{\tau_d}{\sqrt{1-D^2}}} = e^{D \frac{2\pi}{\sqrt{1-D^2}}}, \quad (3.2.5)$$

которое может быть преобразовано к виду:

$$\ln \left( \frac{A_m}{A_{m+1}} \right) = 2\pi \cdot \frac{D}{\sqrt{1-D^2}}. \quad (3.2.6)$$

При известных  $D$  и  $\omega_d$  собственная частота недемпфированных колебаний пластины в жидкости может быть найдена из выражения:

$$\omega_0 = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-D^2}}. \quad (3.2.7)$$

Присоединенный момент инерции жидкости  $J$  может быть определен из соотношения частот недемпфированных колебаний пластины в воздухе и жидкости:

$$\left( \frac{\omega_0^V}{\omega_0} \right)^2 = \left( \frac{mdg + K}{md^2} \right) \cdot \left( \frac{mdg + K}{md^2 + J} \right)^{-1} = \frac{md^2 + J}{md^2} = 1 + \frac{J}{md^2}. \quad (3.2.8)$$

Из (3.2.8) следует выражение для присоединенного момента инерции жидкости:

$$J = md^2 \left[ \left( \frac{\omega_0^V}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right]. \quad (3.2.9)$$

Теперь может быть найден коэффициент абсолютного демпфирования  $b$  маятниковой пластины в жидкости:

$$b = 2 \frac{D}{\sqrt{1-D^2}} (md^2 + J) \omega_d. \quad (3.2.10)$$

Таким образом, из (3.2.10) следует, что параметры присоединенной жидкости, а именно присоединенный момент инерции и коэффициент демпфирования, являются взаимосвязанными и могут быть найдены косвенным образом на основе данных, полученных на основе измерений параметров процесса затухания собственных колебаний маятниковой пластины, помещенной в камеру с жидкостью, по параметрам идентичную камере датчика.

В приложении В приведены значения параметров  $J$  и  $b$  присоединенной жидкости для пластины, которая использовалась в опытном образце датчика.

### 3.3 Анализ динамических характеристик датчика

Проанализируем динамические характеристики, отражающие качество преобразования датчиком угловых колебаний основания – в нашем случае колебаний измерительной тележки или рабочего органа машины, т.е. полезного возмущения в отсутствии вибрации. Учитывая, что колебания совершаются по гармоническому закону, такими характеристиками являются амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики.

Будем полагать, что основание, на котором установлен датчик, совершает гармонические колебания:

$$\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t), \quad (3.3.1)$$

где  $\gamma_0$  – амплитуда колебаний основания;  $\omega$  – частота колебаний основания.

Вычислим производные от функции (3.3.1), входящие в уравнение (3.1.16):

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = \gamma_0 \omega \cos(\omega t), \\ \ddot{\gamma} = -\gamma_0 \omega^2 \sin(\omega t). \end{cases} \quad (3.3.2)$$

Подставим функции (3.3.1) и (3.3.2) в уравнение (3.1.16) и разделим обе его части на множитель  $(md^2 + J)$ , в результате получим:

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} + 2D\omega_0\dot{\phi} + \omega_0^2 \left( 1 - \frac{mdL}{md^2 + J} \gamma_0^2 \eta^2 \cos^2 \omega t \right) \phi = -\omega_0^2 \gamma_0 \sin \omega t - \\ - \omega_0^2 \frac{md(L-d)}{md^2 + J} \gamma_0 \eta^2 \sin \omega t, \end{aligned} \quad (3.3.3)$$

где  $\omega_0 = \sqrt{\frac{mdg + K}{md^2 + J}}$  – собственная частота недемпфированных колебаний

маятника в жидкости;  $D = \frac{b}{2(md^2 + J)\omega_0}$  – относительный коэффициент

демпфирования;  $\eta = \omega/\omega_0$  – относительная безразмерная частота.

В уравнении (3.3.3) представим  $\cos^2 \omega t = (1 + \cos 2\omega t)/2$ . Пренебрегая составляющей на двойной частоте, в результате получим уравнение:

$$\ddot{\phi} + 2D\omega_0\dot{\phi} + \omega_0^2 \left[ 1 - \frac{mdL}{2(md^2 + J)} \gamma_0^2 \eta^2 \right] \phi = -\omega_0^2 \gamma_0 \left[ 1 + \frac{md(L-d)}{md^2 + J} \eta^2 \right] \sin \omega t. \quad (3.3.4)$$

Введем «безразмерное время»  $\tau = \omega_0 \cdot t$  и вычислим производные:

$$\begin{cases} \dot{\phi} = \omega_0 \phi', \\ \ddot{\phi} = \omega_0^2 \phi'', \end{cases} \quad (3.3.5)$$

где  $\phi'$  и  $\phi''$  – первая и вторая производные по «безразмерному времени».

В результате уравнение (3.3.4) может быть преобразовано к виду:

$$\phi'' + 2D\phi' + E_1\phi = -\gamma_0 E_2 \sin \eta \tau, \quad (3.3.6)$$

где  $E_1 = 1 - \frac{mdL}{2(md^2 + J)} \gamma_0^2 \eta^2$ ,  $E_2 = 1 + \frac{md(L-d)}{md^2 + J} \eta^2$ .

Будем полагать, что в соответствии с видом правой части уравнения (3.3.6) вынужденное движение маятника в установившемся режиме определяется зависимостью:

$$\varphi = -\gamma_0 V \sin(\eta\tau - \Phi), \quad (3.3.7)$$

где  $V$  – коэффициент динамичности, определяющий во сколько раз амплитуда колебаний маятникового элемента отличается от амплитуды  $\gamma_0$  колебаний основания, на котором установлен датчик;  $\Phi$  – запаздывание по фазе колебаний маятника относительно колебаний основания.

Вычислим производные  $\varphi' = -\gamma_0 V \eta \cos(\eta\tau - \Phi),$

$\varphi'' = \gamma_0 V \eta^2 \sin(\eta\tau - \Phi)$  и подставим их вместе с (3.3.7) в уравнение (3.3.6).

После необходимых преобразований получим:

$$\begin{aligned} & \left[ -V(E_1 - \eta^2) \cos \Phi - 2DV\eta \sin \Phi + E_2 \right] \sin \eta\tau + \\ & + \left[ V(E_1 - \eta^2) \sin \Phi - 2DV\eta \cos \Phi \right] \cos \eta\tau = 0. \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

Полученное равенство возможно только в случае, если сомножители при функциях  $\sin \eta\tau$  и  $\cos \eta\tau$  одновременно равны нулю, т.е.

$$\begin{cases} -V(E_1 - \eta^2) \cos \Phi - 2DV\eta \sin \Phi + E_2 = 0, \\ V(E_1 - \eta^2) \sin \Phi - 2DV\eta \cos \Phi = 0. \end{cases} \quad (3.3.9)$$

Из равенств (3.3.9) получим:

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{2D\eta}{E_1 - \eta^2}, \quad (3.3.10)$$

$$V = \frac{E_2}{(E_1 - \eta^2) \cos \Phi + 2D\eta \sin \Phi}. \quad (3.3.11)$$

Найдем выражения для  $\cos \Phi$  и  $\sin \Phi$ :

$$\begin{cases} \cos \Phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \Phi}} = \frac{E_1 - \eta^2}{\sqrt{(E_1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}}, \\ \sin \Phi = \operatorname{tg} \Phi \cdot \cos \Phi = \frac{2D\eta}{\sqrt{(E_1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}}. \end{cases} \quad (3.3.12)$$



После подстановки выражений (3.3.12) в формулу для коэффициента динамичности (3.3.11), находим:

$$V = \frac{E_2}{\frac{(E_1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}{\sqrt{(E_1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}}} = \frac{E_2}{\sqrt{(E_1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}}. \quad (3.3.13)$$

Подставляя в (3.3.13) и (3.3.10) выражения для  $E_1$  и  $E_2$ , после преобразований получаем выражения для коэффициента динамичности (АЧХ) и фазового запаздывания (ФЧХ) датчика в виде [56]:

$$V = \frac{1 + \frac{md(L-d)}{md^2 + J}\eta^2}{\sqrt{\left[1 - \eta^2 \left(1 + \frac{mdL}{2(md^2 + J)}\gamma_0^2\right)\right]^2 + 4D^2\eta^2}}, \quad (3.3.14)$$

$$\Phi = -\arctg \left( \frac{2D\eta}{1 - \eta^2 \left[1 + \frac{mdL}{2(md^2 + J)}\gamma_0^2\right]} \right). \quad (3.3.15)$$

В случае, когда геометрические параметры маятникового элемента таковы, что значением  $J$  по сравнению с величиной  $md^2$  можно пренебречь, из (3.3.14) и (3.3.15) следуют хорошо известные [1] выражения для коэффициента динамичности и фазового запаздывания:

$$V = \frac{1 + \left(\frac{L}{d} - 1\right)\eta^2}{\sqrt{\left[1 - \eta^2 \left(1 + \frac{L}{2d}\gamma_0^2\right)\right]^2 + 4D^2\eta^2}}, \quad (3.3.16)$$

$$\Phi = -\arctg \left( \frac{2D\eta}{1 - \eta^2 \left[1 + \frac{L}{2d}\gamma_0^2\right]} \right). \quad (3.3.17)$$

Графики зависимости коэффициента динамичности (3.3.14) и фазового запаздывания (3.1.15) датчика с цилиндрической камерой диаметром 30 мм, маятниковой пластиной размером 23x40x0,7 мм с грузом массой  $m=14$  г и  $d=8$  мм от частоты угловых колебаний основания  $f$  для различных жидкостей, заполняющих камеру, представлены на рисунках 3.3.1 и 3.3.2 соответственно.

Отметим, что влияние отношения  $L/d$  на фазовое запаздывание колебаний маятника по отношению к колебаниям основания для углов  $\gamma_0 \leq 10^\circ$  мало. Коэффициент динамичности, напротив, существенно зависит как от отношения частот  $\eta$ , так и от соотношения  $L/d$ .

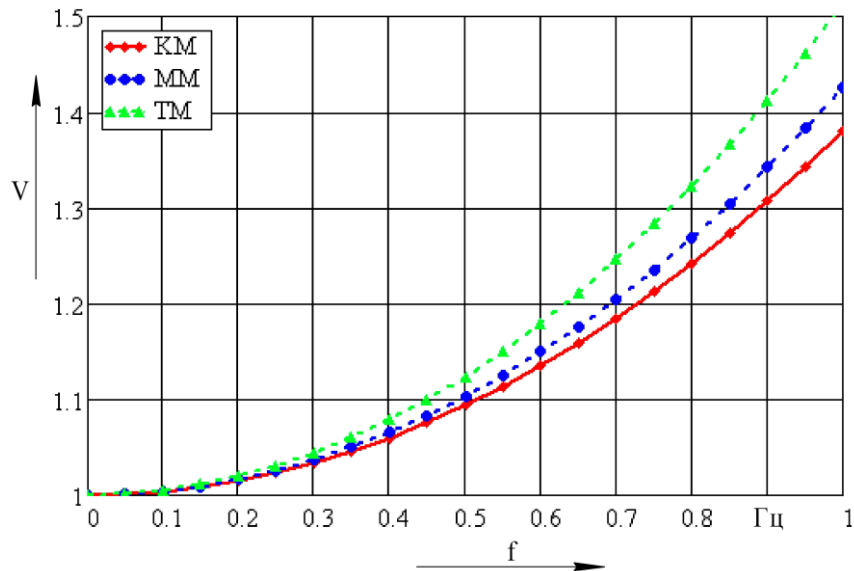


Рисунок 3.3.1 – Зависимость коэффициента динамичности датчика от частоты колебаний основания для различных жидкостей, заполняющих камеру датчика: КМ – касторовое масло; ММ – моторное масло SAE 20W-50; ТМ – трансформаторное масло

Характеристики (3.3.1) и (3.3.2) относятся к режиму работы датчика при  $L=12,5$  см, т.е.  $L/d=15,6$ . Также из них следует, что наименьшая динамическая погрешность датчика по амплитуде наблюдается для случая заполнения его камеры более вязким касторовым маслом при сравнительно небольшом фазовом запаздывании (не более  $15^\circ$  на частоте 1 Гц). Как отмечено ранее, коэффициент динамичности в значительной мере зависит от

соотношения  $L/d$ . Частотные характеристики для некоторых других вариантов установки датчика, для случая заполнения его камеры касторовым маслом, относительно оси колебаний основания представлены на рисунках 3.3.3 и 3.3.4.

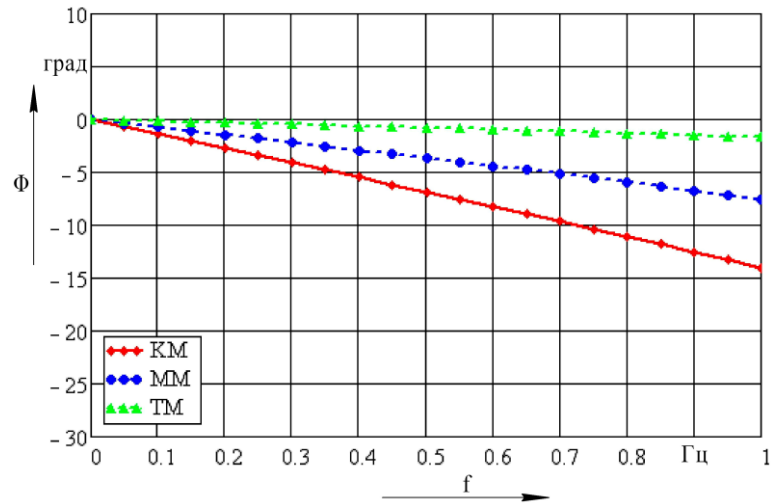


Рисунок 3.3.2 – Зависимость фазового запаздывания датчика от частоты колебаний основания

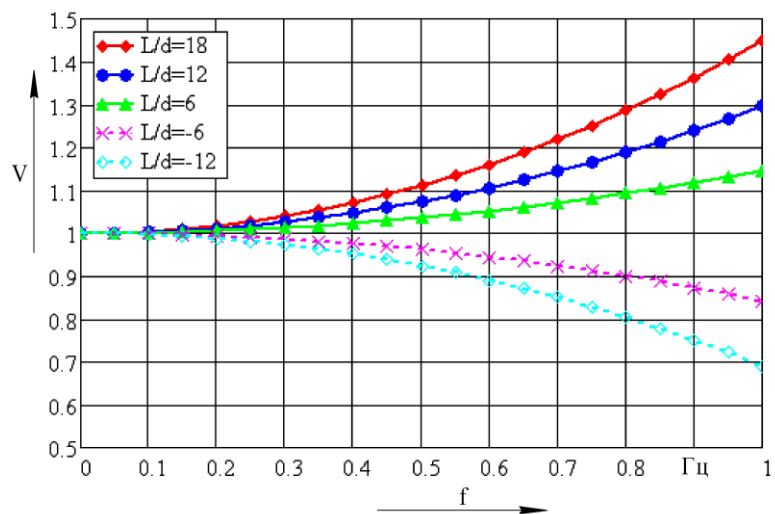


Рисунок 3.3.3 – Зависимость коэффициента динамичности датчика от частоты колебаний основания для различных высот его установки

Анализируя зависимости, представленные на рисунках 3.3.3 и 3.3.4, можно сделать вывод, что, варьируя значение соотношения  $L/d$ , можно добиться существенного уменьшения динамической погрешности датчика по амплитуде, а фазовое запаздывание при этом практически не изменится.

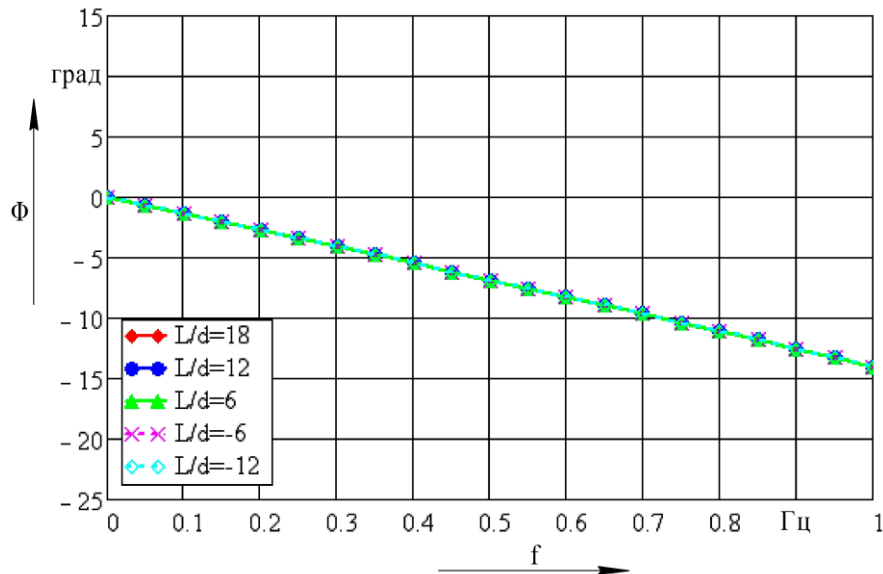


Рисунок 3.3.4 – Зависимость фазового запаздывания датчика от частоты колебаний основания для различных высот его установки

При отрицательных значениях соотношения  $L/d$ , т.е. в случаях, когда ось подвеса маятника датчика располагается ниже оси угловых колебаний основания, вид зависимости для коэффициента динамичности является нисходящей, а, следовательно, маятник датчика стремится к успокоению с ростом частоты вынуждающего воздействия. При положительных значениях соотношения  $L/d$ , соответствующих восходящей зависимости коэффициента динамичности от частоты, маятник датчика с ростом частоты, напротив, стремится войти в резонанс с собственной частотой, характеризующийся существенным увеличением амплитуды колебаний маятника, что может привести к появлению режима автоколебаний в контуре управления органами путевой машины, в котором установлен рассматриваемый датчик. Также возможно получение нисходящей зависимости коэффициента динамичности от частоты при положительных значениях соотношения  $L/d$  с использованием корректирующего фильтра (Приложение Г).

### 3.4 Влияние вибрации на датчик и уменьшение ее воздействия

Пусть датчик установлен на подвижном основании, совершающем угловые колебания по гармоническому закону в условиях «косой» вибрации, т.е. выполняются условия:

$$\begin{cases} \gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t), \\ x_B = A_X \sin(Ft), \\ y_B = A_Y \sin(Ft), \end{cases} \quad (3.4.1)$$

где  $\omega$  – частота угловых колебаний;  $F$  – частота вибрации;  $A_X$  – амплитуда виброперемещения вдоль оси  $OX$ ;  $A_Y$  – амплитуда виброперемещения вдоль оси  $OY$ .

После нахождения выражений для виброускорений  $\ddot{x}_B = -A_X \cdot F^2 \cdot \cos(Ft)$ ,  $\ddot{y}_B = -A_Y \cdot F^2 \cdot \cos(Ft)$  и подстановки их в уравнение (3.1.17) получим:

$$(md^2 + J)\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + mgd\varphi + K\varphi = AmdF^2 \cos(Ft) \sin(\varphi + \varepsilon), \quad (3.4.2)$$

где  $A = \sqrt{A_X^2 + A_Y^2}$  – модуль «косой» вибрации;  $\varepsilon = \arctg(A_X/A_Y)$  – угол, определяющий направление «косой» вибрации.

Результаты численного интегрирования уравнения (3.4.2) для случая воздействия на датчик только «косой» вибрации с параметрами  $A_X = A_Y = 0,3$  мм и угловой частотой  $F = 2\pi \cdot 33 \approx 207$  рад/с и перегрузкой  $(\sqrt{A_X^2 + A_Y^2} \cdot F^2) / g \approx 1,9$  при отсутствии угловых колебаний основания  $\gamma = 0^\circ$  представлены на рисунке 3.4.1.

Результаты численного интегрирования уравнения (3.4.2) показали, что при воздействии на датчик двухкомпонентной («косой») вибрации приводит к появлению вибрационного сдвига нуля (в нашем случае  $\Delta\varphi = -0,7^\circ$ ), относительно которого происходят колебания маятника на частоте вибрации. Данные результаты согласуются с результатами аналитических исследований, приведенных в работе [1].

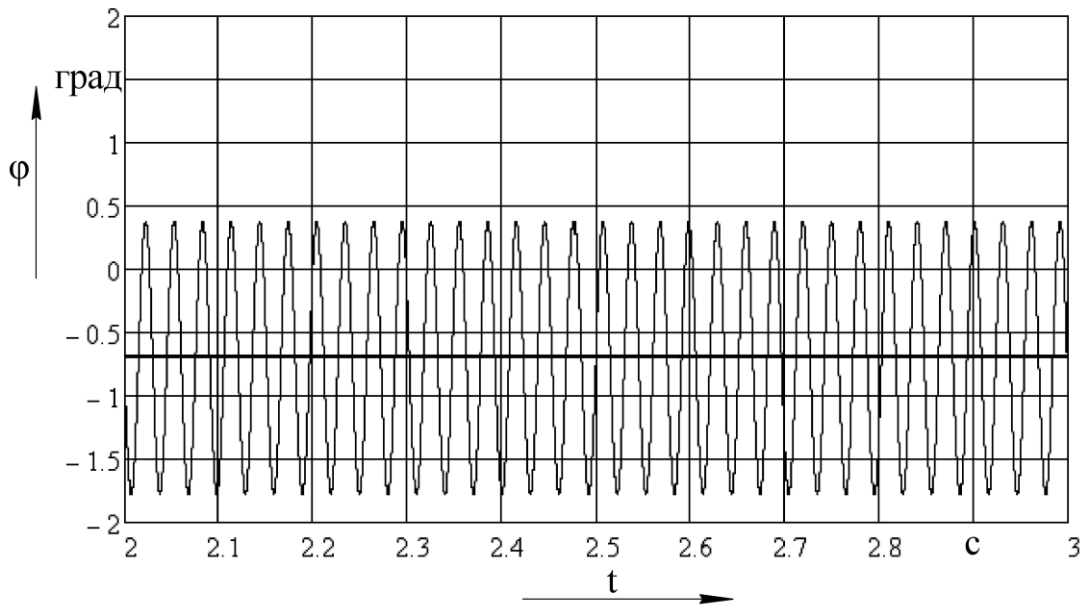


Рисунок 3.4.1 – Результат воздействия на датчик «косой» вибрации

Обобщенное уравнение (3.1.15) вынужденного движения маятника под воздействием колебаний основания и вибраций является громоздким, поэтому для его интегрирования воспользуемся численными методами [57]. Результаты численного интегрирования обобщенного уравнения (3.1.15) при тех же параметрах вибрации, но при угловых колебаниях основания с амплитудой  $\gamma_0 = 1^\circ$  и угловой частотой  $\omega = 2\pi \cdot 0,5 \approx 3,14$  рад/с представлены на рисунке 3.4.2.

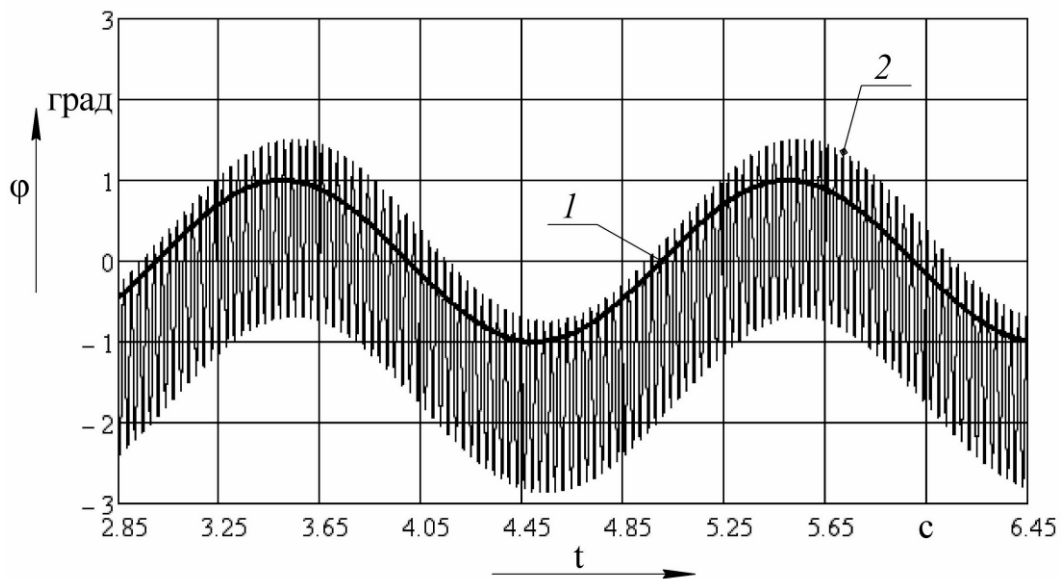


Рисунок 3.4.2 – Результат воздействия на датчик угловых колебаний основания в условиях вибрации: 1 – угловое возмущение основания; 2 – движение маятникового элемента

Результаты интегрирования показывают, что маятник датчика обрабатывает угловые колебания основания, однако при этом его движение зашумлено воздействием вибрации и положение равновесия смещено на величину вибрационного сдвига нуля. Таким образом, наличие вибрации приводит к существенной погрешности измерения негоризонтальности пути и следует обеспечить контроль вибрационных возмущений в месте установки датчика. Также следует принять меры по снижению погрешности вследствие вибрации.

Учитывая, что воздействие вибрации происходит с большей частотой, чем измеряемые угловые колебания, то возможно устранение шума вследствие вибрации с помощью электронного фильтра нижних частот. Однако его применение не устранит вибрационного сдвига нуля. Для его минимизации необходимо применение виброизоляции. Основную роль в виброизоляции играют амортизаторы, характеристики которых необходимо выбирать в соответствии с требованиями, необходимыми для фильтрации возмущений, действующих на средства измерений [58]. Анализ существующих виброизоляторов [59 – 61] показал, что по коэффициенту эффективности наиболее подходят резинометаллические амортизаторы типа Flanged Instru-Mountings™ фирмы TRELLEBORG [62]. Указанные амортизаторы предназначены для защиты чувствительного оборудования сравнительно небольшой массы (от 1 до 5,5 кг), к которому относится исследуемый датчик, от вибрационных и ударных нагрузок. На частоте 33 Гц коэффициент виброизоляции таких амортизаторов равен 0,15, на частоте 40 Гц – 0,1 и при дальнейшем увеличении частоты их эффективность увеличивается.

Результаты численного интегрирования обобщенного уравнения движения маятника (3.1.15) при воздействии на него угловых колебаний основания и вибрации с описанными выше параметрами при наличии амортизаторов приведены на рисунке 3.4.3.

Анализ результатов интегрирования показывает, что вибрационный сдвиг нуля существенно устраняется (становится равным  $\Delta\varphi = 0,01^\circ$  для

нашего случая, что ниже допустимой погрешности измерения угла негоризонтальности пути  $\Delta\varphi_{\max} = 0,02^\circ$ ), но остается зашумленность движения маятника, влияние которой необходимо минимизировать путем включения фильтра нижних частот в схему обработки сигнала с датчика.

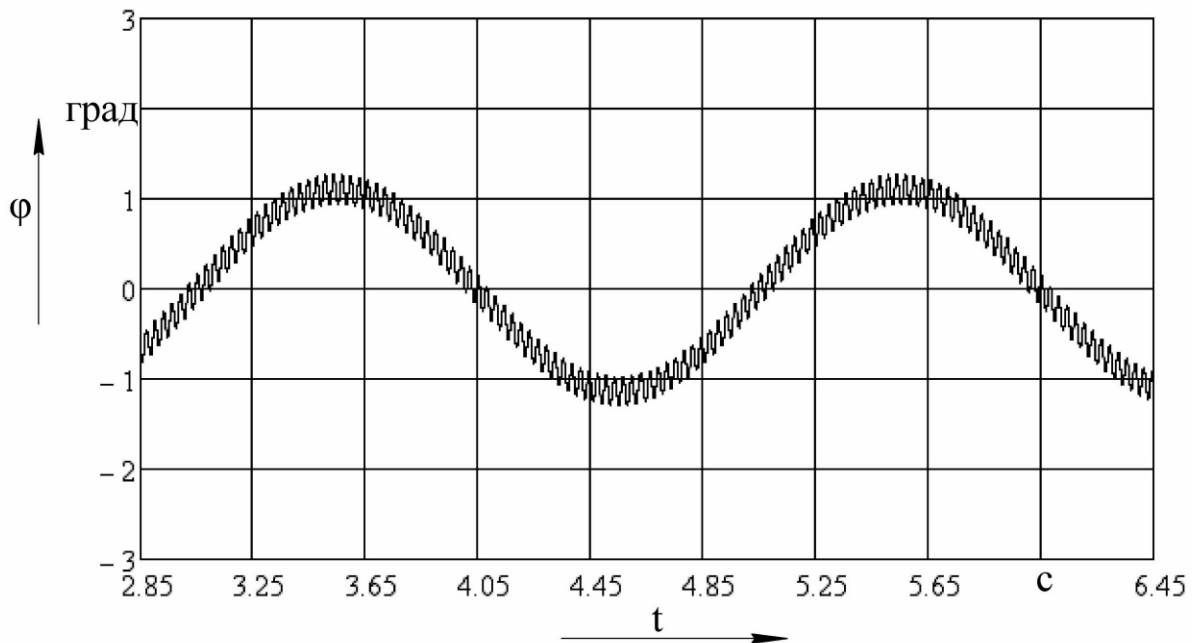


Рисунок 3.4.3 – Результат воздействия на датчик угловых колебаний основания в условиях вибрации при наличии амортизаторов

Фильтр нижних частот для обработки сигнала с датчика должен отвечать следующим требованиям:

- а) вносить минимальные амплитудные и фазовые искажения в рабочей полосе частот (от 0 до 1 Гц);
- б) хорошо подавлять сигнал, обусловленный вибрацией;
- в) характеризоваться малым временем установления переходного процесса и в то же время малыми отклонениями функции переходного процесса от установившегося значения.

Таким требованиям хорошо отвечает фильтр Баттерворта [63] второго порядка с частотой среза 5 Гц, который может быть выполнен в виде классической схеме на операционном усилителе [64], либо на основе специализированной микросхемы [65], либо программно с помощью аналого-цифрового сигнального процессора [66]. Пример фильтрации



сигнала, представленного на рисунке 3.4.3, с помощью фильтра с указанными параметрами представлен на рисунке 3.4.4.

Неустраненная амплитуда колебаний выходного сигнала в пересчете на угол наклона не превышает значения  $\Delta\varphi = 0,007^\circ$ , что существенно меньше допустимой погрешности измерения негоризонтальности пути  $\Delta\varphi_{\max} = 0,02^\circ$ . Вносимые при этом амплитудные и фазовые искажения в полезный сигнал при максимальной его частоте (1 Гц) также малы: 0,1 % от амплитуды датчика и  $16^\circ$  соответственно.

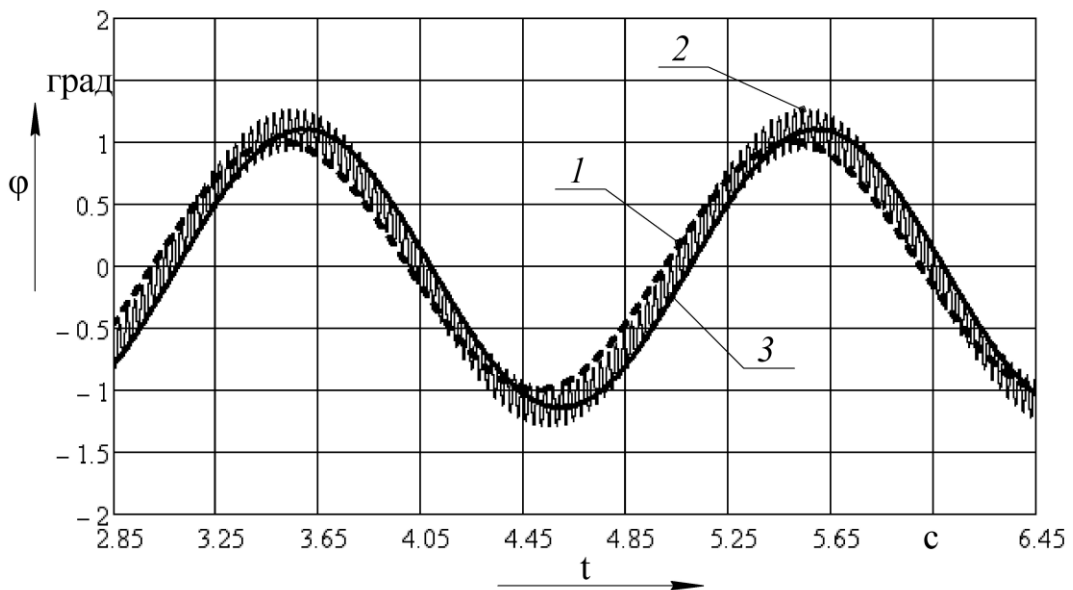


Рисунок 3.4.4 – Фильтрация возмущений, обусловленных вибрацией: 1 – угловое возмущение основания; 2 – движение маятникового элемента при наличии амортизаторов; 3 – пропорциональный сигнал датчика после фильтрации

Таким образом, наиболее результативным методом устранения воздействия вибрации на датчик является совместное использование амортизаторов и электронного фильтра нижних частот в схеме обработки сигнала с датчика.

### 3.5 Выводы

1. Получена математическая модель движения маятникового механического чувствительного элемента в виде пластины со смещенным центром масс в датчике с полостью, полностью заполненной однородной

жидкостью, который установлен на основании, совершающем угловые колебания в условиях трехкомпонентной вибрации. Указанная модель учитывает параметры присоединенной жидкости: присоединенный момент инерции и коэффициент демпфирования.

2. Разработана методика экспериментального определения параметров присоединенной жидкости (присоединенного момента инерции и коэффициента демпфирования), влияющих на динамику маятникового чувствительного элемента датчика.

3. Анализ коэффициента динамичности и фазового запаздывания датчика показали: 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; изменяя высоту установки датчика  $L$ , можно существенно уменьшить амплитудную динамическую погрешность датчика, при этом его фазовая характеристика не ухудшится; датчик при соотношении  $L/d = 15$  имеет коэффициент динамичности, равный 1,1 и фазовое запаздывание  $7^\circ$  на частоте 0,5 Гц (максимальной частоте угловых колебаний), в то время как известные приборы с маятниковыми механическими чувствительными элементами ELT133.00 и ИН-2 имеют значение коэффициента динамичности равное 0,75 и фазовое запаздывание, равное около  $50^\circ$  на той же частоте.

4. Воздействие на датчик трехкомпонентной вибрации приводит к появлению вибрационного сдвига нуля, относительно которого маятник совершает гармонические колебания на частоте внешней вибрации.

5. В результате исследования эффективности применения амортизаторов, показано, что амортизаторы снижают вибрационный сдвиг нуля более чем в 70 раз, однако для обеспечения уровня шума выходного сигнала датчика, обусловленного вибрацией, на уровне, не превышающем

погрешности измерения, необходимо в совокупности с применением амортизаторов осуществлять фильтрацию выходного сигнала датчика с помощью аналогового или цифрового фильтра нижних частот.

б. Показано, что оптимальным фильтром может служить фильтр нижних частот Баттерворта второго порядка с частотой среза 5 Гц, амплитудная погрешность которого на частоте 1 Гц составляет 0,1 % от сигнала датчика, а фазовое запаздывание сопоставимо с фазовым запаздыванием самого датчика: таким образом, результирующее фазовое запаздывание не превышает  $30^\circ$  на частоте 1 Гц, что значительно меньше собственного фазового запаздывания известных приборов ELT133.00 и ИИ-2.

## ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МАЯТНИКОВОГО ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ СЪЕМОМ ИНФОРМАЦИИ

Существуют требования по точности отработки команд управления выправочными устройствами и требования по точности закрепления рельсошпальной решетки в выправленном положении. Требования по точности отработки команд всегда более жесткие. Например, требования по точности выправки пути по уровню  $\pm 2$  мм, а по точности отработки команд устройствами выправки пути по уровню  $\pm 0,5$  мм [1]. Таким образом, при ширине колеи 1520 мм максимальная погрешность датчика не должна превышать 1 угл. мин, что при диапазоне измерений датчика  $3^\circ$  составляет 0,6 %, а для диапазона контроля негоризонтальности пути  $1^\circ$  соответственно 1,7 %. Целью настоящей главы является исследование возможности датчика обеспечивать указанную точность.

### 4.1 Анализ источников погрешности датчика

Определим факторы, которые влияют на результирующую точность датчика. Для этого воспользуемся функцией преобразования, полученной ранее:

$$U_{\text{пр}}(\alpha) = U_0 \cdot K_{\text{дат}} \cdot \left[ \frac{J_1 \left[ \frac{2\pi \sin(2\alpha)}{c/f} \cdot (r - R \cdot \text{tg}(\alpha)) \right]}{\frac{2\pi \sin(2\alpha)}{c/f} \cdot r} \right], \quad (4.1.1)$$

где  $\alpha$  – измеряемый угол негоризонтальности пути,  $U_0$  и  $f$  – соответственно амплитуда и частота напряжения пьезоприемника,  $c$  – скорость распространения звука в жидкости,  $R$  – радиус цилиндрической камеры датчика,  $r$  – радиус пьезодиска,  $J_1$  – функция Бесселя первого рода первого порядка.

Результирующая погрешность датчика определяется нестабильностью параметров, входящих в его функцию преобразования. Эта нестабильность может быть обусловлена как случайным разбросом параметров элементов при изготовлении конструктивных элементов датчика, так и нестабильностью внешних факторов, например, изменением температуры эксплуатации датчика. Анализируя выражение (4.1.1), а также выражения (2.2.1) – (2.2.7) можно сделать вывод, что на точность выходного сигнала датчика влияют следующие параметры:

- 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  $\Delta\alpha$  определяется точностью изготовления корпуса датчика, а именно размерами  $a$  и  $b$  и неперпендикулярностью осей отверстий  $\Delta\psi$ , а также точностью установки пьезоэлементов в пьезодержатели и точностью установки датчика на измерительную позицию. Погрешности, обусловленные неточностью изготовления корпуса поясняются рисунком рисунок 4.1.1, на котором отверстия для крепления пьезоэлементов изображены упрощенно.

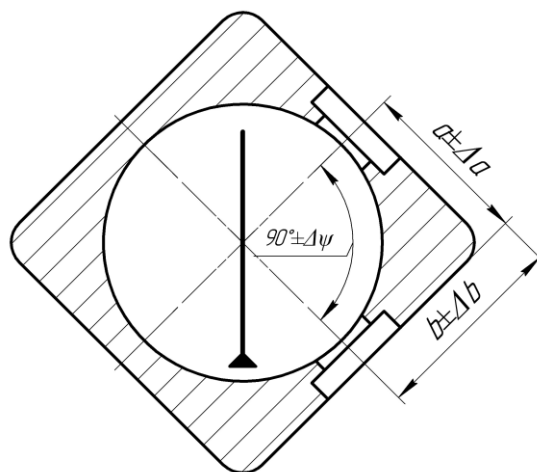


Рисунок 4.1.1 – Погрешность, обусловленная неточностью изготовления корпуса

Для практически интересных вариантов датчика с цилиндрической камерой диаметром от 30 до 100 мм взаимная неперпендикулярность может достигать  $\Delta\psi=1$  угл. мин, что сопоставимо с допустимой погрешностью измерений, начиная с шестой степени точности [67]. При выполнении размеров  $a$  и  $b$  по десятому качеству точности для таких датчиков максимальные отклонения  $\Delta a$  и  $\Delta b$  могут составить до 0,1 мм [68], что приведет к отклонению выходного сигнала датчика на 2 %, что соответствует  $\Delta\alpha=0,17^\circ\approx 10$  угл. мин. Таким образом, результирующая погрешность вследствие неточности изготовления корпуса может значительно превышать допустимую погрешность измерения.

Таким образом, весьма сложно технологически обеспечить требуемую точность геометрических размеров датчика, влияющих на точность измерения угла негоризонтальности. Также значительное значение может составить погрешность установки датчика на объекте контроля. Указанные погрешности могут быть определены численно при калибровке датчика и могут быть скомпенсированы внесением поправки в выходной сигнал датчика посредством электронного модуля [69 – 71].

Нестабильность выходного напряжения современных сравнительно недорогих электронных генераторов составляет 1 мВ при напряжении питания датчика 1,5 В. Таким образом, погрешность, обусловленная нестабильностью входного напряжения не превышает значения

$$\gamma_{\Delta U} = \frac{\Delta U_0}{U_{0НОМ}} \cdot 100\% = \frac{0,001}{1,5} \cdot 100\% = 0,07\%, \quad (4.1.2)$$

что на порядок меньше допустимой погрешности измерения негоризонтальности пути.

Нестабильность частоты современных сравнительно недорогих электронных генераторов составляет 1 Гц при номинальной частоте питающего напряжения датчика 2,1 МГц, или  $0,5 \cdot 10^{-4}\%$ . Для пьезоэлементов, имеющих добротность около 60, такое отклонение частоты практически вызовет изменения амплитуды выходного напряжения датчика

не более чем на  $10^{-3}\%$ . Изменение диапазона измерения, обусловленное тем, что частота определяет аргумент функции Бесселя в (4.1.1), также не превысит  $0,5 \cdot 10^{-4}\%$ . Таким образом, погрешности, обусловленные нестабильностью частоты входного напряжения датчика, более чем на два порядка ниже допустимой погрешности датчика и их далее можно не рассматривать.

#### 4.2 Исследование влияния температуры на точность датчика

Поскольку датчик должен эксплуатироваться в достаточно широком диапазоне температур (от минус 10 до плюс 40°C), то температурная стабильность его характеристик играет важное значение. Рассмотрим отдельно погрешности, обусловленные температурной нестабильностью таких свойств жидкости как скорость звука и коэффициент ослабления ультразвуковых волн в ней.

Известно, что с изменением температуры происходит изменение скорости звука в жидкости, а также ее вязкости [72]. Изменение вязкости жидкости приводит, в свою очередь, к изменению коэффициента поглощения ультразвука в ней [73]. Изменение этих параметров жидкости (коэффициента поглощения и скорости ультразвука) влияет на параметры резонансных акустических систем [74], к которым относится рассматриваемая ультразвуковая подсистема датчика, и, следовательно, приводит к возникновению специфических температурных погрешностей датчика. Проанализируем эти погрешности подробнее.

Изменение скорости звука с изменением температуры описывается известным выражением [75, 76]:

$$c = c_0 + \Delta c_t (T - T_0), \quad (4.2.1)$$

где  $c_0$  – скорость звука при фиксированной температуре  $T_0$ ,  $\Delta c_t$  – температурный градиент скорости звука в жидкости,  $T$  – температура, при которой определяется скорость звука.

При изменении температуры от минус 10 до плюс 40 °С в соответствии с (4.2.1) абсолютное изменение скорости звука в касторовом масле, которое заполняет камеру датчика, составит около 180 м/с [77].

Для определения максимально допустимого отклонения температуры, при котором погрешность выходного сигнала датчика не превышает допустимого значения, найдем приращение выходного сигнала, обусловленное изменением скорости звука вследствие изменения температуры. Поскольку величина этого приращения зависит от значения измеряемого угла негоризонтальности, то целесообразно в пределах диапазона измерений вычислить функции:

$$\gamma_{\Delta C}(\alpha) = \frac{U_{\text{пр}}(T, \alpha) - U_{\text{пр}}(\alpha)}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \cdot 100\%, \quad (4.2.2)$$

где  $U_{\text{пр}}(T, \alpha)$  – функция преобразования датчика, учитывающая температурное изменение скорости звука в жидкости,  $U_{\text{пр}}(\alpha)$  – номинальная функция преобразования датчика при номинальной температуре  $T_0 = 20$  °С,  $U_{\text{max}}$  и  $U_{\text{min}}$  – соответственно максимальное и минимальное значения выходного напряжения датчика в диапазоне измерений при номинальной температуре.

Графики функций (4.2.2) для некоторых значений отклонения температуры  $\Delta T = T - T_0$  представлены на рисунке 4.2.1.

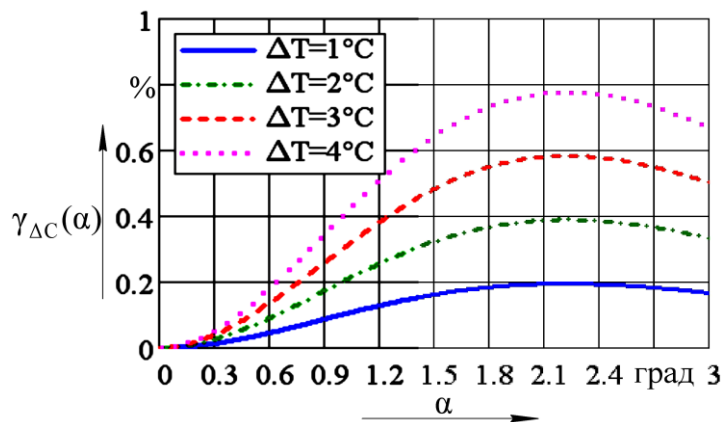


Рисунок 4.2.1 – Погрешность, обусловленная температурным изменением скорости звука в жидкости

Из рисунка 4.2.1 следует, что при отклонении температуры на 3 °С погрешность датчика достигает предельно допустимого значения, а при еще



большем отклонении температуры превышает это значение. Таким образом, необходимо принять меры по уменьшению погрешности, вызванной температурным дрейфом скорости звука в жидкости. Возможным путем решения указанной проблемы является термостатирование датчика. Для определения параметров термостатирования (температура термостатирования и допустимое отклонение температуры) необходимо также рассмотреть влияние температурного дрейфа коэффициента ослабления ультразвуковых волн в жидкости на выходной сигнал датчика.

Зависимость коэффициента поглощения ультразвука от температуры была исследована различными учеными. Так, например, D.E. Schuele в своей работе [28] приводит полученные экспериментально значения (таблица 4.2.1) для этого параметра для касторового масла, аналогичного тому, которое используется в опытном образце датчика.

Таблица 4.2.1 – Температурная зависимость коэффициента ослабления ультразвука в касторовом масле по данным [28]

T, °C	$\beta$ , м <sup>-1</sup>	T, °C	$\beta$ , м <sup>-1</sup>
14,1	82,6	25,9	48,8
17,2	74,9	29,9	41,2
19,9	63,3	36,1	32,3
21,6	57,6	47,2	20,4
23,1	53,9		

Значения таблицы 4.2.1 могут быть аппроксимированы с помощью метода наименьших квадратов (рисунок 4.2.2) [78].

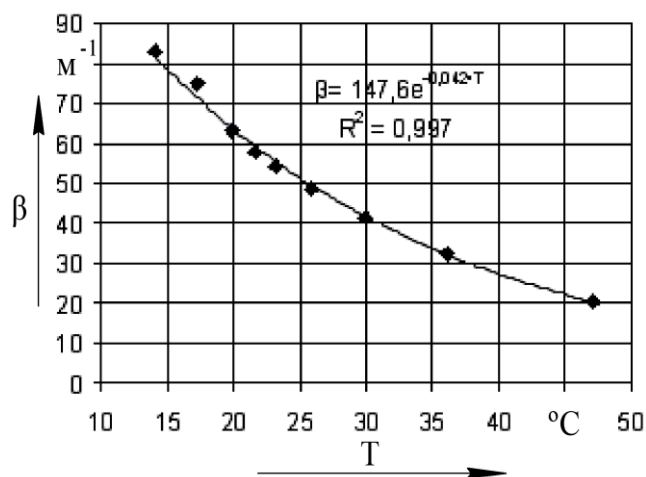


Рисунок 4.2.2 – К нахождению зависимости коэффициента ослабления ультразвука в жидкости от температуры

Таким образом, выражение для зависимости коэффициента ослабления ультразвука от температуры имеет вид:

$$\beta(T) = 147,6e^{-0,042T}. \quad (4.2.3)$$

Подставляя вместо номинальных значений  $c$  и  $\beta$  при 20 °С соответствующие температурные зависимости этих параметров (4.2.1) и (4.2.3) в функцию преобразования датчика (4.1.1) получим выражение связывающее выходное напряжение датчика не только с углом наклона и конструктивными параметрами элементов, но и с воздействующей на него температурой.

Полученное выражение может быть представлено в виде:

$$U_{\text{пр}}(\alpha) = K(\beta, M) \cdot G(\alpha, N), \quad (4.2.4)$$

где  $K(\beta, M)$  – множитель учитывающий коэффициент ослабления ультразвука и множество конструктивных параметров  $M$ , но не учитывающий измеряемый угол наклона датчика  $\alpha$ ,  $G(\alpha, N)$  – множитель учитывающий измеряемый угол наклона датчика  $\alpha$  и множество конструктивных параметров  $N$ . При этом во множество  $N$  параметр  $\beta$  не входит.

Из (4.2.4) следует, что статические характеристики датчика в пределах погрешности, обусловленной температурным изменением скорости звука в жидкости и представленной на рисунке 4.2.1, являются взаимно пропорциональными и, следовательно, влияние температурной зависимости коэффициента ослабления ультразвука в жидкости на выходной сигнал одинаково во всех точках диапазона преобразования датчика. Таким образом, относительная температурная погрешность, обусловленная температурной зависимостью коэффициента ослабления ультразвука в жидкости, может быть проанализирована в любой точке диапазона преобразования, например в точке  $\alpha=0^\circ$ .

Теоретическая зависимость выходного напряжения датчика от температуры с учетом температурного дрейфа коэффициента ослабления ультразвуковых волн в жидкости в точке  $\alpha=0^\circ$  представлена на рисунке

4.2.3. Из него следует, что выходной сигнал датчика существенно зависит от температуры.

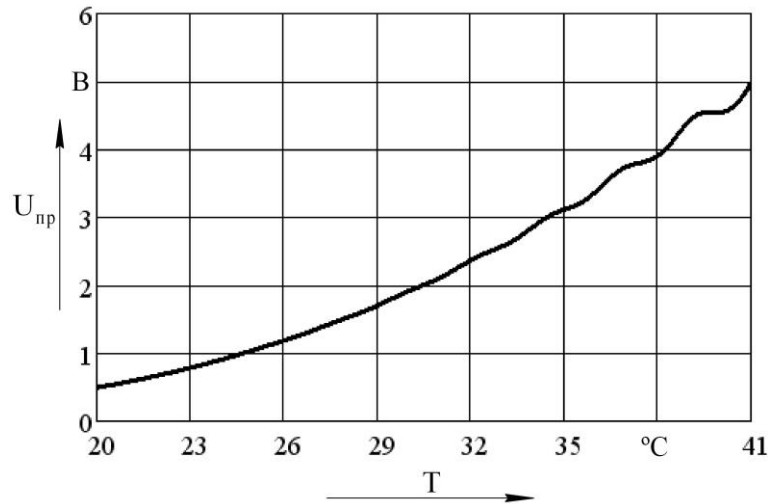


Рисунок 4.2.3 – Теоретическая зависимость выходного напряжения датчика от температуры с учетом температурного дрейфа коэффициента ослабления ультразвуковых волн в жидкости в точке  $\alpha=0^\circ$

Рисунки 4.2.4 и 4.2.5, на которых представлены соответственно экспериментальные статические характеристики датчика, заполненного касторовым маслом, для различных температур, и эти же характеристики, приведенные к одному максимальному значению, подтверждают выводы, сделанные из выражения (4.2.4).

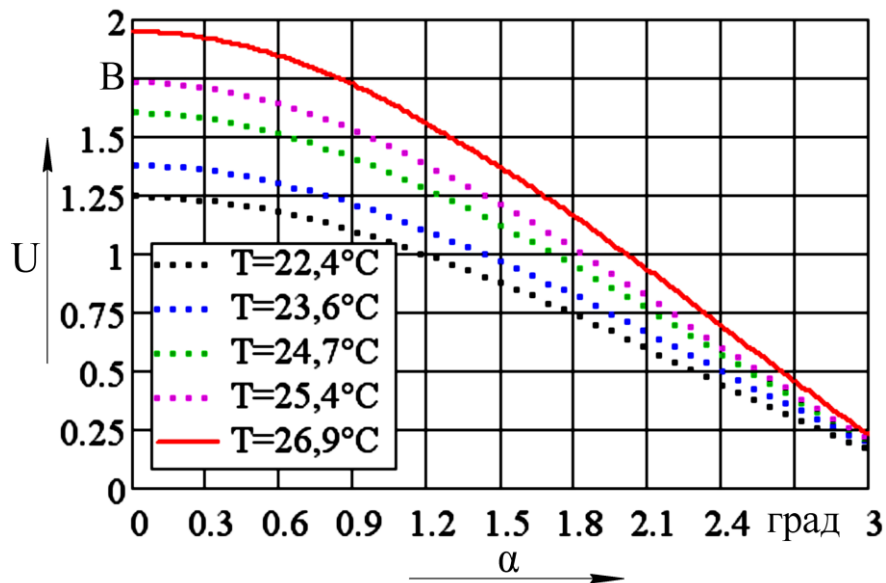


Рисунок 4.2.4 – Экспериментальные статические характеристики при различной температуре жидкости

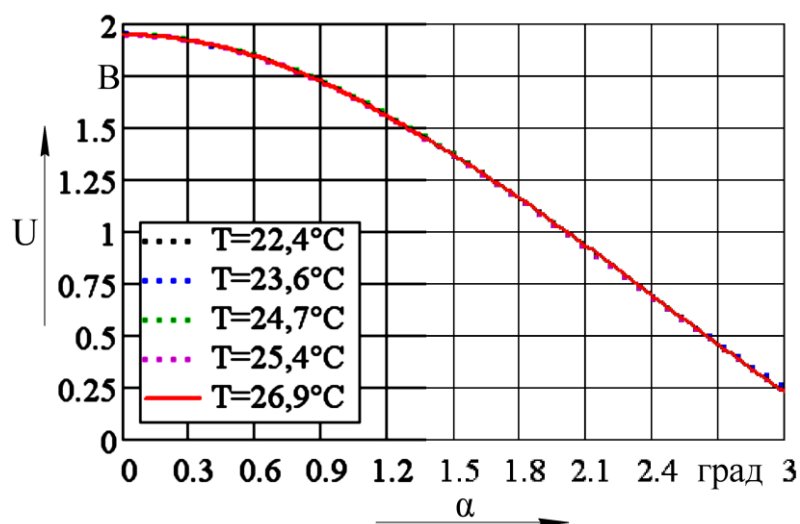


Рисунок 4.2.5 – Статические характеристики, приведенные к одному максимальному значению

Температурный дрейф значения пьезомодуля  $d_{33}$ , который существенно влияет на коэффициент преобразования пьезодиска, а, следовательно, и всего датчика, составляет около 2 % при изменении температуры на 40 °С [79]. При таком изменении пьезомодуля  $d_{33}$  изменение выходного сигнала датчика достигнет 0,6 %, что сопоставимо с допустимой погрешностью измерения негоризонтальности пути и, следовательно, требуются меры по ее уменьшению.

#### 4.3 Рекомендации по повышению точности датчика

Из выше приведенного анализа источников погрешности датчика и их численных значений следует, что большинство составляющих его погрешности превосходят допустимую погрешность измерения негоризонтальности железнодорожного пути, причем отдельные составляющие, обусловленные температурной нестабильностью акустических свойств жидкости, превышают эту предельно допустимую погрешность значительно.

Результат экспериментального исследования выходного сигнала опытного образца датчика с цилиндрической камерой диаметром 60 мм, заполненной касторовым маслом, и пьезоэлементами 10x1 мм при изменении температуры масла от 16 °С до 40 °С при  $\alpha=0^\circ$  представлен на рисунке 4.3.1.

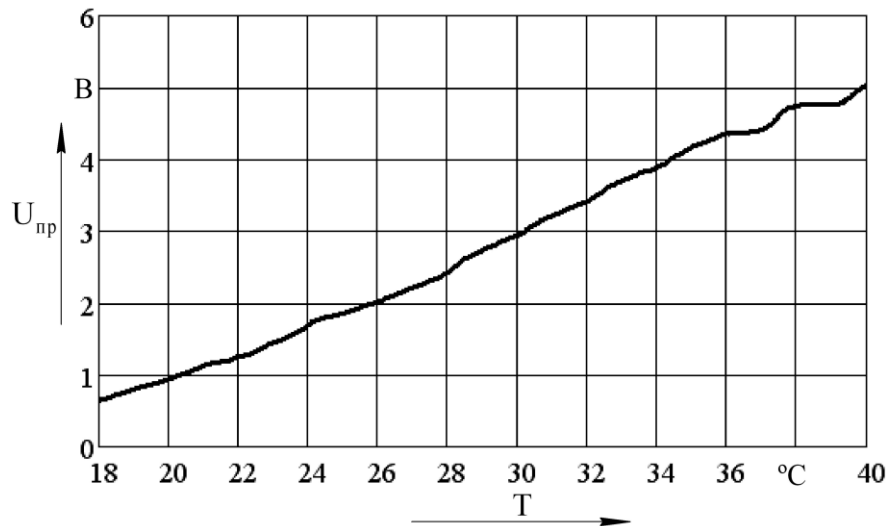


Рисунок 4.3.1 – Экспериментальная зависимость выходного напряжения датчика от температуры при  $\alpha=0^\circ$

Результат эксперимента подтверждает адекватность ранее приведенной модели зависимости выходного напряжения от температуры (рисунок 4.2.3 в соответствии с выражением (4.1.1)).

Таким образом, из выше приведенного анализа точности датчика следует, что необходимо принять меры по уменьшению температурной погрешности.

Существуют два основных способа уменьшения влияния температуры на точность приборов: термостатирование прибора и компенсация погрешности на основе данных датчика температуры, измеряющего температуру рабочего элемента прибора [80]. Поскольку в пределах рабочего диапазона температуры выходной сигнал исследуемого датчика изменяется более чем на порядок, то вариант компенсации погрешности требует повышенного внимания к элементной базе прибора, поскольку в этом случае потребуется прецизионный модуль измерения температуры, прецизионные усилители, обладающие низким уровнем шумов, что будет особенно важно для низких уровней сигнала при низких температурах, вычислительный модуль и прецизионный цифроаналоговый преобразователь с качественной системой фильтрации выходного сигнала. Рассмотрим возможность уменьшения влияния температуры на точность датчика путем термостатирования и определим параметры режима термостатирования:

номинальную температуру термостатирования и допустимое отклонение от нее.

Из рисунков 4.2.3 и 4.3.1 следует, что зависимость выходного напряжения датчика от температуры является неравномерной. При этом на характеристиках можно выделить условно линейную зону (рисунок 4.3.2) и нелинейную зону (рисунок 4.3.3). На указанных рисунках приведены диапазоны пределы, в которых может изменяться температура масла, чтобы погрешность прибора не выходила за пределы допустимой погрешности измерения негоризонтальности пути. При этом взят некоторый запас по точности, учитывающий неточность электронных блоков обработки сигнала.

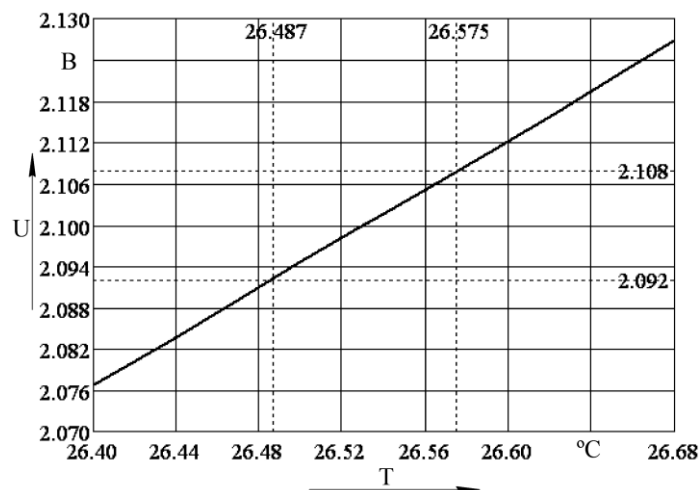


Рисунок 4.3.2 – Диапазон поддерживаемой температуры при термостатировании в линейной области характеристики

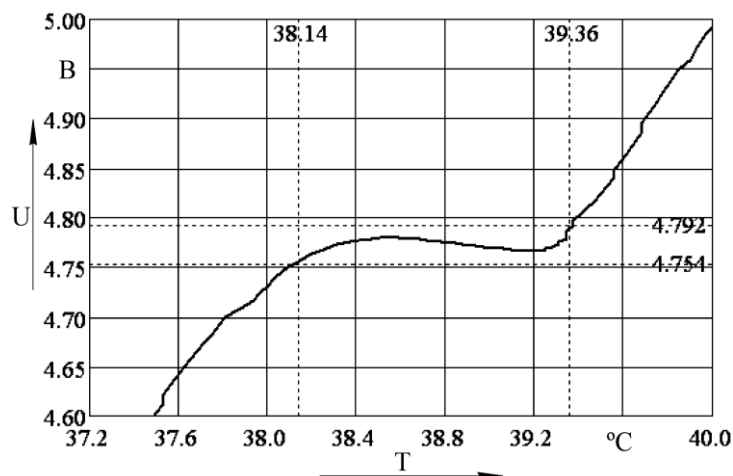


Рисунок 4.3.3 – Диапазон поддерживаемой температуры при термостатировании в нелинейной области характеристики

Из рисунков 4.3.2 и 4.3.3 следует, что для обеспечения точности выходного сигнала датчика  $\pm 0,4$  % относительно номинального значения

2,1В в линейной области характеристики точность поддержания температуры должна составлять не менее 0,1 °С, а в нелинейной области характеристики относительно номинального значения 4,77 В не менее 1,2 °С. Таким образом, требования по точности поддержания температуры в линейной области характеристики более высокие, чем в нелинейной, а следовательно при работе в нелинейной области требования к модулю измерения температуры и точности системы термостатирования в целом ниже. Кроме того, в области более высоких температур, а именно эта область является нелинейной, КПД акустической подсистемы датчика значительно выше, что снижает требования к шумовым характеристикам входного каскада электронного блока обработки информации с датчика. При этом, при диапазоне поддерживаемой температуры 1,2 °С температурная погрешность пьезомодуля  $d_{33}$  не превышает 0,02 %, что более, чем на порядок меньше допустимой.

Экспериментальные статические характеристики датчика для некоторых температур внутри диапазона температур термостатирования в нелинейной области характеристики представлены на рисунке 4.3.4. На рисунке 4.3.5 представлены погрешности отдельных характеристик относительно номинальной характеристики, за которую принята характеристика, соответствующая середине диапазона температур термостатирования, т.е. температуре 38,76 °С.

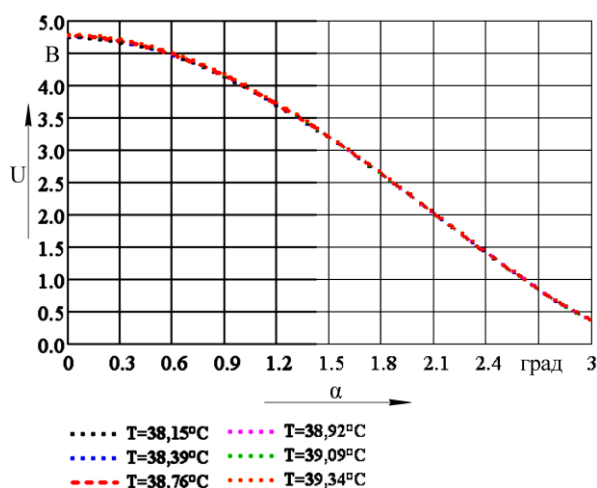


Рисунок 4.3.4 – Статические характеристики датчика при различных температурах внутри диапазона температуры термостатирования

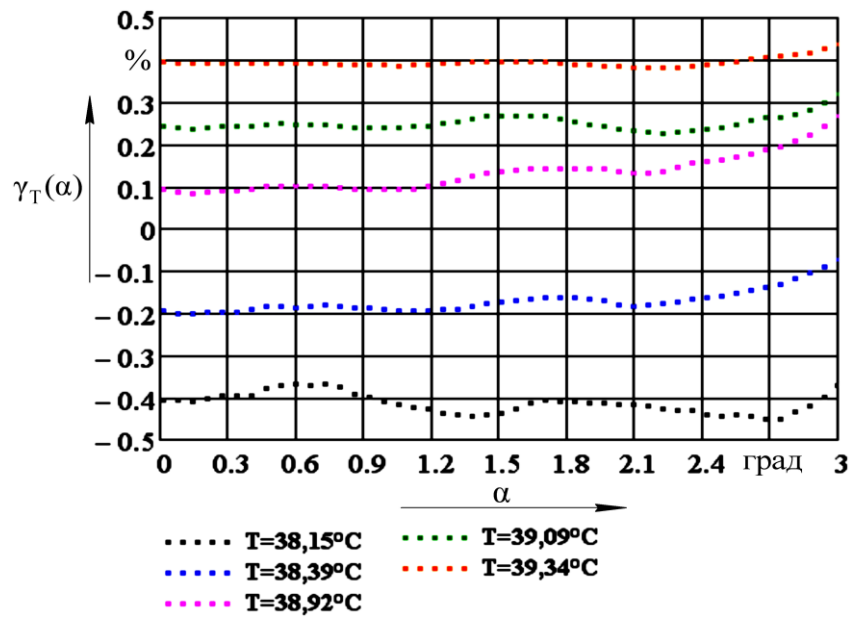


Рисунок 4.3.5 – Зависимость погрешности датчика от угла наклона при различных температурах внутри диапазона температуры термостатирования

В результате экспериментальных исследований установлено, что максимальное значение погрешности датчика во всем диапазоне измерений не превышает значение 0,45 % при использовании системы термостатирования в нелинейной области зависимости выходного напряжения датчика от температуры. Таким образом, имеется запас точности, который может быть исчерпан другими модулями измерительной цепи.

Из выше сказанного следует, что система термостатирования является достаточной для поддержания точности прибора, менее требовательной к точности элементной базы прибора и позволяет использовать аналоговый выходной сигнал датчика непосредственно в системе управления органами путевой машины, без дополнительного преобразования в цифровую и обратного преобразования в аналоговую формы.

Температурная зависимость выходного напряжения датчика при заполнении его рабочей камеры моторным маслом марки SAE50-W20, номинальная вязкость которой в два раза ниже, чем у касторового масла при 20 °С, и также зависит от температуры [81], что также влияет на коэффициент поглощения ультразвука в нем, приведена на рисунке 4.3.6.



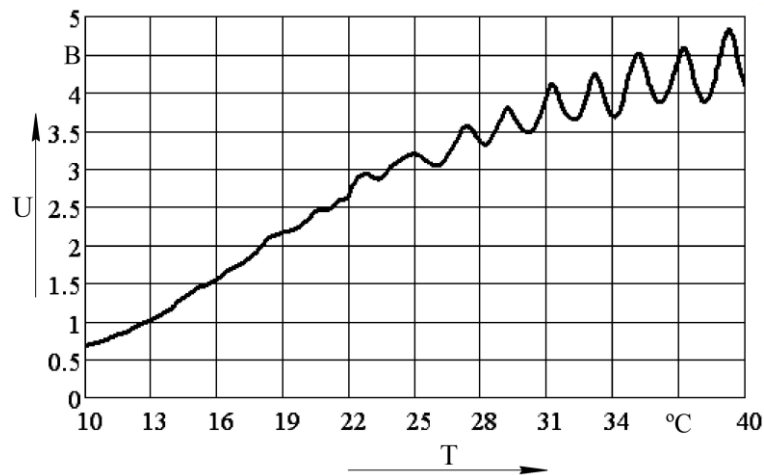


Рисунок 4.3.6 – Экспериментальная зависимость выходного напряжения датчика от температуры при  $\alpha=0^\circ$

Сопоставляя рисунки 4.3.1 и 4.3.6 можно сделать следующие выводы: температурная характеристика выходного напряжения датчика, заполненного менее вязким маслом также имеет линейный и нелинейный участки, а с повышением температуры характеристика имеет колебательный характер; датчик, заполненный более вязким маслом имеет более широкие нелинейные области температурной характеристики, чем датчик, заполненный менее вязким маслом, что понижает требования к точности системы термостатирования; осуществлять термостатирование в области, где характеристика имеет колебательный характер, также менее целесообразно, как и в линейной области, поскольку диапазон поддерживаемой температуры, в пределах которого погрешность датчика не превышает предельно допустимого значения, в этих областях меньше, чем в нелинейной области.

#### 4.4 Выводы

1. Теоретически проанализированы источники и отдельные составляющие погрешности маятникового датчика с ультразвуковым съемом информации;

2. Показано, что наиболее существенный вклад в результирующую погрешность вносят технологические погрешности изготовления корпуса датчика и температурная нестабильность акустических свойств жидкости;

поэтому для обеспечения требуемой точности измерений необходимо принять меры по термостабилизации жидкости внутри рабочей камеры датчика и внести необходимые поправки в его выходной сигнал для компенсации технологических погрешностей изготовления корпуса;

3. В результате проведенного анализа установлено, что термостатирование жидкости лучше осуществлять в нелинейной области температурной характеристики выходного напряжения датчика.

4. Показано, что исследуемый датчик способен обеспечить требуемую точность измерения негоризонтальности железнодорожного пути [82].

## **ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАЯТНИКОВОГО ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ СЪЕМОМ ИНФОРМАЦИИ**

### **5.1 Конструкция экспериментального датчика**

Как показано в предыдущей главе рассматриваемый датчик состоит из двух подсистем: механической подсистемы, которая осуществляет преобразование угла негоризонтальности в угловое рассогласование между корпусом и базовой плоскостью отсчета и акустической подсистемы, которая осуществляет преобразование угловых рассогласований между корпусом и маятником в изменение информативного параметра (амплитуды) выходного электрического сигнала пьезоприемника.

Конструкция опытного образца датчика представлена на рисунке 5.1.1. Акустическая камера датчика располагается в корпусе 1, закрытой с двух сторон крышкой 2. Между крышками и корпусом располагается герметизирующая резиновая прокладка 4, крепление крышек осуществляется посредством винтов 3. Маятниковая пластина 8, представляющая собой пластину с прикрепленными к ней посредством винтов грузами подвешена на торсионе 5. Грузы на пластине составные, что позволяет ультразвуковой волне отражаться от равномерной плоской поверхности пластины, не задевая грузы. С двух сторон торсион спаян с опорными винтами 6. Жидкость 18 заливается в камеру датчика через специальное отверстие, которое затем закрывается посредством герметизирующей прокладки 12 и винта 11. Установка пьезоизлучателя и пьезоприемника идентична. Пьезоэлемент 15 клеивается во вставку из органического стекла 14, которая в свою очередь запрессована во втулку 13. Втулки 13 устанавливаются в гнезда в корпусе датчика и крепятся к нему посредством винтов 16. Два пьезоэлемента установлены в гнездах корпуса таким образом, что формируется акустический канал измерения угла негоризонтальности, работающий в режиме «на отражение», в третьем гнезде установлен датчик температуры 17,

измеряющий непосредственно температуру жидкости внутри камеры датчика и позволяющий проводить исследования температурной погрешности датчика.

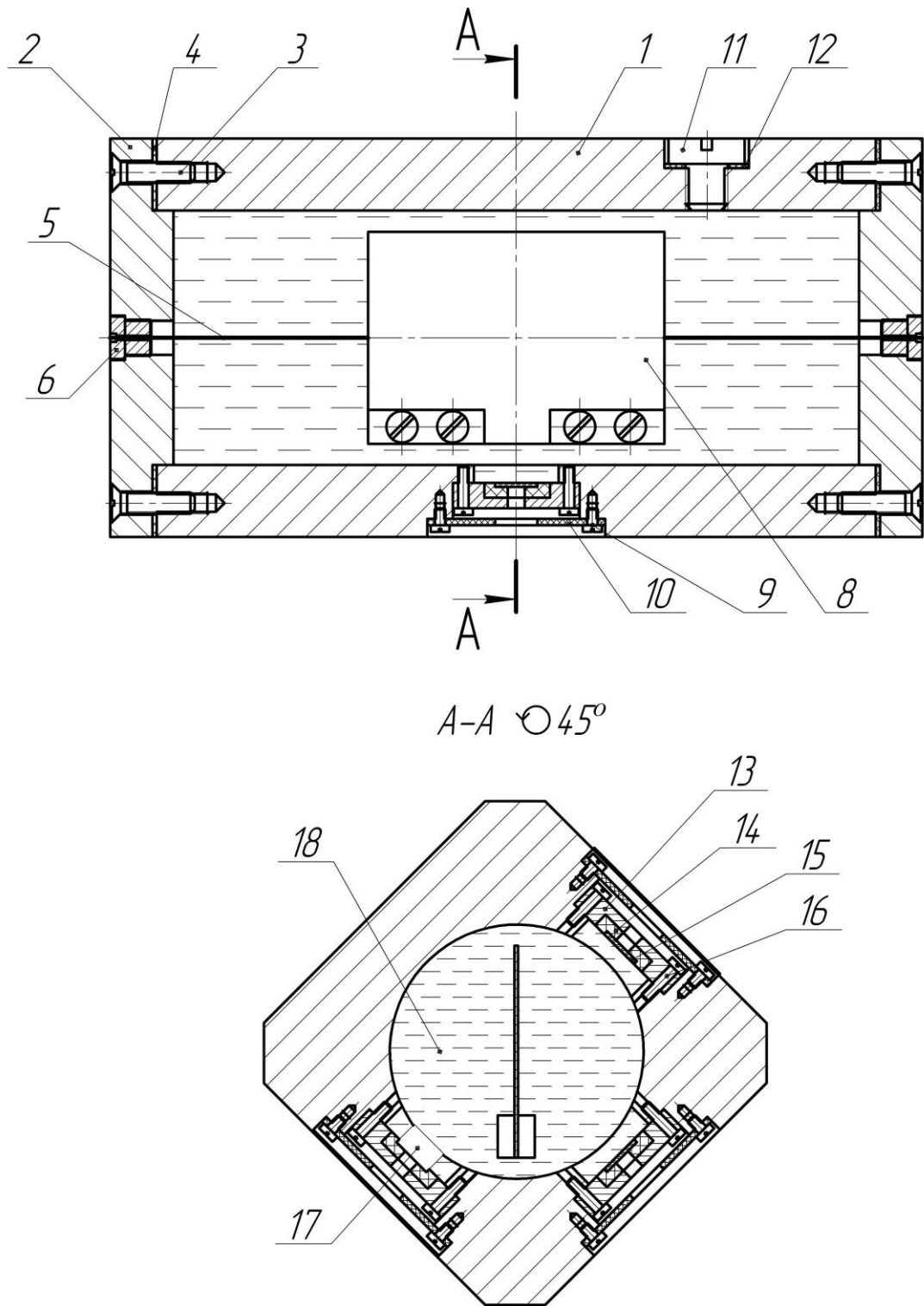


Рисунок 5.1.1 – К пояснению конструкции опытного образца датчика негоризонтальности железнодорожного пути

Указанные гнезда закрываются крышками 10, которые крепятся посредством винтов 9. В крышках предусмотрены отверстия для электрических проводников, обеспечивающих подключение пьезоэлементов и датчика температуры к электронным блокам.

## **5.2 Аппаратурная реализация и методика проведения экспериментальных исследований датчика**

В рамках проводимых экспериментальных исследований необходимо было исследовать статические, динамические характеристики опытного образца датчика, а также зависимость погрешности его сигнала от температуры.

Для проведения соответствующих экспериментальных исследований было разработано и практически реализовано три экспериментальных комплекса, включающих в себя серийно выпускаемую и оригинальную аппаратуру, а также типовое и оригинальное программное обеспечение. Оригинальная аппаратура представляет собой два стенда, предназначенных соответственно для снятия статических и динамических характеристик датчика и электронные узлы сопряжения выхода исследуемого датчика и выхода датчика стенда для исследования динамических характеристик с серийным модулем сбора данных E-154 фирмы L-CARD [83].

Стенд для снятия статической характеристики датчика состоит из корпуса и электродвигателя постоянного тока с редуктором (1/543). Установка опытного образца датчика на стенд осуществляется с помощью соединительной муфты, а в случае больших габаритов датчика также с помощью дополнительной втулки. Также в состав комплекса входит амплитудный детектор, реализованный на микросхеме AD8361 [84]. Для генерации высокочастотного напряжения, питающего пьезоизлучатель датчика используется серийно выпускаемый генератор AFG – 2125 фирмы GOOD WILL INSTRUMENT [85]. Также входной и выходной сигналы пьезоэлементов датчика одновременно регистрировались с помощью

серийно выпускаемого осциллографа TDS2012C фирмы Tektronix [86]. Двигатель стенда вращает датчик с малой угловой скоростью 2,5 град/с, выходной сигнал амплитудного детектора поступает на модуль сбора данных E-154 фирмы L-CARD, который преобразует его в цифровую форму посредством 12-битного АЦП и вводит в память персонального компьютера. Структурная схема описываемого комплекса для исследования статической характеристики датчика представлена на рисунке 5.2.1.

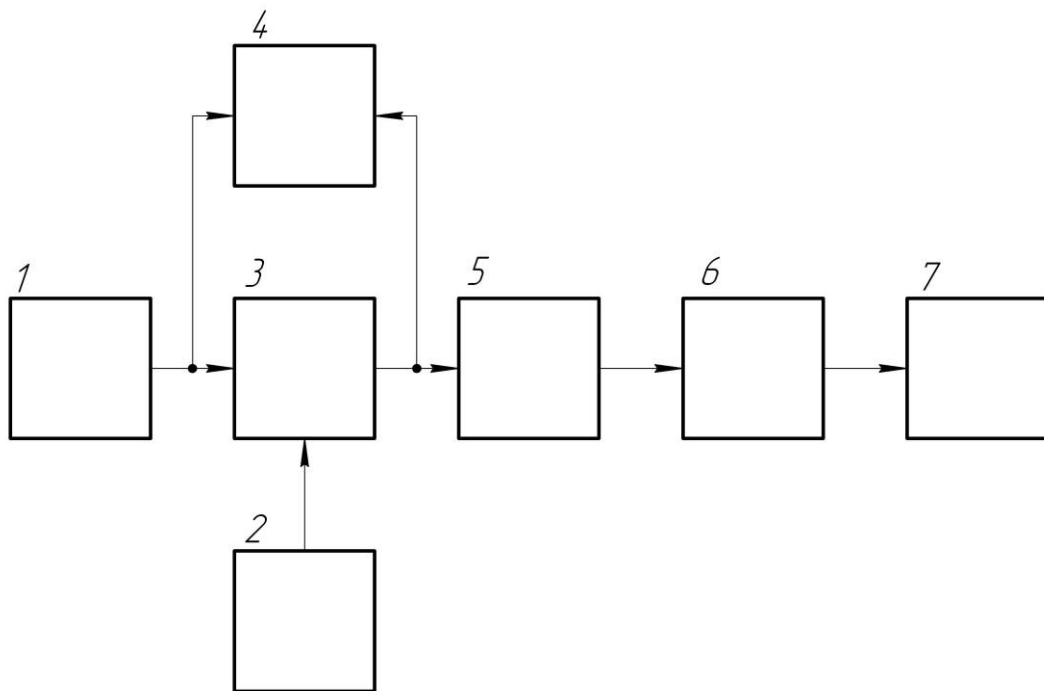


Рисунок 5.2.1 – Структурная схема комплекса для исследования статической характеристики датчика: 1 – генератор напряжения, питающего пьезоизлучатель; 2 – стенд, поворачивающий датчик вокруг оси подвеса маятника; 3 – исследуемый датчик; 4 – осциллограф; 5 – амплитудный детектор; 6 – АЦП; 7 – персональный компьютер

Комплекс для исследования динамических характеристик состоит из оригинального стенда, который позволяет создавать угловые колебания основания с фиксированной амплитудой и регулируемой частотой, а также амплитудного детектора и нормирующего усилителя для сопряжения выхода датчика стенда (бесконтактный потенциометр LP06M4R1HA [87]), напряжение которого пропорционально мгновенному углу наклона основания. Также в состав комплекса входят отмеченный ранее модуль сбора



небольшой вибрацией при работе станда (в основном на более высоких частотах), гармоники, кратные основной частоте колебаний  $f_0$ , а также элайзинговые шумы, вызванные дискретизацией сигнала с помощью АЦП [89], то для более точной оценки значений точек АЧХ и ФЧХ необходима предварительная фильтрация этих сигналов с помощью адаптивного фильтра. В качестве фильтра выбран фильтр нижних частот Чебышева первого рода третьего порядка с частотой среза, равной  $1,16f_0$ , и коэффициентом пульсаций равным  $\varepsilon = 0,7$ . Собственные АЧХ и ФЧХ для максимальной частоты исследуемого сигнала, равной  $f_0 = 1$  Гц, такого фильтра представлены на рисунке 5.2.3.

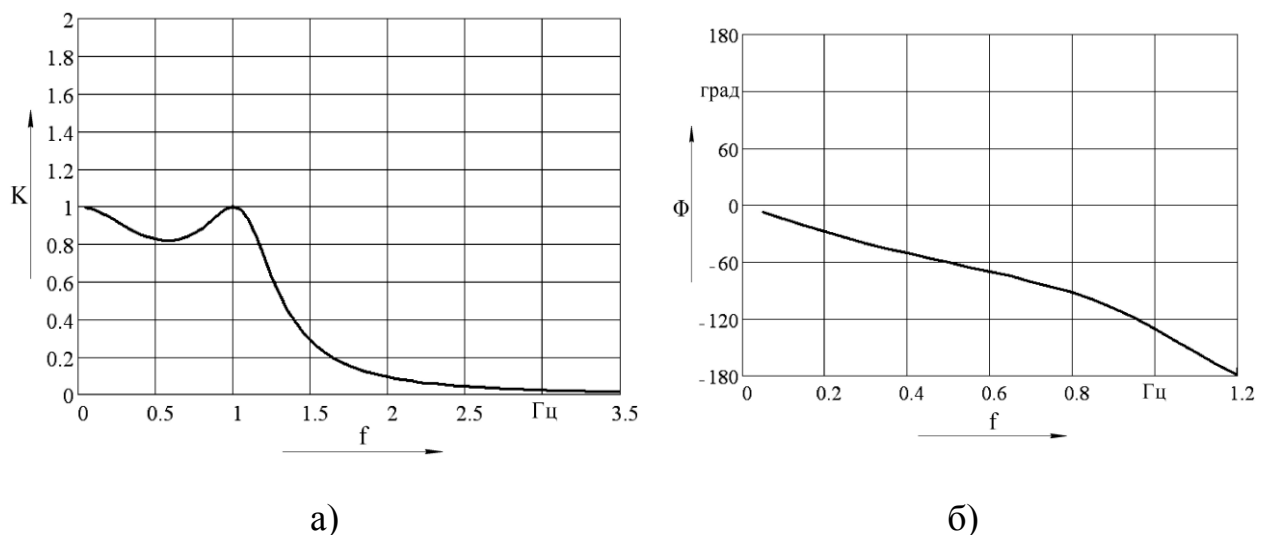
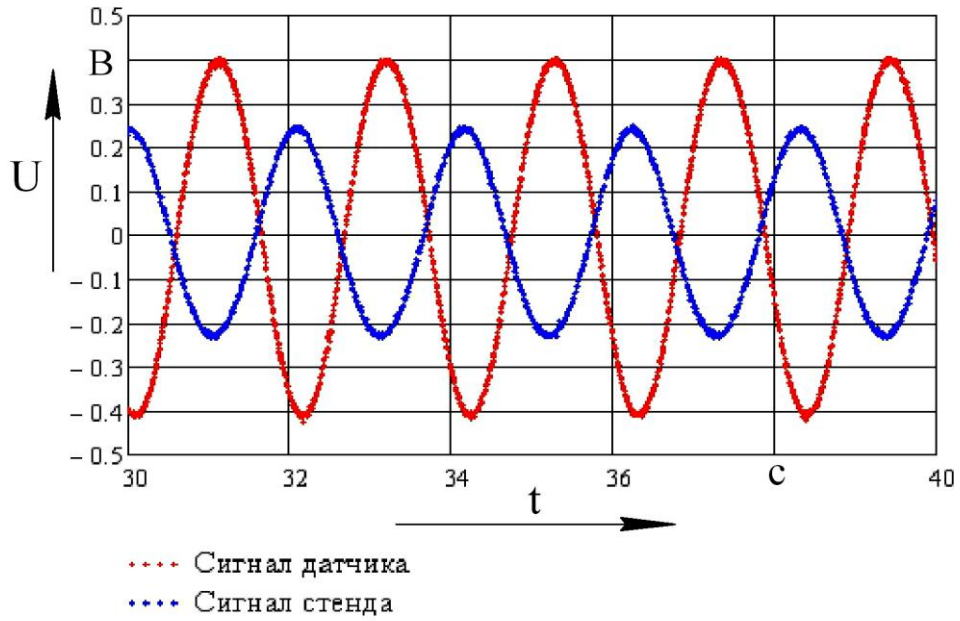


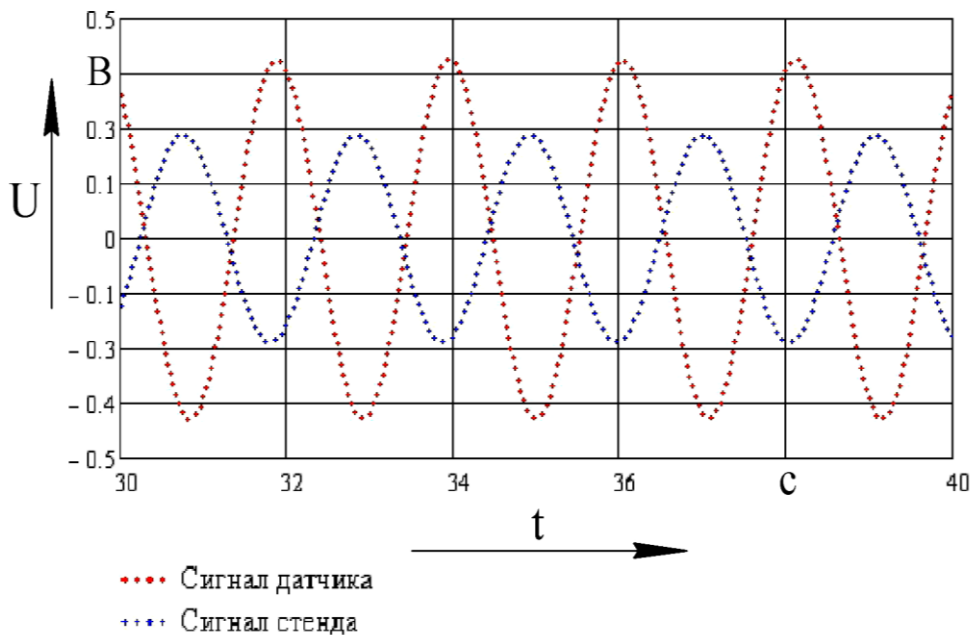
Рисунок 5.2.3 – Собственные АЧХ (а) и ФЧХ (б) фильтра нижних частот, применяемого для фильтрации входных сигналов с частотой 1 Гц

Для различных напряжений питания двигателя станда получаются различные частоты основных гармоник сигналов. Поэтому частоту среза фильтра необходимо изменять в зависимости от частоты основной гармоники для обеспечения более качественной фильтрации. Частота основной гармоники  $f_0$  сигнала находится как абсцисса максимума частотного спектра Фурье для анализируемого сигнала. Примеры сигналов до и после фильтрации приведены на рисунке 5.2.4.





а)



б)

Рисунок 5.2.4 – Пример сигнала: а) до фильтрации; б) после фильтрации

После фильтрации сигналов определяются моменты времени, в которые они пересекают ось абсцисс, соответственно момент времени, когда сигнал исследуемого датчика пересекает ось абсцисс  $t_i$  и момент времени, когда сигнал стенда пересекает ось абсцисс  $T_i$ . Ордината экспериментальной точки АЧХ определяется как среднее арифметическое максимумов сигнала исследуемого датчика на интервале времени от  $t_i$  до  $t_{i+2}$ , т.е.

$$A_j = \overline{\left\{ \max(X(t_i; t_{i+2})) \right\}}, \quad (5.2.1)$$

где  $A_j$  –  $j$ -я точка экспериментальной АЧХ,  $X(t_i; t_{i+2})$  – локальный массив значений сигнала исследуемого датчика.

Также применяя такой подход становится возможным найти среднеквадратическое отклонение значений точек АЧХ относительно среднего, которое определяет точность определения значения точки АЧХ:

$$S_{A_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \max(X(t_i; t_{i+2})) - A_j \right)^2}{n-1}}, \quad (5.2.2)$$

где  $n$  – число определений значений экспериментальной точки АЧХ в массиве сигнала, близкое к числу периодов сигнала, уложившихся за время его записи.

Определение значений экспериментальных точек ФЧХ находится в соответствии с выражением:

$$\Phi_j = \overline{\left\{ \frac{t_i - T_i}{\tau} \cdot 360 \right\}}, \quad (5.2.3)$$

где  $\Phi_j$  –  $j$ -я точка экспериментальной ФЧХ (в угловых градусах) исследуемого датчика;  $\tau = 1/f_0$  – период основной гармоники исследуемого сигнала.

Среднеквадратическое отклонение значений точек ФЧХ относительно среднего, которое определяет точность определения значения точки ФЧХ, определяется выражением:

$$S_{\Phi_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \left\{ \frac{t_i - T_i}{\tau} \cdot 360 \right\} - \Phi_j \right)^2}{n-1}}. \quad (5.2.4)$$

Таким образом, обработка одной временной записи, содержащей несколько периодов сигналов, позволяет провести многократное определение значений экспериментальных точек АЧХ и ФЧХ исследуемого датчика.

Комплекс для определения температурной погрешности датчика состоит из двух датчиков температуры DS1624 фирмы Dallas Semiconductor [90], способных измерять температуру в диапазоне от минус 55 до плюс 125 °С с разрешающей способностью 0,03125 °С и микроконтроллера ATМega32 фирмы Atmel [91], установленный на отладочной плате EasyAVR v6 фирмы MikroElektronika [92]. Также в состав комплекса входят указанные выше амплитудный детектор для детектирования выходного сигнала датчика, генератор AFG – 2125 и осциллограф TDS2012С. Один датчик температуры измеряет температуру среды, в которую установлен датчик, второй датчик измеряет температуру жидкости, заполняющей внутреннюю камеру исследуемого датчика. Изменение температуры внутри камеры датчика осуществляется посредством встроенных в опытный образец датчика элементов Пельтье [93]. Обобщенная структурная схема комплекса для исследования температурной погрешности датчика представлена на рисунке 5.2.5

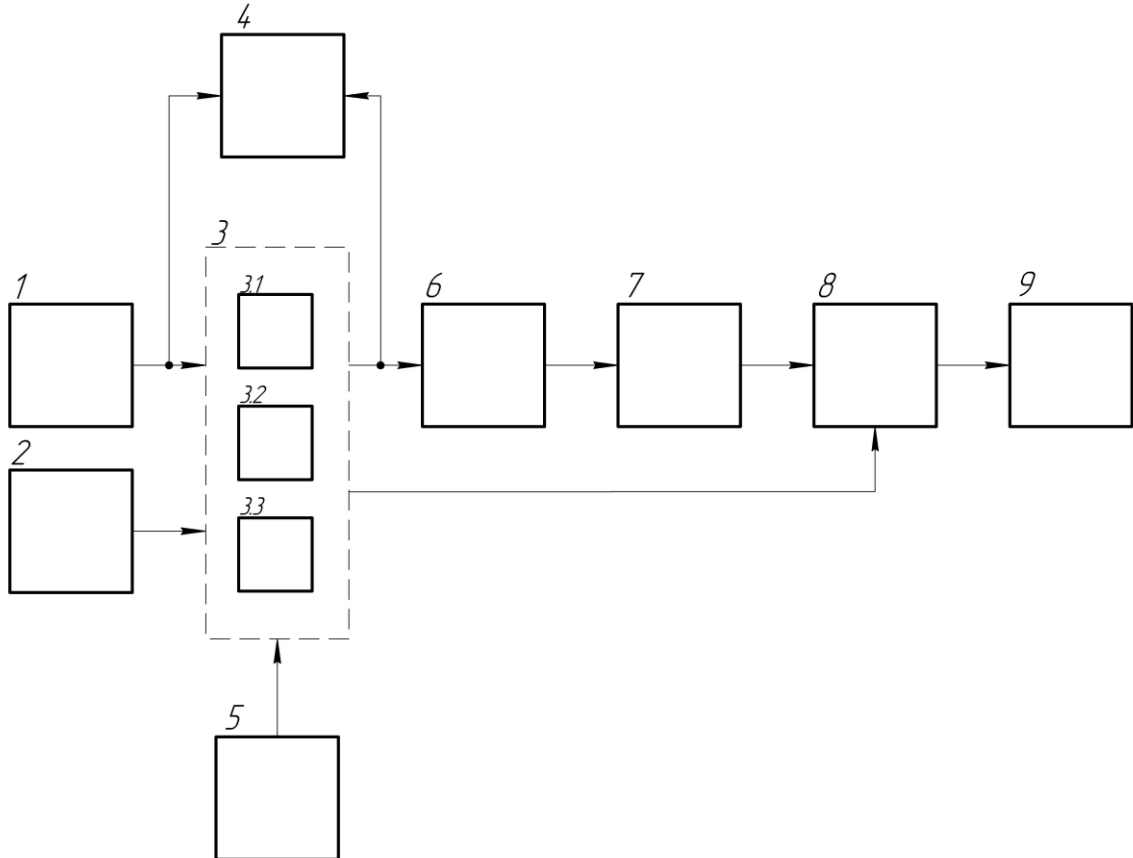


Рисунок 5.2.5– Обобщенная структурная схема комплекса для исследования температурной погрешности датчика

На рисунке 5.2.5 обозначены: 1 – генератор напряжения, питающего пьезоизлучатель; 2 – управляемый источник питания элемента Пельтье; 3 – опытный образец датчика; 3.1 – акустический канал измерения угла наклона; 3.2 – датчик температуры жидкости внутри датчика; 3.3 – элемент Пельтье; 4 – осциллограф; 5 – стенд поворота датчика относительно оси подвеса торсиона; 6 – амплитудный детектор; 7 – АЦП; – микроконтроллер; 9 – персональный компьютер.

Кроме аппаратных средств, представленных на рисунке 5.2.6, указанный комплекс включает в себя оригинальную программу, предназначенную для регистрации данных с датчиков температуры и выходного сигнала исследуемого датчика, продетектированного с помощью амплитудного детектора, находящегося при стабильной температуре.

При исследовании статических характеристик датчик устанавливался на стенд, к пьезоизлучателю подключался выход генератора, а к пьезоприемнику вход амплитудного детектора. Затем включалось питание всего оборудования за исключением питания электродвигателя, входящего в стенд. После этого задавалась частота и амплитуда выходного сигнала генератора в зависимости от типа установленных в датчик пьезодисков, а затем кнопкой Output включался его выход, в результате чего на излучающий пьезоэлемент исследуемого датчика начинал поступать высокочастотный сигнал и в его камере начинала излучаться ультразвуковая волна. Одновременно с этими процедурами на персональном компьютере запускалась программа L-Graph, которая позволяет получать данные с модуля E-154, управлять им и записывать временной массив сигнала с амплитудного детектора, подключенного к пьезоприемнику исследуемого датчика.

После старта сбора данных модулем E-154 от аккумуляторных батарей включалось питание электродвигателя, входящего в стенд, и он начинал плавно поворачивать исследуемый датчик с малой угловой скоростью (2,5 град/с) вокруг оси подвеса торсиона на угол от 0 до 10 °. Как отмечалось ранее опрос АЦП модуля E-154 при определении

экспериментальной статической характеристики исследуемого датчика проводился с частотой 183 Гц, что позволяло обеспечить шаг дискретизации по углу, равный 1 угл. мин. По окончании поворота двигатель стенда останавливался и сбор данных прекращался, а записанный в ОЗУ персонального компьютера массив значений сигнала сохранялся на жесткий диск компьютера. Кроме значений самого сигнала сохраненный файл содержал столбец точек времени, в которые формировались отсчеты АЦП. Затем сохраненный файл читался в системе MathCad и строился график, на котором по оси абсцисс откладывался угол наклона исследуемого датчика, который получался пересчетом временных точек в угловые с учетом скорости вращения датчика вокруг оси подвеса торсиона, а по оси ординат откладывались соответствующие этим временным точкам значения сигнала датчика. Таким образом, формировался график экспериментальной статической характеристики датчика.

Динамические характеристики датчика исследовались с помощью стенда, представленного на рисунке 5.2.6. Стенд создавал угловые колебания площадки, на которой был установлен опытный образец датчика. В зависимости от напряжения питания двигателя, которое обеспечивалось посредством аккумуляторных батарей, достигалась различная частота колебаний площадки в диапазоне от 0,15 до 1 Гц. Амплитуда колебаний площадки, обеспечиваемая стендом, при этом была постоянной и составляла около 0,6 °. После включения питания двигателя стенда временные массивы сигнала датчика и сигнала, полученного с помощью потенциометра, отслеживающего мгновенный наклон площадки стенда вводились в память персонального компьютера посредством модуля сбора данных E-154 и записывались программой L-GRAPH как при исследовании статических характеристик. Такие массивы записывались для различных частот колебаний площадки. После этого полученные массивы обрабатывались в системе MathCad с помощью ранее рассмотренного алгоритма (рисунок 5.2.3). Затем полученные точки АЧХ и ФЧХ соответственно откладывались в

одной системе координат и таким образом получались графики экспериментальной АЧХ и ФЧХ.

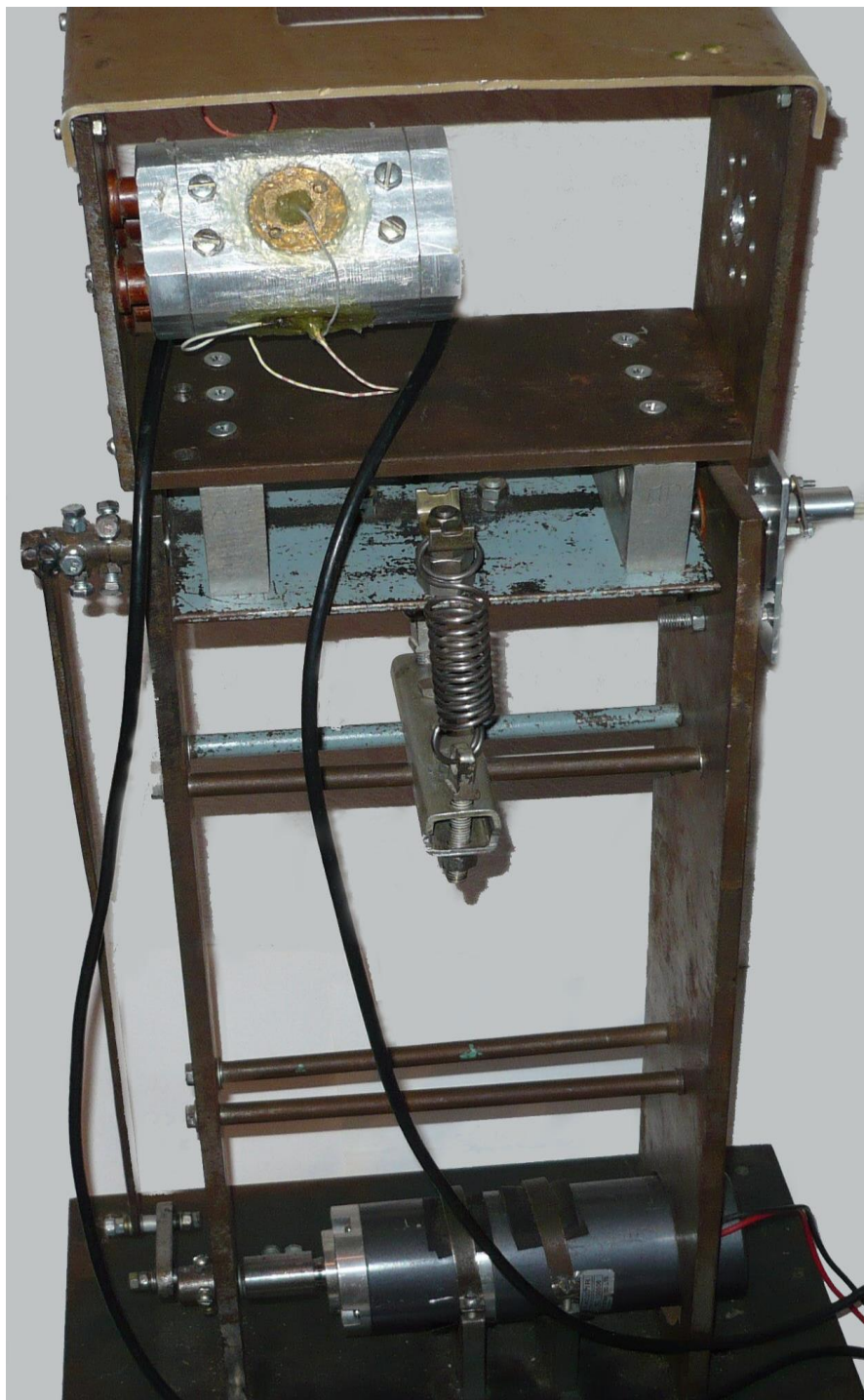


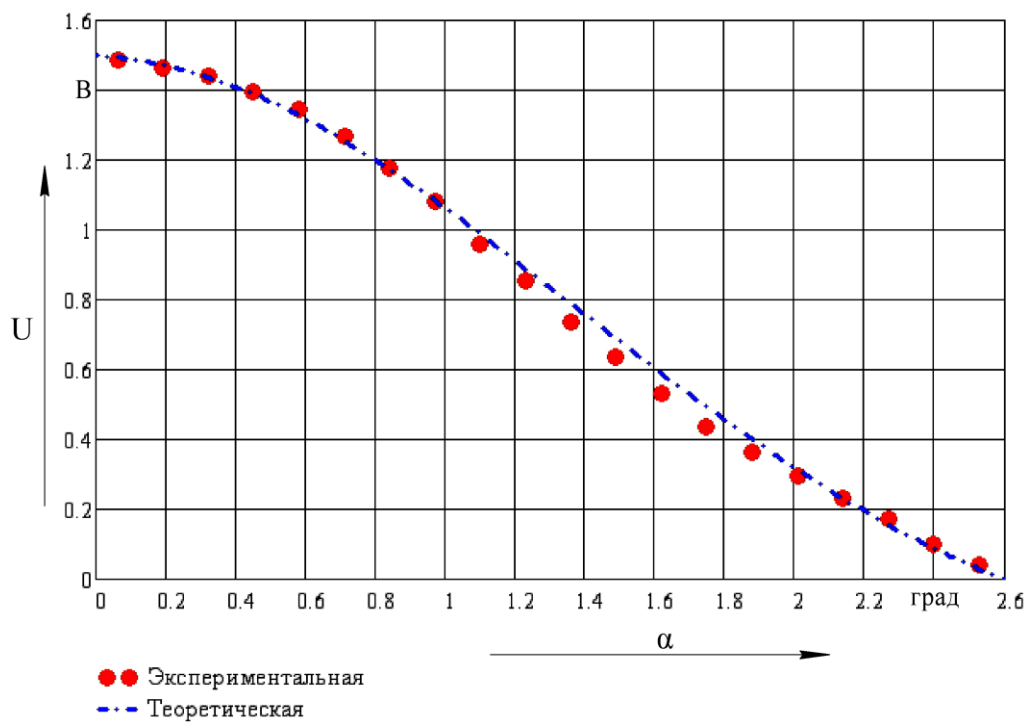
Рисунок 5.2.6 – Стенд для исследования динамических характеристик датчика

При исследовании температурной стабильности использовался стенд для исследования статической характеристики датчика. Регулируя напряжение, подаваемое на модуль Пельтье, располагаемый непосредственно на корпусе датчика, создавалась различная температура внутри акустической

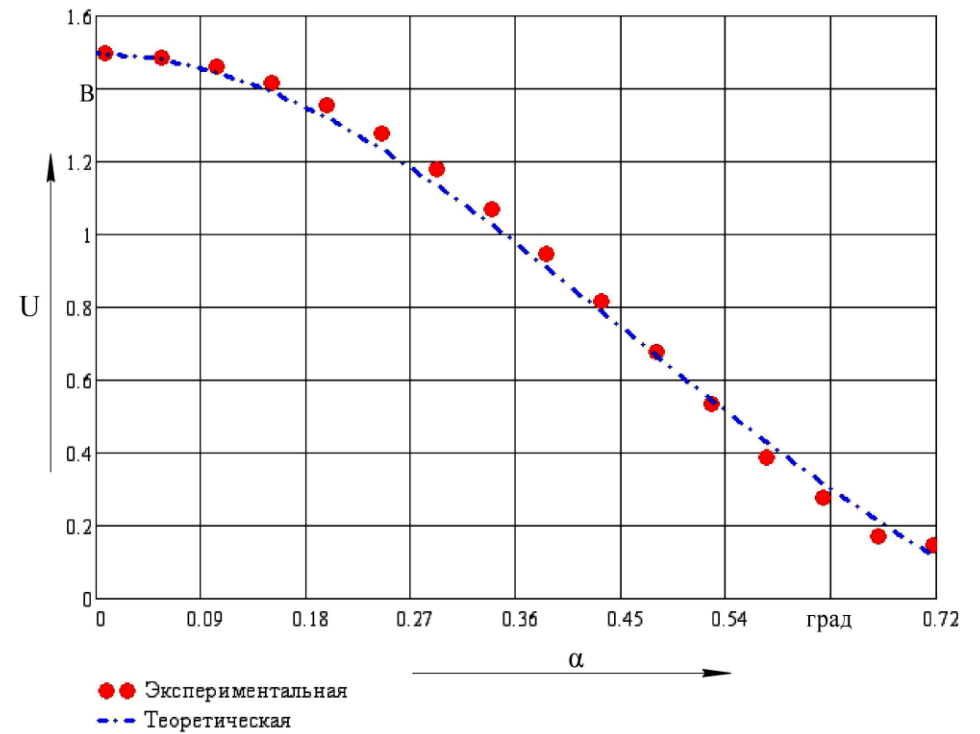
камеры датчика, которая измерялась посредством датчика температуры, установленного в этой камере. Для различных значений температуры определялись статические характеристики путем, аналогичным описанному выше. Также определялась зависимость выходного напряжения датчика от температуры в акустической камере при фиксированных углах наклона. Для этого датчик устанавливался посредством поворота вала двигателя стенда в положении, соответствующем определенному углу наклона, а затем посредством значения и полярности напряжения, подаваемого на модуль Пельтье, непрерывно изменялась температура внутри акустической камеры в определенном диапазоне. С помощью разработанного электронного блока и программы происходила запись температурной зависимости амплитудного значения выходного сигнала датчика в персональный компьютер.

### **5.3 Результаты экспериментальных исследований датчика**

Результаты экспериментальных исследований статических характеристик датчиков с различными размерами акустической камеры, диаметрами пьезодисков и различными частотами ультразвуковой волны представлены на рисунках 5.3.1 – 5.3.3. При проведении экспериментов, как отмечалось ранее, выходной сигнал усиливался и детектировался с общим коэффициентом преобразования, равным 10. Теоретические зависимости, представленные на указанных рисунках, аналогичны зависимостям, приведенным в главе 2 настоящей работы и учитывают указанный реальный коэффициент преобразования выходного сигнала датчика.



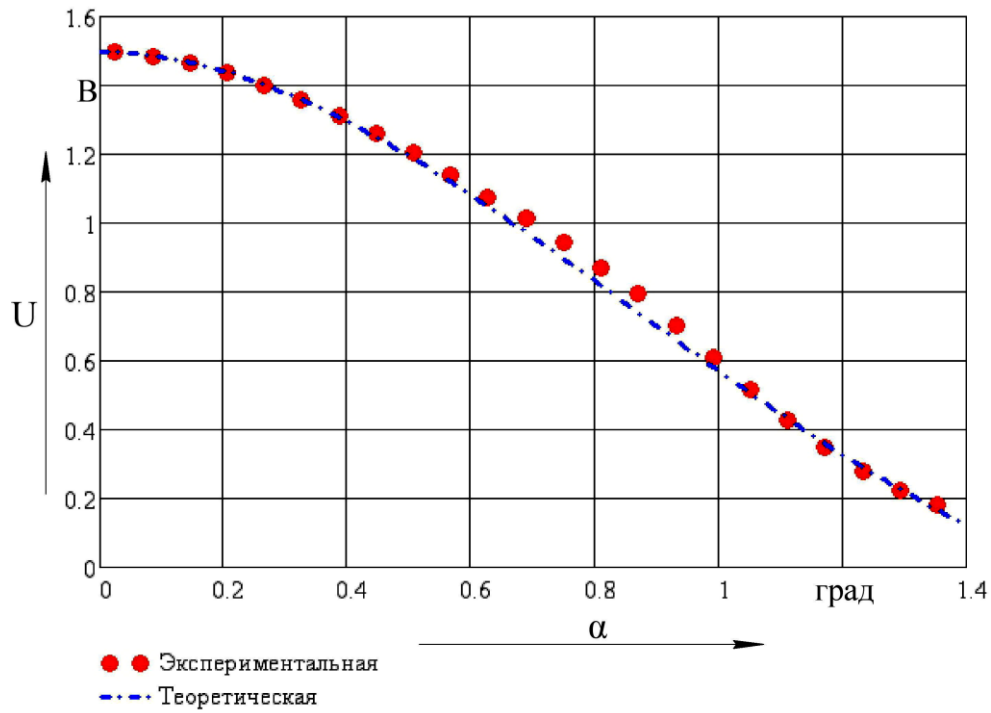
а)



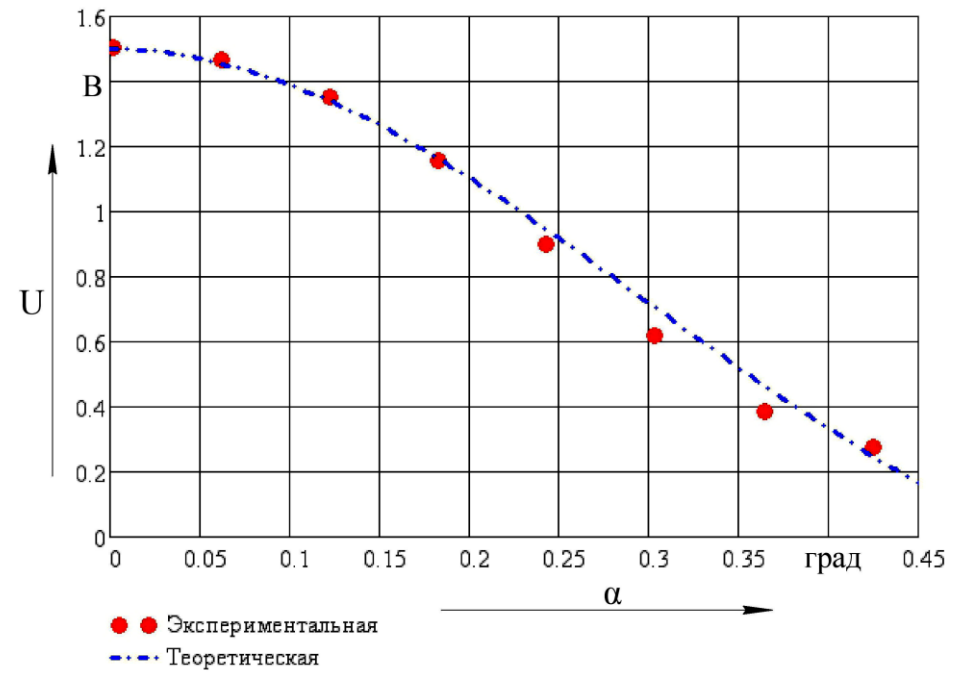
б)

Рисунок 5.3.1 – Статические характеристики датчика с акустической камерой диаметром 30 мм, пьезодисками диаметром 10 мм, при частоте сигнала: а) 2,14 МГц; б) 6,54 МГц



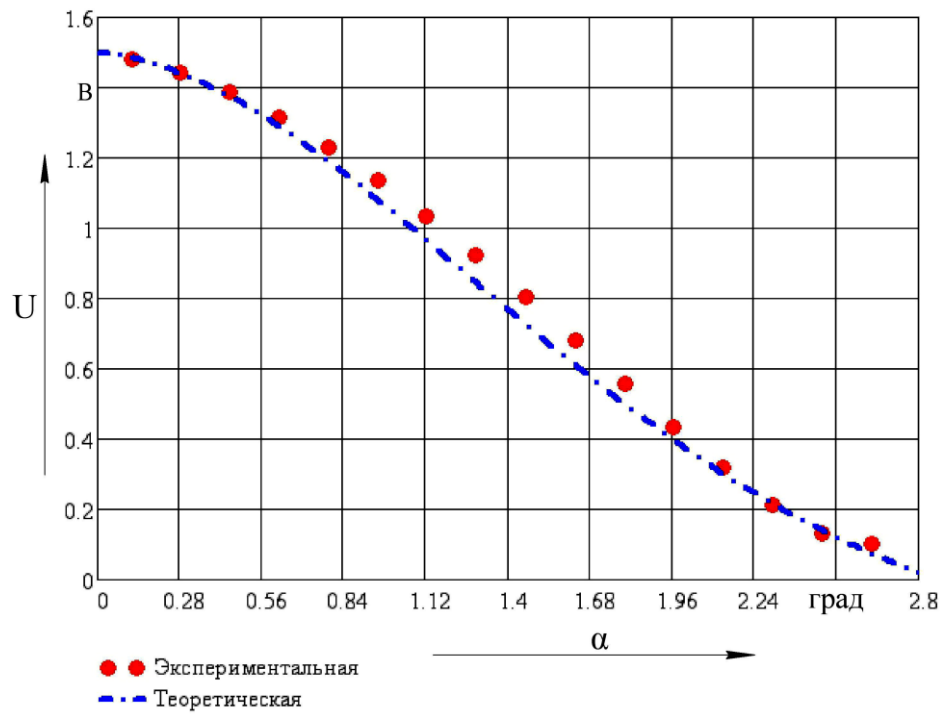


а)

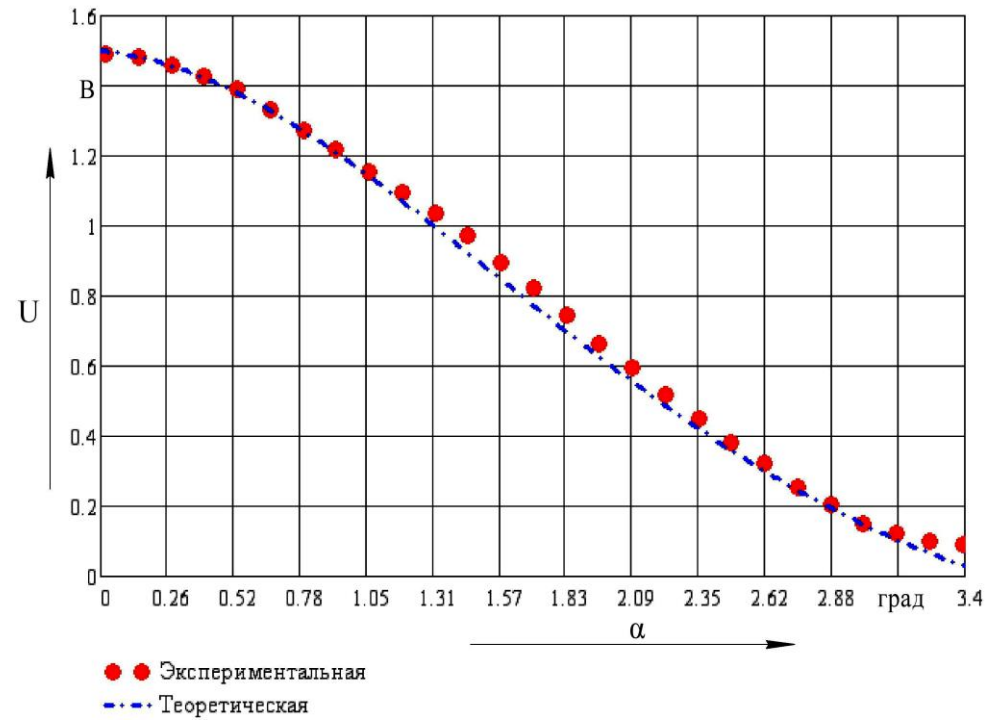


б)

Рисунок 5.3.2 – Статические характеристики датчика с акустической камерой диаметром 60 мм, пьезодисками диаметром 18 мм, при частоте сигнала: а) 1,9 МГц; б) 5,56 МГц



а)



б)

Рисунок 5.3.3 – Статические характеристики датчиков: а) с камерой диаметром 60 мм, пьезодисками диаметром 10 мм, при частоте сигнала 2,14 МГц; б) с камерой диаметром 30 мм, пьезодисками диаметром 6 мм, при частоте сигнала 2,87 МГц

Анализ приведенных экспериментальных и расчетных статических характеристик различных опытных образцов исследуемого датчика показывает, что максимальное их расхождение не превышает 5,8 % для датчика с камерой диаметром 60 мм и 4,2 % для датчика с камерой диаметром 30 мм относительно максимального значения выходного сигнала. Это позволяет сделать вывод об адекватности функции преобразования датчика, полученной во второй главе настоящей работы.

Также из рисунков 5.3.1 – 5.3.3 можно сделать выводы, что реальный диапазон преобразований и чувствительность датчика существенно зависят от диаметра используемых пьезодисков и частоты ультразвука и в меньшей степени зависят от размеров акустической камеры датчика. Значения реальной чувствительности и диапазона преобразования датчика в зависимости от геометрических размеров акустической камеры и используемых пьезодисков, а также частоты ультразвука представлены в таблице 5.3.1.

Таблица 5.3.1 – Параметры статической характеристики маятникового датчика с ультразвуковым съемом информации

Диаметр акустической камеры датчика, мм	Диаметр пьезодисков, мм	Частота ультразвука, МГц	Напряжение питания, В	Чувствительность, мВ/угл. мин	Диапазон преобразований, град
30	6	2,87	3,1	8,5	3,4
	10	2,14	1,25	11,9	2,6
	10	6,54	2,48	40	0,72
60	10	2,14	1,65	10,5	2,8
	18	1,9	0,92	17,8	1,4
	18	5,56	2,35	58,3	0,45

Для сравнения у отечественного прибора ИН-2 чувствительность составляет 10 мВ/угл. мин, у прибора ELT-133.00 – 12 мВ/угл. мин при

напряжении питания 24 В [1]. Чувствительности исследуемого датчика, представленные в таблице 5.3.1, получены при гораздо меньших напряжениях питания.

Результаты экспериментальных исследований динамических характеристик опытного образца датчика с цилиндрической камерой диаметром 30 мм, в которой установлена маятниковый элемент в виде пластины размером 40x23x1 мм с грузом массой 14 г, смещением центра масс 8 мм, собственной частотой колебаний 4,6 Гц для режима установки датчика на высоте  $L=12,5$  см, а также теоретические расчеты для датчика с аналогичными параметрами в соответствии с ранее полученными выражениями (3.3.16) и (3.3.17) представлены на рисунках 5.3.4 и 5.3.5. Аналогичные эксперименты проводились для масел с различной вязкостью: трансформаторного масла [94], моторного масла [81] и касторового масла [95].

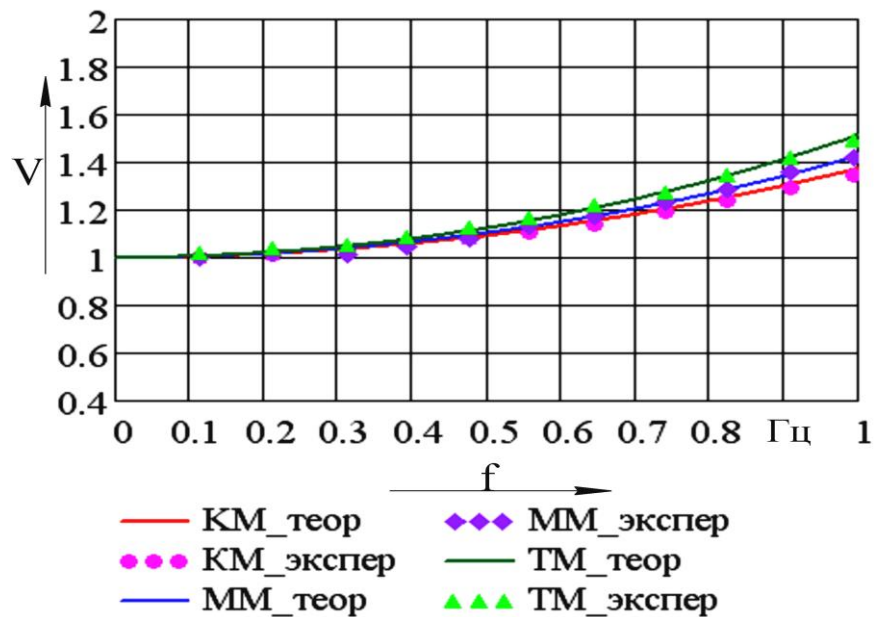


Рисунок 5.3.4 – Теоретические и экспериментальные АЧХ датчика для различных жидкостей, заполняющих акустическую камеру датчика: ТМ – трансформаторное масло; ММ – моторное масло (SAE 20W-50); КМ – касторовое масло

Максимальное отклонение экспериментальных значений от теоретических не превышает 3,5 %, что говорит о том, что полученные

математические модели механической подсистемы датчика достаточно адекватны.

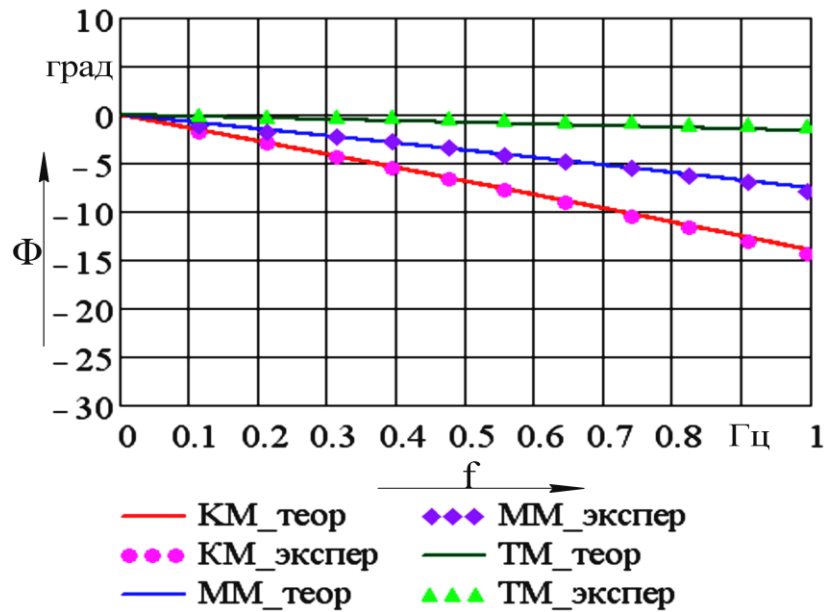


Рисунок 5.3.5 – Теоретические и экспериментальные ФЧХ датчика

Для сравнения на рисунках 5.3.6 и 5.3.7 представлены приведенные выше характеристики исследуемого датчика для случая заполнения его камеры касторовым маслом и аналогичные характеристики известных датчиков, а также микромеханического акселерометра ADXL203 фирмы Analog Devices [96, 97].

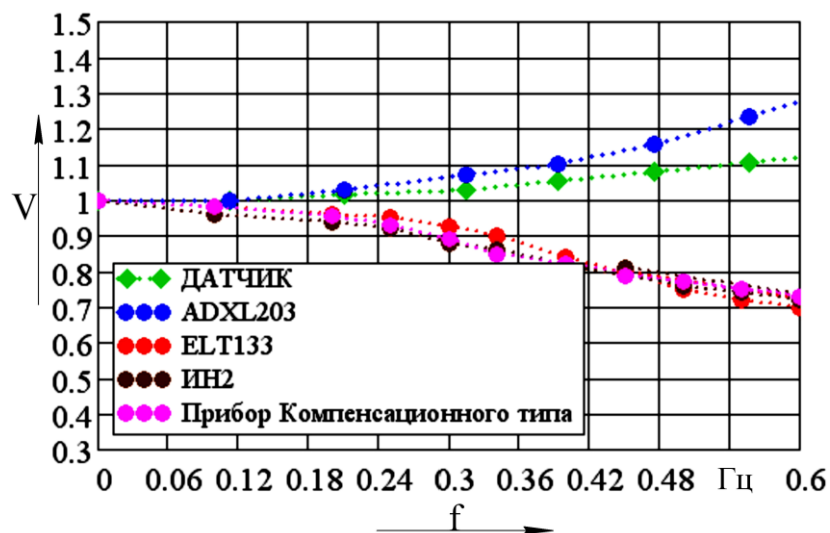


Рисунок 5.3.6 – Экспериментальные АЧХ исследуемого датчика и акселерометра ADXL203

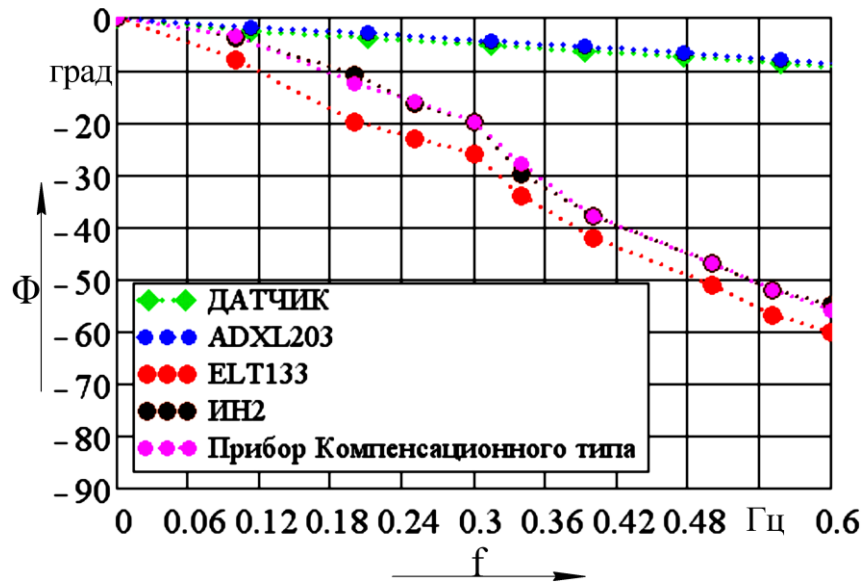


Рисунок 5.3.7 – Экспериментальные ФЧХ исследуемого датчика и акселерометра ADXL203

Анализируя приведенные результаты экспериментальных исследований можно сделать выводы:

1. коэффициент динамичности исследуемого датчика в рабочей полосе частот даже в случае заполнения его камеры менее вязкими маслами значительно лучше, чем у известных датчиков;

2. фазовое запаздывание исследуемого датчика сопоставимо с фазовым запаздыванием акселерометра для случая заполнения камеры жидкостью с высокой вязкостью, и значительно меньше, чем у приборов ELT 133 и ИН2, причем с уменьшением вязкости жидкости фазовое запаздывание также снижается.

Результаты экспериментальных исследований точности датчика рассматривались ранее в главе 4.

## 5.4 Выводы

1. Разработаны и практически реализованы опытные образцы датчика с различными размерами рабочей камеры, заполняемой различными маслами, и различными диаметрами пьезодисков.

2. Разработаны и практически реализованы экспериментальные комплексы для исследования статической характеристики, динамических характеристик,

а также для исследования влияния температуры на точность датчика, позволяющие автоматизировать процесс проведения экспериментов, а также обработку их результатов. При этом экспериментальные комплексы включают как типовые, так и оригинальные аппаратуру и программы.

3. В результате исследования статической характеристики датчика установлено, что 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.

4. В результате исследования динамических характеристик датчика установлено, что максимальное отклонение экспериментальных АЧХ от теоретических не превышает 3,5 %, а отклонение экспериментальных ФЧХ от теоретических не более 3,2 %, что позволяет сделать вывод об адекватности полученных математической модели движения маятникового элемента датчика, а также выражений для его динамических характеристик.

5. В результате исследования влияния температуры на точность датчика установлено, что вид зависимости выходного сигнала датчика от температуры, полученный экспериментально, схож с видом зависимости, заложенной в теоретической функции преобразования датчика.

6. Экспериментальные исследования подтверждают полученные теоретически выводы о превосходстве технических характеристик (динамических характеристик, чувствительности, массо-габаритных параметров) исследуемого датчика над базовым измерителем негоризонтальности железнодорожного пути ELT-133.00 [98].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 массогабаритных 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  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до плюс  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

6. Полученные аналитические выражения позволяют рассчитывать статические, динамические и точностные характеристики датчика с маятниковым механическим чувствительным элементом, полностью погруженным 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 его метрологических характеристик.

8. Апробация результатов диссертационного исследования проводилась на базе ФГБУ «Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск» (Приложение Д). Также результаты исследований используются в учебном процессе на кафедре «Приборостроение, метрология и сертификация» Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева.

Результаты диссертационной работы могут использоваться при проектировании датчиков контроля уровня и наклона объектов в статическом и динамическом режимах работы.

Перспективными направлениями дальнейшей разработки темы 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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Распопов, В.Я. Датчики уровня систем управления железнодорожных машин: Монография / В.Я. Распопов, Ю.В. Иванов. – Тула: Тул. гос. ун-т, 2000.
2. Распопов, В.Я. Датчики уровня систем управления выправочных железнодорожных машин / В.Я. Распопов, Ю.В. Иванов, С.А. Зотов // Датчики и системы.– 1999.– №4. – С. 40–43.
3. Насибулин, Р.Н. Научные основы разработки маятниковых измерителей негоризонтальности железнодорожного пути / Р.Н. Насибулин, В.Я. Распопов // Оборонная техника.– 1996.– №10-11.– С. 7–11.
4. Есипов, В.Н. Гидроакустические маятниковые датчики негоризонтальности / В.Н. Есипов, А.В. Есипов // Датчики и системы.– 2003.– №5. – С. 27–30.
5. Есипов, В.Н. О возможности контроля состояния железнодорожного пути ультразвуковыми датчиками негоризонтальности / В.Н. Есипов, А.В. Есипов // Диагностика веществ, изделий и устройств: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Орел: Изд-во ОрелГТУ, 1999. – С. 127–128.
6. Есипов, В.Н. Математическое моделирование гидроакустических датчиков негоризонтальности / В.Н. Есипов, А.В. Есипов // Датчики и системы. – 2004. – №1. – С. 15–17.
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. Есипов, В.Н. Метрологические характеристики гидроакустических датчиков негоризонтальности / В.Н. Есипов, А.В. Есипов // Датчики и системы. – 2003. – №5. – С. 27–30.
9. Незнанов, А.И. Статические 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.

10. Крылов, А.Н. О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики, имеющих приложения в технических вопросах.– М.-Л.: Гостехиздат, 1950.

11. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Ч. 2 – М.: Высшая школа, 1963.

12. Магнус, К. Колебания: Введение в исследование колебательных систем. Пер. с нем. – М.: Мир, 1982.

13. Кудревич, Б.И. Дополнительные вопросы теории гироскопов и гировертикалей.– Л.: Военмориздат, 1945.

14. Мандельштам, Л.И. Лекции по теории колебаний. – М.: Наука, 1972.

15. Короткин, А.И. Присоединенные массы судна: Справочник. – Л.: Судостроение, 1986.

16. Седов, Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. – М.: Наука, 1966.

17. Полуин, А.М. Влияние стенки канала на присоединенный момент инерции плоской пластинки и эллиптического цилиндра при действии ударного момента. – Труды НИИВТа. – Новосибирск, 1970. – вып. 44. – С. 52 – 61.

18. Kerboua, Y. Vibration analysis of rectangular plates coupled with fluid / Y. Kerboua, A.A. Lakis, M. Thomas, L. Marcouiller // Applied Mathematical Modelling. – 2008. – P. 2570–2586.

19. Исакович, М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973.

20. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973.

21. Fahy, F. Foundations of engineering acoustics. – London: Elsevier Academic Press, 2001.

22. Möser, M. Engineering acoustics. – Berlin: Springer, 2009.

23. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения.– 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во стандартов, 1982.
24. Мэзон У. (ред.) Физическая акустика. Том 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Часть А. – М.: Мир, 1966.
25. Fry, W.J. The double crystal acoustic interferometer // The journal of the Acoustical Society of America. – 1949. – №1. – P.17–28.
26. Fry, W.J. Design of crystal vibrating systems / W.J. Fry, J.M. Taylor, B.W. Henvis. – New York: Dover Publications, Inc, 1948.
27. Илгунас, В. Ультразвуковые интерферометры / В. Илгунас, Э. Яронис, В. Сукацкас. – Вильнюс: Мокслас, 1983.
28. Schuele, D.E. Interferometric Determination of Ultrasonic Absorption in Castor Oil / D.E. Schuele, F.A. Gutowski, E.F. Carome // The journal of the Acoustical Society of America. – 1957. – №10. – P. 1081–1085.
29. Пьезоэлектрические датчики / Под ред. В.М. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006.
30. Свердлин, Г.М. Прикладная гидроакустика.– Л.: Судостроение, 1976.
31. Домаркас, В.И. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи / В.И. Домаркас, Р.-И. Ю. Кажис. – Вильнюс: Минтис, 1975.
32. Vives, A. Arnau. Piezoelectric Transducers and Applications. – Berlin: Springer, 2008.
33. Есипов, А. В. Гидроакустические средства контроля негоризонтальности железнодорожного пути: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Орел: ОрелГТУ, 2004.
34. Есипов, В.Н. Гидроакустические средства измерения негоризонтальности железнодорожного пути / В.Н. Есипов, А.И. Незнанов, А.А. Рыбин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОрелГТУ, 2010. – №6-2. – С. 60-66.
35. Патент 2392585 РФ, МПК G 01 С 9/18. Датчик угла отклонения от вертикали / В.Н. Есипов, А.И. Незнанов. – Оpubл. 20.06.2010.

36. 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.

37. Патент 2517785 РФ, МПК G01 C9/18. Датчик угла наклона / А.И. Незнанов, В.Н. Есипов. – Оpubл. 27.05.2014.

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

39. 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.

40. 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>.

41. 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. – Орел: ГУ-УНПК, 2013. – № 2 (298). – С. 118-123.

42. Ватсон, Г.Н. Теория бесселевых функций. Часть первая / пер. с англ. под ред. В.С. Бермана. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1949.

43. 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>.

44. Huang, R. Extensional, thickness-stretch and symmetric thickness-shear vibrations of piezoceramic disks / R. Huang, P.C.Y. Lee, W.S. Lin, J.D. Yu // IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – USA: IEEE, 2002. – Vol. 49. – N 11. – P. 1507-1515.

45. Wu, L. Electrode Size and Dimensional Ratio Effect on the Resonant Characteristics of Piezoelectric Ceramic Disk / L. Wu, M.Ch. Chure, Y.Ch. Chen, K.K. Wu, B.H. Chen // Ceramic Materials - Progress in Modern Ceramics / ed. by Prof. Feng Shi. – China: InTech. – Chapter 2. – ISBN 978-953-51-0476-6.

46. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – Мн.: ДизайнПРО, 2004. – 640 с.

47. Benenson, W. Handbook of physics / W. Benenson, J.W. Harris, H. Stocker, H. Lutz – New York: Springer-Verlag New York, Inc, 2002. – 1183 p.

48. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа.— М.: Наука, 1970.

49. Короткин, А.И. Присоединенные массы судостроительных конструкций. – СПб.: МорВест, 2007. – 448 с., ил.

50. Van Eysden, C.A. Small amplitude oscillations of a flexible thin blade in a viscous fluid: Exact analytical solution / C.A. Van Eysden, J. E. Sader // Physics of Fluids. – 2006. – Vol. 18. – № 12. – PP. 123102 – 123102-11

51. Kanwal, R. P. Vibrations of an elliptic cylinder and of a flat plate in a viscous fluid / R.P. Kanwal // ZAMM - Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. – 1955. – Vol. 35. – № 1-2. – PP. 17 – 22.

52. Minikes, A. Damping of a micro-resonator torsion mirror in rarefied gas ambient / A. Minikes, I. Bucher, G. Avivi // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2005. – Vol. 15. – PP. 1762 – 1769.

53. Brugo, T. Study of the dynamic behavior of plates immersed in a fluid / T. Brugo, R. Panciroli, G. Minak // *IMEKO TC15 - Experimental Mechanics: Proceedings of the 11th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics*. – (ROMANIA, Brasov, May 30-June 2, 2012). – Режим доступа: <http://www.imeko.org/publications/ysesm-2012/IMEKO-YSESM-2012-K04.pdf>.

54. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – 4-е изд., переработанное. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968.

55. *The Cambridge handbook of physics formulas*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 201 p.

56. 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.

57. Dănet, N. Linear differential equations with Mathcad / N. Dănet // *Symposium “Educational Technologies on Electronic Platforms in Engineering Higher Education”*. – (ROMANIA, Bucharest, May 8 – 9, 2009). – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/236029487>.

58. Суконкина, М.Л. Обзор методов и устройств виброзащиты приборных платформ / М.Л. Суконкина, С.И. Гайнов // *Труды НГТУ*. – 2013. – № 4. – С. 311-319.

59. *Вибрации в технике: Справочник*. В 6-ти т. – Т. 6. Защита от вибрации и ударов/ Под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981.

60. Ильинский В.С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий. – М.: Радио и связь, 1982.

61. Ассортимент антивибрационной продукции для промышленности // Треллеборг Россия. 2011. URL:



<http://www.trelleborg.ru/Products-and-Solutions/IndustrialAVS/Industrial/Product-Range> (дата обращения 1.03.2016)

62. Flanged Instru-mountings // TRELLEBORG. 2011. URL: <http://www.trelleborg.ru/files/industrial-avs/industrial/44%20Flanged%20Instru.pdf> (дата обращения 1.03.2016).

63. Джонсон, Д. Справочник по активным фильтрам: Пер. с англ. / Д. Джонсон, Дж. Джонсон, Г. Мур.— М.: Энергоатомиздат, 1983.

64. Гутников, В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1988. – 304 с.: ил.

65. Active Filters // Maxim Integrated. 2016. URL: <https://para.maximintegrated.com/search.mvp?fam=filt&275=Lowpass> (дата обращения 1.03.2016).

66. Kester, W. Mixed-Signal and DSP Design Techniques. – USA: Analog Devices, Inc, 2000.

67. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т. 1 – 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.: ил.

68. Общетехнический справочник / Под ред. Е.А. Скороходова – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982.

69. Земельман, М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств автоматики.— М.: Энергоатомиздат, 1986.

70. Бромберг, Э.М., Куликовский, К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений.— М.: Энергия, 1978.

71. Трамперт, В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR-микроконтроллеров.: Пер. с нем. – К.: “МК-Пресс”, 2006. – 208 с.: ил.

72. Handbook of physical properties of liquids and gases: pure substances and mixtures / by N.B. Vargaftik; with foreword to the English edition by Y.S. Touloukian. – 2nd ed. – Washington : Hemisphere Pub. Corp., 1983.

73. Михайлов, И.Г., Гуревич, С.Б. Поглощение ультразвуковых волн в жидкостях. – Успехи физ. наук. т. XXXV, в. 1, 1948.

74. Denney, D.C. An ultrasonic resonator for determining speed of sound and absorption in small volumes of liquid media. – (Urbana, Illinois, USA, 1972).

– Режим доступа: <http://www.brl.uiuc.edu/Downloads/Denney-MS-1972/DavidDenney-MS-Thesis.pdf>.

75. Kuo-Ting, Wu. Engine Oil Condition Monitoring Using High Temperature Integrated Ultrasonic Transducers / Kuo-Ting Wu, Makiko Kobayashi<sup>1</sup>, Zhigang Sun, Cheng-Kuei Jen, Pierre Sammut<sup>1</sup>, Jeff Bird, Brian Galeote, Nezhir Mrad // International Journal of Prognostics and Health Management. – 2011. – Vol. 2. – № 10.

76. Колобаев, П.А. Экспериментальное исследование температурной зависимости скорости ультразвука в сырой нефти и в некоторых нефтепродуктах. – (Акустический институт имени Н.Н. Андреева, Москва, 2000). – Доклад на X сессии Российского Акустического общества, т.2, с.94-96.

77. Greenleaf, J .F. Tissue characterization with ultrasound. Volume I. Methods. – Boca Raton: CRC Press, Inc, 1986.

78. Браверман, Э.М., Мучник, И.Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983.

79. Piezoelectric Materials. URL: <https://www.physikinstrumente.com/en/technology/piezo-technology/piezoelectric-materials> (дата обращения 1.03.2016).

80. The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook / ed. by John G. Webster. – Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.

81. Классификация моторных масел: по вязкости // NEWCHEMISTRY.RU: Аналитический портал химической промышленности. 2016. URL: [http://newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=1707](http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=1707) (дата обращения 1.03.2016).

82. 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.

83. Бюджетные универсальные Модули АЦП/ЦАП Е-154 на шину USB. URL: <http://www.lcard.ru/products/external/e-154> (дата обращения 1.03.2016).

84. AD8361 Datasheet. URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8361.pdf> (дата обращения 1.03.2016).

85. Signal Sources - Arbitrary Function Generators - Arbitrary Function Generator, AFG-2100/2000. URL: [http://www.gwinstek.com/en-global/products/Signal\\_Sources/Arbitrary\\_Function\\_Generators/AFG-2100\\_AFG-2000](http://www.gwinstek.com/en-global/products/Signal_Sources/Arbitrary_Function_Generators/AFG-2100_AFG-2000) (дата обращения 1.03.2016).

86. Цифровой осциллограф TDS2012C Tektronix – ЭЛИКС. URL: [http://www.eliks.ru/kio/index.php?SECTION\\_ID=1139&ELEMENT\\_ID=38506](http://www.eliks.ru/kio/index.php?SECTION_ID=1139&ELEMENT_ID=38506)

87. Бесконтактные потенциометры серии LP LP05M2F1AA, LP06M4R1HA фирмы MuRata. URL: [http://eicom.ru/news\\_industry/2004/03/1229/](http://eicom.ru/news_industry/2004/03/1229/) (дата обращения 1.03.2016).

88. 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.

89. Data Acquisition Handbook. – 3d ed. – Norton: Measurement Computing Corporation, 2004.

90. Цифровые термометры и термостаты, датчики температуры Dallas Semiconductor. URL: <http://lib.chipdip.ru/059/DOC000059421.pdf> (дата обращения 1.03.2016).

91. ATmega 32 Datasheet. URL: <http://www.atmel.com/Images/doc2503.pdf> (дата обращения 1.03.2016).

92. EasyAVRv6. URL: [http://www.smartphenix.com/store/index.php?route=product/product&product\\_id=116](http://www.smartphenix.com/store/index.php?route=product/product&product_id=116) (дата обращения 1.03.2016).

93. Термоэлектрические модули Пельтье. URL: <http://lib.chipdip.ru/053/DOC000053443.pdf> (дата обращения 1.03.2016).

94. ГОСТ 982-80 Масла трансформаторные. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: [http://www.nge.ru/g\\_982-80.htm](http://www.nge.ru/g_982-80.htm) (дата обращения 1.03.2016).

95. Вязкость. Таблицы значений абсолютной вязкости // TehTab.ru: Технические таблицы. URL: <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/ViscosityReynolds/GuidePhysicsViscosity/> (дата обращения 1.03.2016).

96. ADXL103/ADXL203 DataSheet. URL: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL103\\_203.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL103_203.pdf) (дата обращения 1.03.2016).

97. Weinberg, H. Phase and Frequency Response of iMEMS Accelerometers and Gyros / H. Weinberg. – Norwood: Analog Devices, Inc, 2004.

98. 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.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение №2392585

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) RU<sup>(11)</sup>2392585<sup>(13)</sup> C1

(51) МПК  
G01C9/18 (2006.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2009110608/28, 23.03.2009

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
23.03.2009

(45) Опубликовано: 20.06.2010

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2093791 C1, 20.10.1997. RU 2175755 C2,  
10.11.2001. RU 2212631 C1, 20.09.2003. RU 2247943 C1,  
10.03.2005. GB 2113383 A, 03.08.1983.

Адрес для переписки:

302020, г.Орел, Наугорское шоссе, 29, Орловский  
государственный технический университет  
(ОрелГТУ)

(72) Автор(ы):

Есипов Виталий Николаевич (RU),  
Незнанов Александр Иванович (RU)

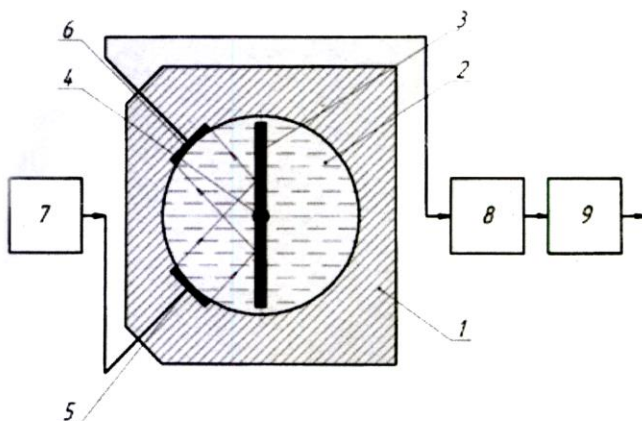
(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования "Орловский государственный  
технический университет" (ОрелГТУ) (RU)

## (54) ДАТЧИК УГЛА ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ВЕРТИКАЛИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к приборостроению и может быть использовано для измерения углов отклонения от вертикали различных объектов. Техническим результатом изобретения является увеличение диапазона измеряемых углов отклонения от вертикали и обеспечение демпфирования колебаний пластины. Датчик содержит корпус с цилиндрической камерой, заполненной однородной жидкостью. В камере посредством двух осей и специальных подшипников размещена маятниковая пластина. Под углом 45° к боковой грани корпуса установлены излучатель и приемник ультразвука. Пластина используется в качестве отражателя ультразвука. Излучатель соединен с выходом генератора, а приемник подключен к модулю предварительной обработки сигнала, выход которого соединен со входом амплитудного детектора. 1 ил.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на изобретение №2517785

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) RU<sup>(11)</sup>2517785<sup>(13)</sup> C1(51) МПК  
G01C9/18 (2006.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: по данным на 17.07.2015 - может прекратить свое действие

(21), (22) Заявка: 2012153275/28, 10.12.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
10.12.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 10.12.2012

(45) Опубликовано: 27.06.2014

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2392585C1, 20.06.2010. RU 2093791C1,  
20.10.1997. RU 2175755C2, 10.11.2001. RU 2212631C1,  
20.09.2003. JP 2009264831A, 12.11.2009. JP  
2006153588A, 15.06.2006

Адрес для переписки:

302020, г.Орел, Наугорское ш., 29, ФГБОУ ВПО  
"Госуниверситет-УНПК"

(72) Автор(ы):

Незнанов Александр Иванович (RU),  
Есипов Виталий Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Государственный университет-учебно-  
научно-производственный комплекс"  
(ФГБОУ ВПО "Госуниверситет-УНПК") (RU)

(54) ДАТЧИК УГЛА НАКЛОНА

(57) Реферат:

Использование: для определения углов наклона различных объектов. Сущность изобретения заключается в том, что датчик угла наклона содержит корпус с цилиндрической камерой, заполненной однородной жидкостью, внутри которой посредством двух осей и подшипников установлена маятниковая пластина, установленные под углом 45° к боковой грани корпуса и сопряженные друг с другом посредством маятниковой пластины ультразвуковой излучатель, соединенный с выходом генератора гармонического сигнала, и ультразвуковой приемник, подключенный ко входу модуля предварительной обработки сигнала, при этом выход модуля предварительной обработки сигнала подключен ко входу фазового детектора, второй вход фазового детектора через фазовращатель соединен с выходом генератора гармонического сигнала. Технический результат: обеспечение возможности улучшения метрологических характеристик. 1 ил.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 – Параметры присоединенной жидкости при свободных колебаниях пластины размером 23x40x1 мм

Параметры среды		f <sub>d</sub> , Гц	d <sub>экв</sub> , м	D	C <sub>экс</sub> ·10 <sup>-5</sup> , Н·м·с	J <sub>экс</sub> ·10 <sup>-7</sup> , кг·м <sup>2</sup>
ρ, кг/м <sup>3</sup>	μ, Па·с					
1,2	0,00001	5,18	0,00925	0,00512	0,05	0
1000	0,001	4,63	0,0116	0,032	0,33	3,6
850	0,03	4,43	0,0126	0,061	0,67	5,2
910	0,065	4,35	0,0129	0,112	1,2	5,7
875	0,45	3,97	0,0145	0,291	3,4	8
945	0,9	3,4	0,0149	0,546	6,4	8,8

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Приведенные на рисунках 3.3.3 и 5.3.4 теоретические и экспериментальные зависимости показывают, что частотные зависимости коэффициента динамичности являются восходящими. При этом их пик, совпадающий с собственной частотой маятникового элемента, лежит в области частот выше диапазона измерений 1 Гц. Такой характер АЧХ датчика может приводить к нежелательному эффекту, связанному с самовозбуждением автоматики путевой машины. Поэтому необходимо принять меры, способствующие предотвращению этого эффекта. Возможным вариантом решения проблемы является применение фильтра нижних частот с хорошим пропусканием в рабочей области частот и со значительным коэффициентом подавления за пределами этой области частот, который включается последовательно с датчиком (рисунок Г.1). Таким условиям отвечает фильтр с конечно-импульсной характеристикой с частотой среза 1,15 Гц, частотой дискретизации 1000 Гц и числом коэффициентов 230, который может быть выполнен на микросхеме ADSP-2189M, представляющую собой цифровой сигнальный процессор. Кроме того, использование такого фильтра может позволить эффективно подавлять колебания выходного сигнала, обусловленные вибрацией.

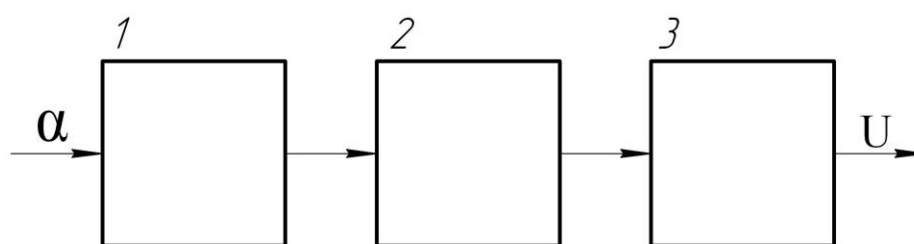


Рисунок Г.1 – Структурная схема датчика с фильтром: 1 – датчик, 2 – корректирующий фильтр, 3 – антиэлайзинговый фильтр

АЧХ датчика, снабженного корректирующим фильтром, приведена на рисунке Г.2, из которого следует, что частотная зависимость коэффициента динамичности стала нисходящей, и, кроме того, хорошо подавляется пик, расположенный на резонансной частоте датчика (4,6 Гц). На рисунках Г.3 и Г.4 приведены соответственно АЧХ и ФЧХ исследуемого датчика и известных аналогов в рабочей области частот до 1 Гц.



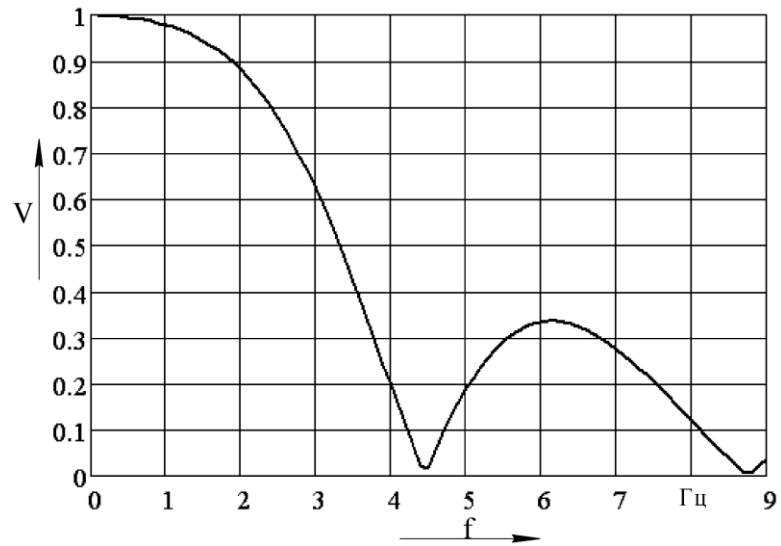


Рисунок Г.2 – АЧХ датчика с корректирующим фильтром

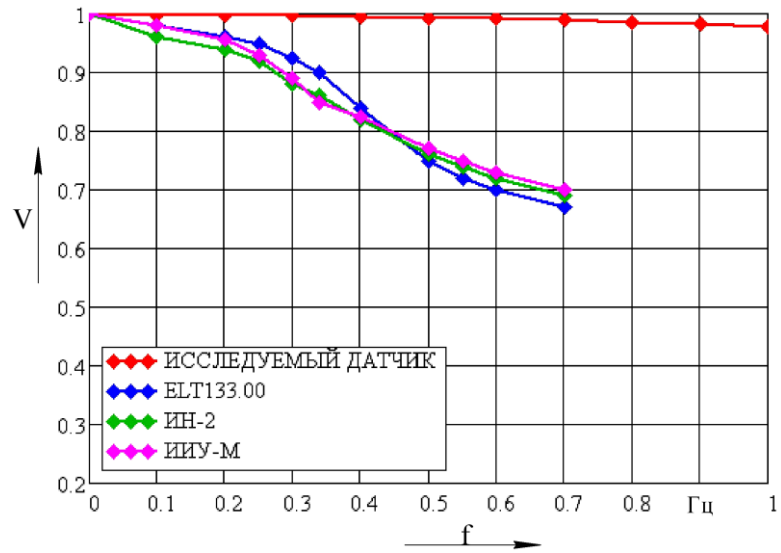


Рисунок Г.3 – АЧХ датчиков в рабочей полосе частот

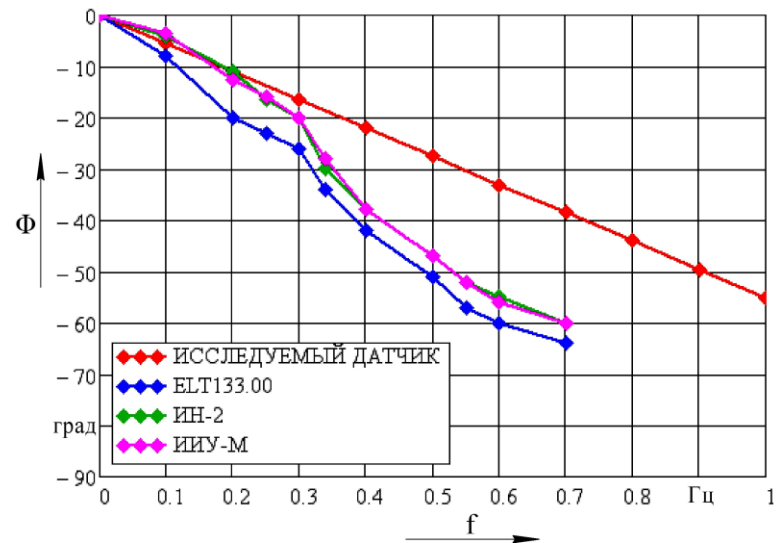


Рисунок Г.4 – ФЧХ датчиков в рабочей полосе частот

Анализируя приведенные на рисунках Г.3, Г.4 зависимости, можно сделать вывод, что исследуемый датчик, дополненный корректирующим фильтром, превосходит известные аналоги по динамическим характеристикам: на рабочей частоте 0,5 Гц его спад АЧХ составляет 0,5 % (у аналогов 25 %), а фазовое запаздывание не превышает  $28^\circ$  (у аналогов около  $50^\circ$ ). При этом на частоте 1 Гц спад его АЧХ составляет 2,5 %, а фазовое запаздывание  $55^\circ$ . Таким образом, исследуемый датчик может работать в более широком частотном диапазоне, что может способствовать увеличению производительности выправки железнодорожного пути.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель начальника ФГБУ

«Центральный научно-исследовательский

испытательный институт

инженерных войск»

Минобороны России

кандидат технических наук, доцент

А. Широков

**ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ**

**внедрения результатов диссертационной работы А.И. Незанова  
«Гидроакустический датчик контроля неровности железнодорожного  
пути с маятниковым механическим чувствительным элементом»**

от «03» февраля 2016г.

Комиссия в составе:

Председателя – заместителя начальника

научно-исследовательского испытательного  
управления доктора технических наук, доцента

Ибрагимов Н.И.

Членов комиссии:

-ведущего научного сотрудника научно-  
исследовательского отдела кандидата  
технических наук, доцента

Матковского С.Д

-соискателя-аспиранта кафедры  
«Приборостроение, метрология и  
сертификация» ФГБОУ ВО «Приокский  
государственный университет»

Незанова А.И.

-ведущего научного сотрудника научно-  
исследовательского отдела кандидата  
технических наук, доцента

Костюнина Н.Н.

в период с 25 января 2016 г., по 03 февраля 2016 г. провела работу по анализу актуальности, опытно-промышленной проверке и определению перспектив внедрения результатов диссертационной работы «Гидроакустический датчик контроля неровности железнодорожного пути с маятниковым механическим чувствительным элементом».

Комиссия установила, что представленная к внедрению научно-техническая продукция (НТП) имеет следующие преимущества.

### **1. Актуальность и перспективность применения предложенных решений.**

Безопасность, бесперебойность движения, уровень комфорта пассажиров железнодорожного транспорта в значительной мере зависят от состояния пути. Неисправный путь может создать аварийную ситуацию, вызвать задержки и сбои в движении поездов. Отрицательное воздействие неровностей пути на поездные бригады и пассажиров выражается в существенном повышении уровней шума и вибрации в подвижном составе. При прохождении колесными парами неровностей пути возникают значительные динамические нагрузки, следствием чего является преждевременный износ ходовых частей. Таким образом, задача поддержания исправного состояния пути очень важна, для ее решения необходимо производить систематический контроль и текущее содержание железнодорожного пути.

Одним из важных факторов состояния пути является его положение в поперечном профиле. Причем требования к поперечной неровности составляют не более  $\pm 4,6$  угл. мин., что соответствует превышению одного рельса над другим не более  $\pm 2$  мм на базе колеи 1520 мм.

Контроль неровности пути осуществляется как в статическом, так и в динамическом режимах. Используемые для этой цели методы и средства контроля не всегда удобны, обеспечивают требуемую достоверность и имеют необходимые динамические характеристики.

Разработанные в диссертации метод и средство контроля неровности позволяют осуществлять как статический, так и динамический контроль при



выправке железнодорожного пути. Кроме того, данное изделия полезно и при выполнении ряда военно-инженерных задач, а именно возведении фортификационных сооружений, содержании дорог, мостов и переправ, а также других специальных мероприятий при инженерном оборудовании театра военных действий.

Перспективность использования разработанного средства подтверждается выявлением в ходе работы комиссии его преимуществ:

- разработанное средство контроля базируется на ультразвуковом методе измерения, характеризуемом высокой чувствительностью и достоверностью;
- теоретические и экспериментальные исследования показывают, что гидроакустический датчик с маятниковым механическим чувствительным элементом имеет малые амплитудные искажения и практически безинерционен в полосе частот, характерной для работы подбивочно-выправочных машин;
- реализованное средство контроля имеет небольшой вес и допускает дальнейшую миниатюризацию.

## **2. Новизна и оригинальность НТП.**

Новизна и оригинальность результатов работы подтверждается патентами Российской Федерации на изобретения: № 2392585 Датчик угла отклонения от вертикали; №2517785 Датчик угла наклона.

## **3. Сравнение с лучшими образцами.**

Наиболее близкими аналогами представленной НТП являются приборы ELT-133.00 (Австрийская фирма «Plasser&Theurer») и ИН-1, ИН-2 (ТулГУ), предназначенные для путевых железнодорожных машин. Установлено, что представленное к внедрению средство контроля имеет как минимум в 8 раз меньше вес, в 3 раза меньшие амплитудные искажения, в 7 раз меньшее фазовое запаздывание и в 1,5 раза выше чувствительность.

## **4. Практическое значение НТП.**

Результаты представленной НТП могут быть рекомендованы для осуществления как статического, так и динамического контроля поперечной

неровности как железнодорожного пути, так и возведенных фортификационных сооружений, дорог, мостов и переправ. Внедрение результатов повысит достоверность и производительность контроля.

### 5. Область внедрения НТП.

Результаты диссертационной работы «Гидроакустический датчик контроля неровности железнодорожного пути с маятниковым механическим чувствительным элементом» предполагается использовать по следующим направлениям: текущий контроль неровности железнодорожного пути; при выполнении ряда военно-инженерных задач, а именно возведении фортификационных сооружений, содержании дорог, мостов и переправ, а также других специальных мероприятий при инженерном оборудовании театра военных действий.

Ожидаемый срок внедрения - 2016-2017 г.г.

Все виды работ по внедрению вышеуказанных результатов выполняются силами и средствами ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет» и ФГБУ «Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск» Минобороны России без взаимных финансовых расчетов.

Председатель комиссии

Н. Ибрагимов

Члены комиссии

С. Матковский

А. Незнанов

Н. Костюнин