МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Низаметдинов Азат Маратович

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВИБРОВИСКОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Специальность: 05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерения (электрические измерения)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Сергеев Вячеслав Андреевич

Ульяновск – 2017

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Датчики на основе электромеханических колебательных систем	11
1.1 Принципы измерений с использованием колебательных систем	11
1.2 Виды датчиков на основе резонансных колебательных систем с	
электрическим возбуждением	12
1.2.1 Резонансный механический частотомер	12
1.2.2 Пьезорезонансные датчики	13
1.2.3 Струнные датчики	14
1.2.4 Микромеханические зондовые датчики – кантилеверы	15
1.2.5 Вискозиметрические датчики колебательного типа	17
1.3 Модели резонансных колебательных систем	18
1.3.1 Свободные колебания в системах с одной степенью свободы	18
1.3.2 Вынужденные колебания	21
1.3.3 Принцип электромеханической аналогии	23
1.4 Способы и режимы электрического возбуждения колебательных систем	24
1.4.1 Способы возбуждения электромеханических колебательных систем	24
1.4.2 Ударное возбуждение колебательной системы	26
1.5 Преобразование механических колебаний в электрический сигнал	29
1.6 Измерение параметров колебательных систем в динамических режимах	35
1.6.1 Измерение параметров колебательной системы в режиме	
сканирования по частоте возбуждающего сигнала	35
1.6.1.1 Измерение параметров колебательной системы способом	
расстройки частоты возбуждающего сигнала по изменению амплитуды	35
1.6.1.2 Измерение параметров колебательной системы способом	
расстройки частоты по изменению фазе	37
1.6.1.3 Измерение параметров колебательной системы по амплитудно-	
частотной характеристике	38
1.6.2 Измерение параметров колебательной системы в режиме	
вынужденных колебаний на фиксированной частоте	40
1.6.3 Измерение параметров колебательных систем при их работе в	
составе автогенератора	42
1.6.3.1 Измерение параметров колебательной системы в	
автоколебательном режиме	42

1.6.3.2 Измерение параметров колебательной системы по схеме	
широкодиапазонного измерителя	43
1.7 Выводы	45
Глава 2. Численное моделирование процессов в механических	
колебательных системах в нестационарных режимах работы	47
2.1. Математическая модель колебательной системы с изменяющимися	
параметрами	47
2.2. Анализ колебательной системы с линейно нарастающей	
присоединенной массой	50
2.3 Зависимость погрешности определения параметров колебательной	
системы от скорости нарастания присоединенной массы зонда	56
2.4. Анализ колебательной системы с линейно нарастающим	
коэффициентом демпфирования	62
2.5 Выводы	67
Глава 3. Управление режимом возбуждения колебательных систем для	
снижения погрешности при измерении изменяющихся параметров	68
3.1 Постановка задачи анализа	68
3.2 Режим возбуждения колебательных систем с поддержанием постоянной	
разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика	69
3.3 Переходные процессы в колебательной системе в режиме с	
подстройкой частоты	72
3.4 Способ определения добротности электромеханической колебательной	
системы по фазо-частотной характеристике	79
3.5 Алгоритм подстройки частоты выходного сигнала генератора	80
3.6 Режим возбуждения колебательных систем с поддержанием	
максимальной амплитуды колебаний путем подстройки частоты	83
3.7 Выводы	84
Глава 4. Экспериментальная установка для исследования	
метрологических характеристик вибровискозиметрического датчика на	
основе электромеханической колебательной системы	86
4.1. Конструкция и принцип работы вибровискозиметрического датчика	86
4.2 Варианты формирования возбуждающего сигнала	88
4.3 Способы измерения амплитуды выходного сигнала ВВД	89
4.4 Измерение частоты в автоколебательном режиме и разности фаз в	
режиме вынужденных колебаний	93

4.5 Описание структурной схемы аппаратно-программного комплекса для	
исследования теплофизических свойств жидкостей	93
4.6 Анализ методических погрешностей измерения параметров сигналов	
вискозиметрического датчика	97
4.6.1. Анализ погрешностей измерения амплитуды	
вибровискозиметрического датчика в режиме вынужденных колебаний	97
4.6.2 Анализ погрешностей измерения периода сигнала	
вибровискозиметрического датчика в автоколебательном режиме	101
4.6.3. Анализ погрешностей измерения разности фаз сигнала датчика и	
сигнала возбуждения в режиме вынужденных колебаний	104
4.7 Оценка инструментальной погрешности отдельных узлов АПК	105
4.8. Выводы	109
Глава 5. Экспериментальная оценка метрологических характеристик	
вибровискозиметрического датчика при различных режимах	
возбуждения	110
5.1 Оценка стабильности сигнала ВВД в стационарных условиях измерения	
при различных режимах возбуждения	110
5.2. Способ определения добротности и собственной частоты	
колебательной системы в режиме вынужденных колебаний	111
5.3. Определение параметров колебательной системы при работе в	
нестационарном режиме	117
5.4. Статистические испытания	126
5.5. Выводы	127
Заключение	128
Список литературы	131
Приложение А	151
Приложение Б	153
Приложение В	161
Приложение Г	167
Приложение Д	170
Приложение Е	173
Приложение Ж	178

Введение

Актуальность Датчики электромеханических темы. на основе колебательных систем (КС) находят широкое применение в различных областях техники. Конструкции и чувствительные элементы КС в таких датчиков весьма разнообразны. Наибольшее развитие в последнее десятилетие получили струнные датчики [1–4], пьезоэлектрические датчики [5–7], кантилеверы [8–10] и камертонные датчики [11-16]. В датчиках камертонного типа для измерения параметров исследуемой среды используется погружаемый в нее 30НД, механически связанный с КС [11,15,16].

В работах Мигулина В.В., Медведева В.И., Мустель Е.Р., Парыгина В.Н., Соловьева А. Н, Иориш Ю.И., Черногорова Е.П., Нейман В.Ю., Томилина А.К., Митрофанова В.П., Verma V.K., Yadava R.D.S., Tao Y, Li, X., Xu T., Heinisch M. теоретические модели датчиков на основе электромеханических КС хорошо разработаны для стационарных условий работы при различных режимах возбуждения: свободных колебаний (при статическом и ударном возбуждении); вынужденных колебаний с возбуждением периодической (чаще всего синусоидальной) силой; автоколебаний [17–27].

Во многих технических приложениях датчики на основе КС применяются для контроля объектов (сред) с изменяющимися параметрами [4,8–16], при этом скорость изменения измеряемых физических величин (ФВ) ограничена временем установления равновесных колебаний КС [8–19,24–28]. Условие работы, при котором параметры КС изменяются за время порядка или меньшее времени установления равновесных колебаний принято называть нестационарным режимом. Применение датчиков на основе КС в этих режимах работы наталкивается на ряд работа низкодобротных КС технических ограничений, В частности, В автоколебательном режиме нестабильна, а режим свободных колебаний сложно реализуем [29]. В условиях ограниченного времени в реальных измерительных задачах погрешность измерения параметров КС может быть высока [30]. Для таких режимов работы в последние годы активно разрабатываются интеллектуальные (адаптивные) датчики [31-34].

Цель работы – повышение точности и расширение диапазона измерения вибровискозиметрических датчиков на основе электромеханических колебательных систем в нестационарных режимах работы.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Анализ метрологических характеристик современных методов и средств определения мгновенных значений параметров электромеханических КС с одной степенью свободы в нестационарных режимах;

2. Численное моделирование переходных процессов в КС с одной степенью свободы и линейно изменяющимися параметрами в режиме вынужденных колебаний и анализ возможности и погрешности определения текущих значений параметров КС по значениям амплитуды и фазы колебаний;

3. Разработка и исследование способов повышения точности измерения параметров электромеханических КС в нестационарных режимах работы путем управления режимом их возбуждения;

4. Разработка экспериментальной установки для исследования метрологических характеристик вибровискозиметрических датчиков (ВВД) на основе электромеханических КС на базе Анализатора низкотемпературных свойств жидкостей «ИРЭН 2.5» с ВВД камертонного типа.

5. Экспериментальная проверка и исследование способов повышения точности измерения параметров электромеханических КС путем управления режимом возбуждения на примере ВВД;

6. Проведение сравнительных испытаний способов измерения собственной частоты и добротности КС ВВД в нестационарных режимах работы при измерении теплофизических характеристик различных жидкостей.

Научная новизна работы

1. Впервые, на основе численного моделирования работы механической КС с одной степенью свободы в режиме вынужденных колебаний с гармоническим возбуждением при линейном изменении параметров КС (присоединенной массы и коэффициента демпфирования), получены зависимости погрешностей определения мгновенных значений параметров КС (собственной частоты и

добротности) по параметрам вынужденных колебаний от скорости изменения параметров КС.

2. Разработан способ измерения параметров КС ВВД (собственной частоты и добротности) в нестационарных режимах работы, основанный на поддержании разности фаз между электрическим сигналом возбуждения и сигналом отклика 90°. равной путем подстройки частоты возбуждения, датчика, сигнала позволяющий ПО сравнению с автоколебательным режимом и режимом вынужденных колебаний на фиксированных частотах уменьшить погрешность измерения мгновенного значения собственной частоты почти на порядок величины, а мгновенного значения добротности – на 20%-60% в зависимости от значения добротности.

3. Сформулированы рекомендации по определению значения шага перестройки частоты генератора сигнала возбуждения КС ВВД, исходя из условия, при котором переходные процессы изменения фазы сигнала отклика, вызванные перестройкой частоты, становятся меньше фазовых шумов и не оказывают влияния на погрешность измерения параметров сигнала отклика КС.

4. Предложен способ определения добротности КС в режиме вынужденных колебаний по фазо-частотной характеристике КС, состоящий в периодическом отклонении разности фаз между сигналом отклика и сигналом возбуждения от $\pi/2$ рад на заданное значение путем перестройки частоты сигнала возбуждения.

Практическая значимость работы

Предложенные в работе способы повышения точности измерения параметров КС в составе ВВД в нестационарных режимах работы путем управления режимом возбуждения КС могут быть использованы в датчиках на основе электромеханических КС различных видов.

Результаты анализа переходных процессов в КС с периодическим возбуждением при дискретной ступенчатой перестройке частоты сигнала возбуждения могут быть использованы при выборе режимов управления в измерительных системах с перестройкой частоты.

Способ измерения параметров КС ВВД с подержанием разности фазы между сигналом возбуждения и выходным сигналом датчика, равной 90°, путем подстройки частоты сигнала возбуждения реализован в модифицированном варианте Анализатора низкотемпературных свойств жидкостей, что позволило повысить повторяемость и уменьшить погрешность измерения теплофизических характеристик жидкостей.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории электрических цепей, методы обработки электрических сигналов, теории случайных процессов, теории погрешностей, теории колебательных процессов, численные методы компьютерного моделирования. Численное моделирование процессов в КС проводилось в среде MatLab. Обработка результатов эксперимента осуществлялась с использованием стандартных программ MS Office.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Применение режима вынужденных колебаний на собственной частоте КС позволяет снизить погрешность измерения добротности КС с быстро изменяющимися параметрами в диапазоне низких значений добротности.

2. Предложенный режим вынужденных колебаний КС с поддержанием разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика КС, равной 90°, путем подстройки частоты возбуждающего сигнала позволяет повысить отношение сигнал/шум и снизить погрешность измерения собственной частоты КС в нестационарном режиме работы, что особенно актуально для датчиков с низкодобротными КС.

3. При заданной скорости изменения параметров КС шаг перестройки частоты генератора сигнала возбуждения КС ВВД предлагается выбирать из условия, при котором изменение фазы сигнала отклика, вызванное переходными процессами перестройки генератора, равно уровню фазовых шумов в датчике и не оказывает влияния на погрешность измерения параметров сигнала отклика КС.

4. Способ определения добротности электромеханических КС по их фазочастотной характеристике в режиме вынужденных колебаний с периодическим

отклонением на заданное значение от 90° разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика путем перестройки частоты сигнала возбуждения позволяет (при заданной погрешности) в 3...5 раз сократить время, необходимое на определение добротности КС, и упростить ее расчет, что особенно актуально для датчиков с низкодобротными КС.

5. Стабильность частоты колебаний КС ВВД в режиме вынужденных колебаний с поддержанием разности фазы между сигналом возбуждения и сигналом отклика, равной 90°, возрастает на порядок по сравнению с автоколебательным режимом.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы 14-19 Всероссийских (региональных) локлалывались и обсуждались на молодежных научных школах-семинарах «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (г. Ульяновск, 2010-2016г.), научно-практической конференции «Научное приборостроение - современное состояние и перспективы развития» (г. Москва 2016г.), международной научно-технической конференции «ИНТЕРМАТИК-2016» (г. Москва, 2016г.), XIII международной научнотехнической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2016 (г. Новосибирск, 2016г.), всероссийской научнотехнической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная ТУСУР-2015» (г. Томск, 2015г.), 13-й международной научной сессия конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волновой оптики: физические свойства и применение» (г. Саранск, 2014г.), 48-й научнотехнической конференции «Вузовская наука В современных условиях» (г.Ульяновск, 2014г.), 8-й всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ) (г. Ульяновск, 2013 г.), молодёжной научно-технической конференции «Автоматизация процессов управления» (г. Ульяновск 2011г.).

Реализация и внедрение результатов работы. На основе разработанных способов и алгоритмов созданы лабораторные стенды для исследования теплофизических свойств жидкостей в УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН при проведении исследований. Разработанные способы и устройства были

использованы при исследовании низкотемпературных свойств дизельных и проводимых В рамках тематического НИР авиационных топлив, плана (Приложение А). Результаты работы использованы при выполнении проекта №10258 «Разработка эффективного метода и средств обработки измерительной информации аппаратно-программного комплекса «ИРЭН2.4» по программе У.М.Н.И.К. Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научнотехнической сфере (контракт № 7462р/10267 от 30.01.2010 г.) и проекта №21943 «Разработка опытного образца экспресс-анализатора низкотемпературных свойств нефтепродуктов с улучшенными метрологическими характеристиками» по программе «СТАРТ-2013» Фонда содействия развитию малых форм научно-технической сфере №11950p/21943 предприятий В (контракт ОТ 27.06.2013).

Личный вклад автора. Результаты диссертационной работы, апробация предложенного способа и алгоритмов, а также основные положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Обсуждение и интерпретация экспериментальных результатов проводились совместно с соавторами, где вклад автора диссертационной работы был определяющим.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 32 работы, в том числе 8 статей в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ, получено 3 патента РФ на изобретения, 1 патент на полезную модель и 2 решения о выдаче патента на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 190 наименований, 7 приложений. Общий объем диссертации составляет 178 страниц, включая 9 таблиц и 116 рисунков.

Глава 1. Датчики на основе электромеханических колебательных систем

1.1 Принципы измерений с использованием колебательных систем

Колебательная система (КС) – физическая система, в которой в результате нарушения состояния равновесия могут существовать свободные колебания, то есть периодические изменения свойства (параметра) системы [17].

КС делятся на консервативные (без потерь энергии), диссипативные (колебания затухают из-за энергетических потерь; например, маятник, колебательный контур) и активные, в число которых входят автоколебательные (потери энергии пополняются за счет источника энергии; например генераторы электрических колебаний) [1,2]. КС различают также по числу степеней свободы [17–19].

По физической природе изменяющихся свойств КС различают:

- механические колебательные системы [17–19,35–37];
- электрические колебательные системы [17,38–40];
- акустические колебательные системы [41–45];
- оптические колебательные системы [46,47].

Различные виды КС широко используются в современной технике, в том числе и в измерительной технике. На основе КС разработаны различные [17–19,35–37], [46,47], [41-45] механизмы оптические акустические И электронные устройства [17,35,38–40]. КС являются основным компонентом многих электрических и электромеханических датчиков [19-41]. Изменение параметров КС, входящий в состав таких датчиков, свидетельствует о изменении измеряемых величин [1-32,35-41]. Зная взаимосвязь измеряемой физической величины с параметрами КС по параметрам колебаний КС вычисляется интересующая величина [18,19,36-41]. Таким образом измерение параметров КС является основной задачей при использовании датчиков на основе КС.

1.2 Виды датчиков на основе резонансных колебательных систем с электрическим возбуждением

1.2.1 Резонансный механический частотомер

Простейший резонансный механический частотомер представляет собой ряд упругих пластин, закрепленных одним концом на едином основании [42]. Толщину пластин, их длину и массу подбирают таким образом, чтобы частоты их собственных колебаний составили некую дискретную шкалу, по которой и определяют значение измеряемой частоты. Колебания основания вызывают колебания пластин, при этом максимальная амплитуда колебаний наблюдается у той пластины, у которой частота собственных колебаний (ω_0) равна (или близка по значению) измеряемой частоте.

Одним из первых частотомеров для измерения частоты электрических колебаний был электромеханический частотомер вибрационного типа. Он состоит из соленоида и ряда упругих пластин (как в механическом частотомере) на едином основании. Основание соединено с якорем соленоида (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1. – Электромеханический резонансный частотомер: М – электромагнит; А – стальной якорь; К – стальной брусок; Z – резонирующие стальные язычки; F –гибкое крепление

Измеряемый электрический сигнал подают в обмотку соленоида. Возбуждаемые при этом механические колебания якоря через основание передаются пластинам, по вибрации которых определяют значение измеряемой частоты. Он может быть построен для частот от единиц до нескольких тысяч герц.

1.2.2 Пьезорезонансные датчики

В пьезорезонансных датчиках [5,15,43,44] роль чувствительного элемента (ЧЭ) выполняет пьезоэлектрический резонатор (ПР) – электромеханическое устройство возбуждения механических колебаний представляющее собой пластину из пьезоэлектрического материала с системой электродов. В основе работы ПР лежит пьезоэффект, обеспечивающий преобразование электрического напряжения, подводимого к электродам, в механические напряжения в теле вибратора (обратный пьезоэффект) или наоборот – преобразование деформаций устройства возбуждения под воздействием механических напряжений (прямой пьезоэффект) в э.д.с. на электродах. Различают пьезорезонансные датчики давления, в которых чувствительный ПР работает в прямом контакте со средой и датчики, у которых ПР отделен от среды разделительным (упругим) элементом.



М – мембрана; К – корпус; УЭ – упругий элемент; ЖЦ – жёсткий центр Рисунок 1.2. – Виды датчиков давления на основе пьезорезонансных явлений

Большинство пьезорезонансных датчиков строится с упругим элементом в виде разделительного элемента, которые обеспечивают вакуумизацию или герметизацию ПР в объеме, заполненном инертным газом, что повышает добротность и снижает старение ПР. Упругий элемент должен обеспечивать деформации пластины-резонатора строго в плоскости пьезоэлемента.

Недостатки пьезорезонансных датчиков давления:

- 1. Значительная нелинейность около 1,7%.
- 2. Дрейф нуля датчика во времени, вызванный старением резонатора.
- 3. Необходимость вакуумирования или герметизации резонатора.
- 4. Наличие температурного дрейфа нуля датчика.

1.2.3 Струнные датчики

Струнными датчиками называют датчики, ЧЭ которого выполнен в виде электромеханического струнного преобразователя (рисунок 1.3) [1–4, 45]. Струна одним концом крепится к основанию, а другой её конец растягивается измеряемой силой *P*. Частота собственных поперечных колебаний струны связана с силой P натяжения

зависимостью: $f = \frac{1}{2\ell} \sqrt{\frac{P}{m}}$, где *m* и *l* – масса и длина струны [3].



Рисунок 1.3. – Принципиальная схема струнного датчика давления

Электромагнитный приемник размещен вблизи струны. Сигнал приемника подводится к усилителю обратной связи, который формирует выходной сигнал и сигнал возбуждения колебаний струны. Устройства возбуждения колебаний бывают электромагнитные, магнитоэлектрические, электростатические (рисунок 1.4) [3].

Контур, содержащий электромагнитный приемник и усилитель обратной связи, обеспечивает поддержание колебаний постоянной амплитуды на частоте, равной резонансной частоте струны. Изменение силы *Р* будет изменять её натяжение и, следовательно, собственную частоту колебаний.

Частоты колебаний струны в датчиках лежат в пределах $4 \cdot 10^2 - 10^4$ Гц. Струнные датчики применяются для измерений динамических процессов с частотой колебаний 100 – 150 Гц. С использованием тонких струн (0,01 – 0,02 мм) разрабатывают миниатюрные струнные датчики [1–4, 45]. В струне механические напряжения должны быть в пределах 2 – 6 МПа. При значениях менее 1,5 МПа форма колебания струны становятся несинусоидальными [1–4, 45].



а) электромагнитный; *б*) магнитоэлектрический; *в*) электростатический. Рисунок 1.4. – Виды устройств возбуждения колебаний струны

Струнные датчики имеют нелинейность характеристики менее 0,1%, температурную погрешность не более 0,1% на 10 °C, порог чувствительности 0,05% от измеряемого давления.

1.2.4 Микромеханические зондовые датчики – кантилеверы

Начиная с 90-х годов прошлого века, активно разрабатываются микромеханические КС с электрическим возбуждением, применяемые в зондовой микроскопии [48–56]. Сканирование поверхности в туннельном [53–56] и атомно-силовом [48–52] зондовых микроскопах осуществляется с помощью специальных зондов, представляющих собой упругую консоль – кантилевер (cantilever) с острием на конце (рисунок 1.5). Упругие консоли формируются методами фотолитографии и травления, в основном, из тонких слоев легированного кремния, SiO₂ или Si₃N₄.



Рисунок 1.5. – Изображение датчика атомно-силового микроскопа (схематично)

Силу взаимодействия зонда с поверхностью F можно оценить по формуле: $F = k \cdot \Delta Z$, где k – жёсткость кантилевера; ΔZ – величина, характеризующая его изгиб. Коэффициенты жесткости кантилеверов k варьируются в диапазоне 10^{-3} ÷10 Н/м в зависимости от используемых при их изготовлении материалов и геометрических размеров. При работе зондовых датчиков в колебательных режимах важны резонансные свойства кантилеверов. Собственные частоты изгибных колебаний консоли прямоугольного сечения (рисунок 1.6) определяются формулой: $\omega_{ri} = \frac{\lambda_i}{l^z} \sqrt{\frac{EJ}{\rho S}}$, где *l* – длина консоли; *E* – модуль Юнга; *J* – момент инерции сечения консоли;

где i – длина консоли, E – модуль юнга, J – момент инерции сечения консоли, ρ – плотность материала; S – площадь поперечного сечения; λ_i – численный коэффициент (в диапазоне 1÷100), зависящий от моды изгибных колебаний.



Рисунок 1.6. – Основные моды изгибных колебаний консоли

Частоты основных мод лежат в диапозоне $10\div1000$ кГц. Добротность кантилеверов, в основном зависит от среды, в которой они работают. Типичные значения добротности при работе в вакууме составляют $10^3\div10^4$. На воздухе добротность снижается до 300–500, а в жидкости – падает до 10–100 [56].

Для регистрации и преобразования колебаний зонда в электрический сигнал используются фотоэлектрические преобразователи (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7. – Схема оптической регистрации изгиба консоли зондового датчика атомно-силового микроскопа

Луч лазера отраженный от поверхности на краю консоли попадает на четырехквадрантный фотодиод. Амплитуда колебаний зонда определяется по разности фотоэдс отдельных сегментов фотодиода [56–59].

1.2.5 Вискозиметрические датчики колебательного типа

Методы вибрационной вискозиметрии основаны на определении изменений параметров вынужденных колебаний тела правильной геометрической формы (зонд вибрационного вискозиметра) при погружении его в исследуемую среду (рисунок 1.8) [10,11,19,37,60,61].



Рисунок 1.8. – Вибрационный вискозиметр (схематично)

Вязкость η исследуемой среды определяется по форме, амплитуде и частоте колебаний зонда с использованием калибровочных кривых вискозиметра.

В вибрационном методе существует три подхода к измерению вязкости.

а) Для измерения вязкости менее вязких сред ($\eta \le 25$ Па×с) наиболее подходящим является амплитудно-резонансный вариант. В этом случае путём подбора частоты колебаний добиваются того, чтобы амплитуда *А* колебаний зонда была максимальной. Измеряемым параметром, по которому определяется вязкость, в этом случае будет амплитуда колебаний зонда вискозиметра [19].

б) Частотно-фазовый вариант вибрационного метода используется для сильно вязких жидкостей ($\eta > 20$ Па×с). В этом случае вязкость определяют по разности собственных частот колебаний зонда вискозиметра не погруженного (ω_0), и погруженного (ω_{∞}) в жидкость [19].

в) Для исследования жидкостей с очень большим коэффициентом динамической вязкости (η > 10⁶ Па×с) используется фазово-вибрационный метод, состоящий в измерении фазового сдвига φ между сигналом возбуждения и колебаниями измерительного зонда. По измеренной разности фаз, с учетом типа КС и геометрии зонда вычисляется значение вязкости [19].

Преимущества вибрационного метода заключаются в том, что система возбуждения и измерительная система могут располагаются вне зоны измерения и не подвержены температурным колебаниям при проведении испытания. Однако при реализации вибрационнного метода возникает проблема с выбором размера зонда. При больших размерах зонда невозможно измерить вязкость жидкости локально. Для раскачки большого зонда необходимо затрачивать большое количество энергии, которая, в свою очередь, передаётся в виде тепла жидкости. При очень малых размерах зонда ухудшается чувствительность вискозиметра.

Метод вибрационной вискозиметрии реализован во многих промышленно выпускаемых вибровискозиметрах [6,16,62–65] и в Анализаторе низкотемпературных свойств жидкостей, разработанном в УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН [10,11,37,60,61,66–75].

1.3 Модели резонансных колебательных систем

1.3.1 Свободные колебания в системах с одной степенью свободы

Одной из самых простых и удобных для анализа механических КС с одной степенью свободы является система в виде закрепленной с одной стороны невесомой пружины с коэффициентом жесткости k, на другом конце которой сосредоточена тело массой M (рисунок 1.9) [17–19]. В КС всегда имеется сопротивление, препятствующее движению (трение), которое вызывает затухание колебаний. Для учета этого сопротивления вводят коэффициент h демпфирования КС.

Свободные колебания для КС, представленной на рисунке 1.9 а, описываются уравнением

$$M\frac{d^2y}{dt^2} = -ky - h\frac{dy}{dt},$$
(1.1)

где y – отклонение центра масс от положения равновесия, t – время.



Рисунок 1.9. – Схемы механических КС с горизонтальным (а) и вертикальным (б) перемещением

Для КС, подобных представленной на рисунке 1.9, б, свободные колебания описываются уравнением:

$$M\frac{d^2y}{dt^2} = -k(y+\partial_{cm}) - h\frac{dy}{dt} + Mg, \qquad (1.2)$$

где ∂_{cm} – статический осадок (величина растяжения упругого подвеса), *g* – ускорение свободного падения.

Уравнение (1.2) в силу соотношения $k\partial_{cm} = Mg$ приводится к уравнению (1.1), то есть, статические силы, приложенные к колеблющейся массе, не приводят к изменению характера свободного колебания.

Разделив (1.1) на М получим:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\vartheta \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = 0, \qquad (1.3)$$

где $\omega_0 = \sqrt{k/M}$ собственная (угловая) частота, то есть частота свободных колебаний КС при отсутствии сопротивления, а $\vartheta = \frac{h}{2M}$ – коэффициент затухания.

Общее решение дифференциального уравнения (1.3), как известно, имеет вид:

$$y = e^{-\Re t} (C_1 e^{t\sqrt{\Re^2 - \omega_0^2}} + C_2 e^{-t\sqrt{\Re^2 - \omega_0^2}}), \qquad (1.4)$$

где С₁ и С₂ – постоянные интегрирования, определяемые начальными условиями.

В зависимости от соотношений ω₀ и θ различают три частных случая:

 $\vartheta = \omega_0 - \kappa$ ритическое затухание;

 $\vartheta < \omega_0$ слабое или субкритическое затухание;

 $\omega_0 < \vartheta$ сильное или суперкритическое затухание.

Для субкритического затухания решение (1.4) примет вид:

$$y = e^{-9t} (a \cos \omega_{\pi} t + b \sin \omega_{\pi} t), \qquad (1.5)$$

где $\omega_{\mathcal{A}} = \sqrt{\omega_0^2 - \vartheta^2} - демпфированная частота.$

Движение, описываемое этим решением, имеет колебательный характер с затуханием (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10. – Свободные колебания в системе с различными значениями затухания при одних и тех же начальных условиях: $y(0) = y_0$, $y'(0) = v_0$

Значения постоянных а и b находятся из начальных условий: для смещения

 $y(0) = y_0$ и скорости у '(0) = v_0 массы в момент t = 0:

$$a = y_0; \ b = \frac{v_0 + 9y_0}{\omega_{\pi}}.$$
 (1.6)

В общем случае, когда $\vartheta \neq 0$, выражение (1.5) может быть записано в виде

$$y = e^{-\theta t} A \sin(\omega_{\mathcal{A}} t + \beta).$$
(1.7)

где постоянные А и в определяются из начальных условий:

$$A = \frac{1}{\omega_{\mathcal{A}}} \sqrt{(\omega_{\mathcal{A}} y_0)^2 + (v_0 + \vartheta y_0)^2};$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\omega_{\mathcal{A}} y_0}{v_0 + \vartheta y_0}.$$
 (1.8)

В случае суперкритического затухания выражение (1.4) примет вид [2]:

$$y = e^{-\vartheta t} \left(a \cdot ch(\zeta t) + b \cdot sh(\zeta t) \right), \tag{1.9}$$

где

$$\zeta = \sqrt{\vartheta^2 - \omega_0^2} , \qquad (1.10)$$

и движение массы *M* (рисунок 1.11) будет иметь апериодический затухающий характер.



Рисунок 1.11. – Свободные колебания в системе с различным значением критического и суперкритического затухания при одних и тех же начальных условиях

В случае критического затухания выражение (1.4) примет вид:

$$y = C_1 t e^{-\omega_0 t} + C_2 e^{-\omega_0 t}, \qquad (1.11)$$

При этом движение массы *M*, как и в случае суперкритического затухания, будет иметь апериодический характер (рисунок 1.11) [18].

1.3.2 Вынужденные колебания

Предположим, что вынуждающая сила F_e действует периодически с круговой частотой ω_e и изменяется по закону: $F_e = F_o \sin \omega_e t$, где F_o – амплитуда вынуждающей силы. Для этого случая уравнение движения массы М имеет вид [17–19]:

$$M\frac{d^2y}{dt^2} = -ky - h\frac{dy}{dt} + F_0 \sin\omega_s t , \qquad (1.12)$$

Сохраняя обозначения $\omega_0 = \sqrt{k/M}$, $h/M = 2\theta$, и обозначив $F_0/M = f_0$, приведем уравнение (1.12) к виду:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\Theta \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = f_0 \sin \omega_e t, \qquad (1.13)$$

Решение этого уравнения представляет функцию, которая графически представлена на рисунок 1.12, и состоит из двух частей. Одна из них соответствует неустановившемуся режиму колебаний, когда их амплитуда зависит от времени. Вторая часть описывает установившийся режим колебаний.



Рисунок 1.12. – Установление вынужденных колебаний в колебательной системе

В установившемся режиме вынужденных колебаний смещение *х* подчиняется гармоническому закону и происходит с частотой, равной частоте действия вынуждающей силы:

$$y = A \cdot \sin(\omega_e t + \varphi_0) \tag{1.14}$$

Установившаяся амплитуда A и фаза φ_0 вынужденных колебаний, зависит от параметров системы (частоты собственных колебаний ω_0 и коэффициента затухания θ) и от характеристик вынуждающей силы (f_0 и ω_6):

$$A = f_0 / \sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega_s^2\right)^2 + 4\theta^2 \omega_s^2}; \qquad (1.15)$$

$$tg\phi_0 = -2\theta\omega_{_{\theta}}/(\omega_{_{\theta}}^2 - \omega_0^2). \qquad (1.16)$$

Из (1.15) следует, что амплитуда колебаний в КС принимает максимальное значение *А_{max}* при условии:

$$\omega_{e} = \sqrt{\omega_{0}^{2} - 2\theta^{2}} . \qquad (1.17)$$

При отсутствии затухания в системе ($\theta = 0$) резонанс наступал бы при условии $\omega_0 = \omega_s$) и амплитуда стремилась бы к бесконечно большому значению [18].

1.3.3 Принцип электромеханической аналогии

При анализе механических КС широко применяется принцип электромеханической аналогии, который заключается в том, что элементы механической КС рассматриваются как аналоги элементов некоторой электрической схемы, которую называют эквивалентной данной механической КС [17–19]. Анализ эквивалентной схемы производится по законам анализа электрических цепей и колебательные процессы в них описываются уравнениями для электрических цепей.

Сравнивая дифференциальное уравнение для напряжений в последовательном колебательном *RLC*-контуре:

$$L\frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{C}\int Idt = U, \qquad (1.18)$$

и уравнение движения осциллятора

$$M\frac{dy}{dt} + ky + h\int ydt = F, \qquad (1.19)$$

убеждаемся в их подобии; естественно, аналогичны и их решения для тока и скорости. Список некоторых взаимных аналогов – механических и электрических величин – представлен в таблице 1.1[18].

Формальное подобие уравнений (1.18) и (1.19), отражает физическое соответствие процессов в механической системе и эквивалентной ей электрической цепи. Например, инерция массы препятствует мгновенному изменению скорости при воздействии (прекращении) силы, равно как индуктивность препятствует мгновенному изменению тока при включении (выключении) источника э. д. с. В случаях сложных механических систем с произвольным числом степеней свободы эквивалентная схема имеет столько же замкнутых электрических контуров, сколько и степеней свободы КС; при этом элементы, содержащиеся в двух соседних замкнутых цепях, следует рассматривать как элементы связи.

Переменные и параметры КС		
сила <i>F</i> , H	э. д. с. (напряжение) <i>и</i> , <i>В</i>	
скорость <i>у</i> ', <i>м/с</i>	сила тока <i>I</i> , А	
смещение у, м	заряд q, Кл	
масса <i>т</i> , кг	индуктивность L, Г	
гибкость C _м м/Н	электрическая емкость С Ф	
инерционное сопротивление ωm, κг/с	индуктивное сопротивление ωL , Ом	
коэффициент трения <i>r, кг/с</i>	активное сопротивление <i>R</i> , Ом	
упругое сопротивление $1/\omega C_{M}$, кг/с	емкостное сопротивление 1/ <i>w</i> C, Ом	
механический импеданс z, кг/с	электрический импеданс Z, Ом	

Таблица 1.1 – Соответствие между механическими и электрическими величинами. Переменные и параметры КС

1.4 Способы и режимы электрического возбуждения колебательных систем

1.4.1 Способы возбуждения электромеханических колебательных систем

Для возбуждения колебаний в механических КС используют следующие основные методы: механические, магнитные, электростатические, магнитострикционные и пьезоэлектрические [8,20,21,76–84].

Механический метод возбуждения вынужденных колебаний КС предполагает воздействие силы, приложенной извне и не зависящей от параметров системы. Это может быть воздействие непосредственно на колеблющуюся массу, точку крепления пружины или подвижное основание. Как правило механический способ возбуждения КС применяется в диапазоне частот от 0,1 до 300 Гц [21,77–80].

Магнитный метод возбуждения вынужденных колебаний КС разделяют на два способа: электромагнитный и магнитоэлектрический [74,80].

При электромагнитном способе возбуждения с помощью электромагнитной катушки (соленоида) создается переменное магнитное поле, взаимодействующее с объектом (рисунок 1.13) [14]. При этом способе возбуждения следует иметь ввиду, что переменный ток, пропускаемый через соленоид без постоянного тока подмагничивания, равного или превышающего амплитуду переменного тока, будет

создавать в КС колебания на удвоенной частоте, а форма возбуждающей силы будет соответствовать форме выпрямленного переменного тока [74, 17–19].

При магнитоэлектрическом способе возбуждения также с помощью соленоида создается переменное магнитное поле, но в отличии от электромагнитного способа это переменное магнитное поле взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита (рисунок 1.14)[18].





Рисунок 1.13. – Иллюстрация электромагнитного способа возбуждения КС

Рисунок 1.14. – Иллюстрация электромагнитного способа возбуждения КС

В этом способе не требуется задавать дополнительный ток подмагничивания, а форма возбуждающей силы будет соответствовать форме переменного тока. Магнитоэлектрический способ возбуждения применяется, как правило, в диапазоне частот от едениц герц до десятков килогерц [74–85].

Электростатический способ возбуждения состоит в создании возбуждающей силы с помощью электрического поля между электродом и чувствительным элементом КС (рисунок 1.15) [24].



Рисунок 1.15. – Иллюстрация электростатического способа возбуждения КС

Этот способ чаще всего применяется для возбуждения КС с очень малой массой колеблющегося тела в диапазоне частот от нескольких сотен килогерц до нескольких сотен мегагерц [8,20,24].

Магнитострикционный метод возбуждения колебаний заключается в том, что под действием магнитного поля на тело из ферромагнитного материала (или материала обладающего магнитострикционным эффектом) геометрические размеры тела изменятся – тело деформируется. Если же ферромагнитный стержень сжимать или растягивать, то его намагниченность будет изменяться. При механическом воздействий на такой стержень в катушке, намотанной на стержень, возникнет переменный ток. Магнитострикционный эффект обычно используют для возбуждения ультразвуковых волн. Верхняя частота возбуждаемых колебаний ограничивается свойствами материала и составляет десятки мегогерц [83,84].

Пьезоэлектрическое возбуждение основано на использовании обратного пьезоэффекта [81], который заключается в том, что некоторые кристаллические вещества (пьезоэлектрики) деформируются под действием приложенного к ним электрического напряжения. Изменение полярности приложенного напряжения на противоположную меняет деформацию сжатия на деформацию растяжения. Схема с пьезоэлектрическим возбуждением вибрации представлена на рисунке 1.16.



Рисунок 1.16. – Схема с пьезоэлектрическим возбуждением вибрации

1.4.2 Ударное возбуждение колебательной системы

Для возбуждения КС могут использоваться импульсные (широкополосные) источники сигнала возбуждения. Действие таких источников основано на преобразовании различных видов энергии для создания коротких (по сравнению с периодом собственных колебаний системы) импульсных воздействий [82].

Рассмотрим динамические состояния механических систем при действии ударных нагрузок для трех видов импульсов, показанных на рисунке 1.17, а.

При анализе воздействия *ударного дельта-импульса* на механическую конструкцию принимается допущение о «мгновенном» изменении скорости v_0 в момент соударения с платформой свободно падающего тела массой *m* (рисунок 1.17, *б*) и свободном колебательном послеударном движении.



Рисунок 1.17. – Вынужденные колебания при ударном воздействии: *а* – формы ударных импульсов (1 – дельта-импульс; *2* – полусинусоидальный импульс; *3* — прямоугольный импульс); *б* – модель для случая свободных колебаний; *в* – модель для случая вынужденных колебаний

Воздействие ударного импульса со стороны платформы происходит через упругий элемент с жесткостью *k*. В этом случае движение тела будет описываться дифференциальным уравнением второго порядка (см. раздел 1.2):

$$my'' + hy' + ky = 0, (1.20)$$

решение которого имеет вид: $y(t) = A_1 sin \omega_0 t + A_2 cos \omega_0 t$.

С учетом того, что при начальных условиях y(0) = 0 и $y(0) = v_0$ коэффициенты $A_1 = v_0 / \omega_0$ и $A_2 = 0$, можно записать:

$$y(t) = (v_0 / \omega_0) \sin \omega_0 t , y(t) = -v_0 \omega_0 \sin \omega_0 t .$$
(1.21)

Степень ударного возбуждения характеризует коэффициент передачи ударной нагрузки, максимальное значение которого в рассматриваемом случае равно

$$\lambda_{y\partial,\max} = z''_{\max} / g = v_0 \omega_0 g. \qquad (1.22)$$

При воздействии ударного импульса вида полусинусоиды $\alpha(t) = G \sin \omega t$ в механической КС (рисунок 1.17, *в*) возникает сложное движение: во время действия ударного импульса ее движение происходит по закону вынужденных колебаний, а после прекращения его действия – по закону свободных колебаний с начальными условиями, соответствующими параметрам движения КС в момент окончания действия ударного импульса. Для этого случая дифференциальное уравнение движения центра масс имеет вид

$$z'' + \omega_0^2 z = G \sin \omega t , \qquad (1.23)$$

где $\omega = \pi/\tau$ – угловая частота; τ – длительность ударного импульса.

Общее решение уравнения (1.23) имеет вид (см. раздел.1.2)

$$y(t) = A_{co\delta} \sin \omega_0 t + A_{\rm GBH} \sin \omega t, \qquad (1.24)$$

где A_{coo} и $A_{вын}$ – амплитуды собственных и вынужденных колебаний.

Опуская промежуточные выкладки, запишем выражение для коэффициента передачи по ускорению для полусинусоидального ударного импульса:

$$\lambda_{y\partial \sin} = [2v/(v^2 - l)]\cos(2v),$$
 (1.25)

где $v = \omega / \omega_0 -$ расстройка частоты.

При воздействии *прямоугольного ударного импульса* длительностью т дифференциальное уравнение движения тела имеет вид [87]

$$z'' + \omega_0^2 z = G, \qquad (1.26)$$

и выражение для коэффициента передачи по ускорению в этом случае имеет вид:

$$\lambda_{y\partial np} = 2\sin [\pi/(2v)].$$
 (1.27)

Графики зависимостей (1.25) и (1.27) коэффициента передачи по ускорению от рассогласования частоты возбуждения приведены на рисунке 1.18 [82].



Рисунок 1.18. – Графики коэффициента передачи по ускорению для полусинусоидального (*a*) и прямоугольного (*б*) импульсов ударной нагрузки

1.5 Преобразование механических колебаний в электрический сигнал

Регистрацию колебаний КС осуществляют с помощью различных датчиков перемещения. По принципу действия датчики перемещения могут быть емкостными, оптическими, индуктивными, вихретоковыми, ультразвуковыми, магниторезистивными, потенциометрическими, магнитострикционными, на основе эффекта Холла [85–97].

В основе работы *емкостных датчиков перемещения* лежит связь ёмкости конденсатора с его геометрической конфигурацией. В простейшем случае речь идёт об изменении расстояния между пластинами вследствие внешнего физического воздействия (рисунок 1.19) [85,86]. Изменение ёмкости можно регистрировать различными способами, например, измеряя его импеданс.





Другой схемой, где выходным параметром является электрическая ёмкость, является схема, содержащая конденсатор с подвижным диэлектриком (рисунок 1.20) [86,87].



Рисунок 1.20. — Емкостной датчик линейного перемещения с подвижным диэлектриком

Перемещение диэлектрической пластины, механически связанной с колеблющимся телом, между обкладками конденсатора приводит к изменению его ёмкости, что свидетельствует о перемещении тела. Если сам объект состоит из диэлектрика и имеет подходящую форму и размеры – он может быть использован непосредственно в качестве диэлектрической среды в конденсаторе [85–88].

Важным достоинством *оптических датчиков перемещения* является возможность бесконтактных измерений, кроме того такие датчики обычно довольно точны и имеют высокое быстродействие.

Пожалуй, наиболее популярной является схема оптической триангуляции (рисунок 1.21) [85,89]. Датчик положения является, по сути, дальномером, который регистрирует рассеянное поверхностью объекта излучение и определяет угол отражения, что позволяет определить расстояние до объекта.





В оптическом датчике малых перемещений и вибраций используется двойная решётчатая конструкция, источник света и фотодетектор (рисунок 1.22).

Одна решётка неподвижна, вторая подвижна и механически связана перемещающимся объектом. Смещение подвижной решётки приводит к изменению интенсивности света, регистрируемой фотодетектором. С уменьшением периода решётки точность датчика возрастает, однако сужается его динамический диапазон.

Дополнительными возможностями обладают оптические датчики, использующие поляризацию света. В таких датчиках может быть реализован алгоритм селекции объектов по отражательным свойствам поверхности [85,89,90].



Рисунок 1.22. – Оптический датчик перемещения на основе дифракционных решеток

В индуктивных датчиках перемещения чувствительным элементом является трансформатор с подвижным сердечником [85]. Перемещение контролируемого объекта приводит к перемещению сердечника, что вызывает изменение потокосцепления между первичной и вторичной обмотками трансформатора (рисунок 1.23)[85,89,91]. Амплитуда сигнала во вторичной обмотке зависит от потокосцепления и по значению этой амплитуды можно судить о положении сердечника, а значит и о положении объекта.



Рисунок 1.23. – Индуктивный датчик перемещения на трансформаторе (б) на электромагните

Другая конфигурация имеет более простую схему, однако она пригодна лишь для таких приложений, где требуется определять перемещения или вибрации объектов, состоящих из ферромагнитного материала. В данной схеме интересующий ферромагнитный объект играет роль магнитопровода, положение которого влияет на индуктивность измерительной катушки (рисунок 1.23, б) [91].

Вихретоковые датчики перемещения содержат генератор магнитного поля и регистратор, с помощью которого определяется величина индукции вторичных магнитных полей [85]. Вблизи интересующего объекта генератор создаёт магнитное поле, которое, пронизывая материал объекта, порождает в его объёме вихревые токи (токи Фуко), которые, в свою очередь, создают вторичное магнитное поле (рисунок 1.24)[92]. Параметры вторичного поля определяются регистратором, и по их значению вычисляется расстояние до объекта. Метод является бесконтактным, однако может применяться только для металлических тел [85,91–93].



Рисунок 1.24. – Вихретоковый датчик перемещения

В ультразвуковых датчиках перемещения реализован принцип радара – фиксируются отражённые от объекта ультразвуковые волны. В состав датчика входят источник и приемник ультразвуковых волн (рисунок 1.25) [85].

По временной задержке между излученным и принятым ультразвуковыми импульсами можно определять расстояние до объекта с точностью до десятых долей миллиметра. Наряду с оптическими, ультразвуковые датчики на сегодняшний день являются, пожалуй, наиболее универсальным и технологичным бесконтактным средством измерения [94].



Рисунок 1.25. – Ультразвуковой датчик перемещения

В *магниторезистивных датчиках перемещения* используется зависимость электрического сопротивления магниторезистивных пластинок от направления и величины индукции внешнего магнитного поля. Датчик, как правило, состоит из постоянного магнита и электрической схемы, содержащей включённые по мостовой схеме магниторезистивные пластинки и источник постоянного напряжения (рисунок 1.26). Интересующий объект, состоящий из ферромагнитного материала, перемещаясь в магнитном поле, изменяет его конфигурацию, вследствие чего изменяется сопротивление пластинок, и мостовая схема регистрирует рассогласование, по величине которого можно судить о положении объекта [85].



Рисунок 1.26. – Магниторезистивный датчики перемещения

Датчики на основе эффекта Холла. Датчики этого типа имеют конструкцию подобную конструкции магниторезистивных датчиков, однако в основу их работы положен эффект Холла — прохождение тока через проводник, на который воздействует внешнее магнитное поле, приводит к возникновению разности потенциалов в поперечном сечении проводника [85,95].

Магнитострикционный датчик перемещения представляет собой протяжённый канал – волновод, вдоль которого может свободно перемещаться постоянный кольцевой магнит. Внутри волновода содержится проводник, при подаче на него электрических импульсов вдоль проводника создается магнитное поле (рисунок 1.27) [96], которое складываясь с полем постоянного магнита, создаёт момент вращения волновода (эффект Вайдемана). Импульсы вращения распространяются по волноводу в обе стороны со скоростью звука материала канала. Регистрация временной задержки между включением электрического импульса и приёмом импульса вращения позволяет определить расстояние до постоянного магнита.



Рисунок 1.27. – Магнитострикционный датчик перемещения

Волновод может иметь длину до нескольких метров, а положение магнита может быть определено с точностью до нескольких микрометров. Магнитострикционные датчики обладают хорошим разрешением, устойчивостью к внешним условиям и низкой чувствительностью к изменениям температуры [96,97].

Потенциометрические датчики перемещения в своей основе имеет электрический контур, содержащий потенциометр (рисунок 1.28).



Рисунок 1.28. – Потенциометрический датчик перемещения

Линейное перемещение объекта приводит к изменению сопротивления потенциометра и при протекании по нему тока падение напряжения на нём будет пропорционально величине перемещения объекта [85,97]. Потенциометрические датчики перемещения получили широкое распространение из-за простоты и низкой стоимости, однако для прецизионных и бесконтактных измерений в последнее время чаще всего используются датчики на основе оптических эффектов.

1.6 Измерение параметров колебательных систем в динамических режимах

Во многих технических задачах необходимо обеспечить точное измерение изменяющихся во времени физических величин (ФВ). Особенностью датчиков на основе КС применительно к измерению изменяющихся ФВ является изменение формы колебаний, их отклонение от синусоидальной формы при гармоническом возбуждении. При этом критерием оценки скорости изменения измеряемой ФВ является отношение порога чувствительности датчика к значению изменения измеряемого параметра за период колебаний.

Во многих технических приложениях используются совместные измерения, когда одновременно измеряется две или более ФВ. Типичным примером такой задачи является определение температурных зависимостей вязкости жидкостей. С уменьшением температуры вязкость жидкостей растет, и сопротивление движению ЧЭ датчика возрастает. При этом измерение вязкости, как правило, производится в режиме непрерывного изменения температуры.

1.6.1 Измерение параметров электромеханической колебательной системы в режиме сканирования по частоте возбуждающего сигнала

1.6.1.1 Измерение параметров колебательной системы способом расстройки частоты возбуждающего сигнала по изменению амплитуды

Функциональная схема для реализации способа показана на рисунке 1.29 [98–101]. При реализации способа генератор сигнала возбуждения настраивается на частоту ω_p , при которой амплитуда колебаний КС максимальна – на резонансную частоту – и это значение амплитуды колебаний A_p фиксируется.



Рисунок 1.29. – Функциональная схема измерения добротности и собственной частоты колебательной системы методом расстройки частоты (амплитудные измерения)

Затем частоту выходного сигнала генератора расстраивают до частот ω_{e} и ω_{h} , соответсвующих значениям амплитуды 0,707 A_{p} (рисунок 1.30). После чего добротность расчитывается по формуле [10,15,16,99–104]:

$$Q = \frac{\omega_p}{\omega_g - \omega_\mu}, \qquad (1.28)$$

Собственная частота КС ω_0 рассчитывается по формуле [17–19]:

$$\omega_{0} = \frac{\omega_{p}}{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^{2}}}}.$$
(1.29)



Рисунок 1.30. – Иллюстрация принципа измерения добротности и собственной частоты колебательной системы методом расстройки частоты по АЧХ

Этот способ применяется для КС добротности *Q* больше единицы, поскольку, если добротность КС велика, то из (1.29) следует, что:

$$\omega_0 \approx \omega_p. \tag{1.30}$$

Недостатком данного способа является большое время измерения [17,99–101,105], необходимое на перестройку частоты. Это приводит к искажению результатов измерения параметров КС с изменяющимися параметрами. Точность
определения добротности и собственной частоты КС непосредственно зависит от точности определения значений ω_в, ω_н и ω_p [105,106], точности измерения амплитуды колебаний [99–101,105,106], погрешности установки выходной частоты [107,108] и амплитуды [107,109–111] выходного сигнала генератора.

1.6.1.2 Измерение параметров колебательной системы способом расстройки частоты по изменению фазы

функциональная схема для реализации способа, представлена на рисунке 1.31. При реализации способа генератор настраивается на частоту ω_0 , при которой разность фаз между сигналом возбуждения и сигналом КС равна 90°. Затем КС возбуждают сигналами с частотами $\omega_{\rm H}$ и $\omega_{\rm B}$, при которых значение разность фаз равна, соответственно, 45° и 135° (рисунок 1.32) [98–102, 112,113].



Рисунок 1.31. – Функциональная схема измерения добротности и собственной частоты колебательной системы методом расстройки частоты по ФЧХ

Значение добротности вычисляется по формуле (1.28), при этом данный способ применим и для КС с добротностью меньше единицы [98].

Этому способу также присущи недостатки, указанные в разделе 1.6.1.1.



Рисунок 1.32. – Иллюстрация принципа измерения добротности и собственной частоты колебательной системы методом расстройки частоты по ФЧХ

1.6.1.3 Измерение параметров колебательной системы по амплитудно-частотной характеристике

Данный способ измерения параметров КС является модификацией способа расстройки частоты. Для реализации способа применяется функциональная схема, представленная на рисунке 1.29. Авторами [5,7,104–106,114–118] предлагается осуществлять дифференцирование АЧХ по частоте, определять частоты максимума ω_{max} и минимума ω_{min} производной АЧХ (рисунок 1.33) и расчет добротности проводить по формуле [5,7,105,114–118]:

$$Q_{M2} = \frac{\omega_p}{\omega_{\min} - \omega_{\max}}.$$
 (1.31)

В [115,116] показано, что добротность можно определять по формуле:

$$Q_{M3} = \frac{\pi}{4} \frac{\omega_p G(\omega_{\max})}{G(\omega_p)}.$$
(1.32)

где $G(\omega_p)$ – максимум АЧХ, а $G'(\omega_{max})$ – максимум производной АЧХ по частоте.



Рисунок 1.33. – Иллюстрация принципа измерение добротности и собственной частоты колебательной системы по АЧХ: 1 – АЧХ; 2 – производная АЧХ.

В соответствии с (1.32) для определения добротности необходимо найти только ω_{max} и ω_p. Это позволяет сократить время определения добротности примерно в два раза по сравнению с методом расстройки частоты (раздел 1.5.1). По расчетам авторов [116] погрешность определения добротности в идеальном случае имеет зависимость от добротности, представленную на рисунке 1.34

Для данного метода определение собственной частоты КС аналогично методу расстройки частоты по максимуму АЧХ (п. 1.5.1.1). Точность определения добротности и собственной частоты КС зависит от точности определения значений ω_{max} и ω_p . Этот способ измерения добротности имеет довольно узкий рабочий диапазон. Как видно из рисунка 1.34 [116] методическая погрешность резко возрастает с уменьшением добротности при добротностях меньше 100, что ограничивает возможность применения способа для низкодобротных КС.



Рисунок 1.34. – Зависимость погрешности определения добротности от значения добротности

1.6.2 Измерение параметров колебательной системы в режиме вынужденных колебаний на фиксированной частоте

При работе в режиме вынужденных колебаний реализуется функциональная схема, представленная на рисунке 1.35. Перед началом измерений путем перестройки выходной частоты сигнала генератора добиваются максимума амплитуды выходного сигнала КС [14,19,29,60]. При настройке на максимум амплитуды колебаний для КС с высокой добротностью можно считать, что частота генератора точно равна собственной частоте КС ($\omega = \omega_0$).



Рисунок 1.35. – Функциональная схема, поясняющая измерение параметров колебательной системы в режиме вынужденных колебаний

При изменении частоты внешнего воздействия на КС, наблюдается изменение амплитуды колебаний и разности фаз между сигналом возбуждения и выходным сигналом. Именно эти параметры используются в режиме вынужденных колебаний для вычисления параметров КС. Для нахождения добротности и собственной частоты КС решают системы уравнений [14,17–19,29,60,119]:

$$y_{a} = \frac{y_{cm}}{\sqrt{(1-\xi^{2})^{2} + \frac{\xi^{2}}{Q^{2}}}} \bigg|_{q(\xi) = arctg} \frac{\xi}{Q(1-\xi^{2})} \bigg|, \qquad (1.33)$$

где φ – разность фаз между вынуждающей силой и колебаниями КС, $\xi = \omega/\omega_0$ – отношение частоты возбуждающей силы к собственной частоте КС, y_a – амплитуда вынужденных колебаний, y_{cm} – статическое смещение, определяемое как [2]:

$$y_{cm} = \frac{F_a}{k},\tag{1.34}$$

где *F*_{*a*} – амплитуда колебаний.

В большинстве датчиков на основе КС амплитуда колебаний чувствительного элемента мала, поэтому в реальных датчиках используют функциональную схему, представленную на рисунке 1.36. Усилитель сигнала КС имеет собственные АЧХ и ФЧХ, которые в реальных датчиках учитываются при вычислении конечного результата [120] путем предварительной калибровки.



Рисунок 1.36. – Функциональная схема, поясняющая работу колебательной системы в режиме вынужденных колебаний (с усилителем амплитуды колебаний)

Преимущество этого способа по сравнению с рассмотренными выше заключается в том, что не обязательно иметь КС с ярко выраженным резонансом. Определять добротность КС возможно и при значениях менее единицы. Оценка параметров КС возможна в каждом периоде колебаний.

Недостаток измерений в данном режиме (по сравнению с автоколебательным режимом) связан с возбуждением КС на постоянной частоте. В результате при изменении собственной частоты КС значительно уменьшается амплитуда колебаний [6,17–19,29,98,102,119,120], что приводит к критическому уменьшению отношения сигнал/шум [19,120], тем самым вызывая дополнительные погрешности при вычислении параметров КС.

1.6.3 Измерение параметров колебательных систем при их работе в составе автогенератора

1.6.3.1 Измерение параметров колебательной системы в автоколебательном режиме

Функциональная схема, поясняющая принцип измерения параметров КС в автоколебательном режиме, представлена на рисунке 1.37 [29,100,101,120–122].

Путем изменения фазовой задержки фазовращателя добиваются максимума амплитуды выходного сигнала КС. В этом режиме измеряемыми параметрами является амплитуда и частота колебаний.



Рисунок 1.37. – Функциональная схема работы аппаратно-программного комплекса в автоколебательном режиме

При больших значениях добротности *Q* можно считать, что частота ω колебаний КС равна собственной частоте ω₀, а амплитуда выходного сигнала КС прямо пропорциональна добротности [17-19,100,120-122]. Одним из существенных недостатков данного способа является то, что при значительном изменении собственной частоты КС произойти нарушение может условия ω ω_0 [29,74,100,101,121,122]. Это связано с тем, что отклонение частоты КС вызывает нарушение баланса фаз в цепи положительной обратной связи. Как правило, это происходит при применении аналоговых фазовращателей, фазовая задержка о которых зависит от частоты [29,74,100,101,121,122]. Кроме того, при $\omega \neq \omega_0$ фазовый сдвиг КС имеет следующую зависимость [18,29,120,122]:

$$\varphi(\xi) = \operatorname{arctg} \frac{\xi}{Q(1-\xi^2)}.$$
(1.35)

Необходимо также отметить, что с уменьшением добротности увеличивается нестабильность частоты автоколебаний, что приводит к дополнительным погрешностям и может привести к срыву генерации колебаний [29,121,122].

Применение каскадов усиления (рисунок 1.38) в этом способе приводит к уменьшению частотного динамического диапазона [100,101,121,122], поскольку усилительные каскады вносят дополнительный фазовый сдвиг [99–101,120–122], как правило, зависящий от частоты колебаний ω .



Рисунок 1.38. – Функциональная схема работы датчика на основе КС в автоколебательном режиме (с усилителем амплитуды колебаний)

Таким образом, требование высокой добротности и малых изменений собственной частоты КС при их работе в автоколебательном режиме существенно ограничивает диапазон измерения датчиков на основе КС [29,99–101,120]. Положительным свойством является возможность оценивать параметры системы в каждом периоде колебаний.

1.6.3.2 Измерение параметров колебательной системы по схеме широкодиапазонного измерителя

Одним из возможных вариантов измерения параметров КС является использование принципа широкополосного измерения добротности [100]. Данный принцип поясняет функциональная схема, представленная на рисунке 1.39.

Здесь цепь автоматического регулирования, состоящая из фазовращателя и фазового детектора, обеспечивает поддержание разности фаз между возбуждением и колебаниями КС равной 90°, что обеспечивает работу датчика на собственной частоте КС [6,17–19,98,102,100,101].



Рисунок 1.39. – Функциональная схема, поясняющая работу датчика на основе КС в автоколебательном режиме по схеме широкодиапазонного измерителя добротности

Для данной схемы отсутствует ограничение, связанное с изменением собственной частоты КС, присущее автоколебательному режиму (раздел 1.6.4.1). К недостаткам этого режима можно отнести рост нестабильности частоты автоколебаний при уменьшении добротности [6,121], как и в обычном автоколебательном режиме. Кроме того, при изменении добротности КС амплитуда колебаний изменяется [17,18]. Это, в свою очередь, приводит к погрешности аналоговых фазовых детекторов, так как большинство аналоговых фазовых детекторов чувствительно к разбалансу амплитуд входных сигналов. Для минимизации погрешности при подстройке разности фаз необходимо учитывать собственные ФЧХ компонентов схемы.

Необходимо отметить, что с уменьшением добротности, как и в автоколебательным режиме, увеличивается нестабильность частоты автоколебаний, приводящая к дополнительным погрешностям. А уменьшение добротности до критических значений может привести к срыву генерации колебаний [29,100,103].

Применение в схеме усилительных каскадов (рисунок 1.40) при малой амплитуде колебаний КС, так же как и в обычном автоколебательном режиме приводит к уменьшению частотного динамического диапазона [99–101,120–122]. Это вызвано тем, что любые усилительные каскады вносят дополнительный фазовый сдвиг [99,121], зависящий от частоты колебаний ω .

44



Рисунок 1.40. – Функциональная схема, поясняющая работу датчика в автоколебательном режиме с усилителем амплитуды колебаний

В данной схеме также проявляются искажения результатов измерения добротности и собственной частоты КС, когда эти измеряемые параметры изменяются во времени. Это обусловлено инерционностью фазового детектора и фазовращателя [99–101,120–122].

1.7 Выводы

1. Датчики на основе электромеханических КС находят широкое применение в технике. Теория и практика примения таких датчиков хорошо раазработана для стационарных режимов работы датчиков, когда измеряемые ФВ изменяются незначительно за характерное время установления колебаний в КС. В этом случае измеряемая ФВ однозначно связана с параметрами КС и соответсвенно с параметрами колебаний возбуждаемых в КС различными способами.

2. Во многих практических приложениях и измерительных задачах датчики на основе КС применяются для измерения объектов (сред) с изменяющимися параметрами. В этом случае процесс изменения контролируемых параметров ограничен временем в несколько раз большим, чем время установления равновесных колебаний КС, используемой в датчике.

3. Измерение добротности и собственной частоты КС для таких датчиков с помощью способов, рассмотренных в разделах 1.6.1, ограничивается в основном точностью и погрешностью измерительных приборов. Основной же недостаток

этих способов – большое время измерения параметров КС, что обусловлено необходимостью сканированя по частоте в широкой полосе частот.

4. Для рассмотренных в разделах 1.6.2 и 1.6.3 режимов включения КС возможна реализация измерения параметров КС за один период колебаний. Но каждый из рассмотренных режимов имеет недостатки:

- для автоколебательного режима (раздел 1.6.3.1) включения КС возможно измерение *Q* и ω₀ только в узких диапазонах значений из-за возможного нарушения баланса фаз и амплитуды;

- в автоколебательном режиме по схеме широкодиапазонного измерителя (раздел 1.6.3.2), можно реализовать измерение в больших пределах изменения собственной частоты КС, но при этом может быть нарушен режим автоколебаний в диапазоне малых добротностей;

- при включении КС в режиме вынужденных колебаний можно измерять добротность КС в широком диапазонах значений, но из-за возможного смещения собственной частоты КС падает отношение сигнал/шум, что также осложняет использование данного режима.

5. Необходим анализ методических погрешностей, возникающих в датчиках на основе электромеханических КС в нестационарных режимах, и разработка способов снижения указанных погрешностей.

Глава 2. Численное моделирование процессов в механических колебательных системах в нестационарных режимах работы

2.1 Математическая модель колебательной системы с изменяющимися параметрами

Во многих технических задачах при проведении совместных измерений необходимо обеспечить быстрое измерение нескольких изменяющихся во времени параметров КС в заданный момент времени [66,67,123,124]. Особенностью датчиков на основе КС применительно к измерению изменяющихся ФВ является изменение амплитуды и частоты колебаний, а также искажение формы колебаний, что приводит к появлению дополнительных динамических погрешностей при определении измеряемых ФВ. Следует отметить также, что при гармоническом возбуждении КС с изменяющимися параметрами происходит отклонение формы колебаний от синусоидальной формы, что приводит к неоднозначности в определении фазы колебаний [18]. При качественном понимании и описании указанных особенностей измерений в современной научно-технической литературе отсутствуют количественные оценки влияния скорости изменения параметров КС с электрическим возбуждением на погрешности измерения этих параметров [17–19].

Если задать время однократного измерения $t_{изм}$, то задачей анализа является оценка погрешности измерения информативного параметра Π в заданный момент времени *t*. Критерием однозначного измерения является условие, когда относительное изменение измеряемого параметра за время измерения много меньше относительной погрешности измерения в стационарном режиме [4,6,10,11,14–23,38,60,65, 125–128]:

$$\frac{1}{\Pi}\frac{d\Pi}{dt}t_{_{u_{3M}}} \ll \delta_{_{u_{3M}}}.$$
(2.1)

При измерениях с использованием датчиков на основе КС время однократного измерения однозначно связано с периодом $T_{\text{кол}}$ колебаний и при измерении амплитуды колебаний не может быть меньше $T_{\text{кол}}/4$, а при измерении фазы – меньше $T_{\text{кол}}/2$. Таким образом, для колебательных систем условие квазистационарного режима измерения можно записать в виде

$$\frac{2}{\Pi} \frac{d\Pi}{dt} \ll f_{\kappa o \pi} \cdot \delta_{u_{3M}}.$$
(2.2)

В реальных измерительных задачах это условие выполняется далеко не всегда, при этом следует учитывать, что с увеличением скорости изменения параметров КС относительная погрешность измерения тоже будет возрастать. Для анализа влияния скорости изменения параметров КС на погрешность их измерения рассмотрим модель КС с одной степенью свободы (рисунок 2.1.) [4,6,10,11,14–23,29,38].

48



Рисунок 2.1. – Модель механической колебательной системы

Модель включает тело (зонд КС) с массой М, подвешенное к неподвижной балке на пружине с коэффициентом упругости k; движение зонда сглаживается демпфером с коэффициентом демпфирования h. Приращение массы зонда в процессе измерения называют присоединенной массой m [18].

В общем случае все параметры КС зависят от времени регулярным и случайным образом. Вид и крутизна регулярной зависимости определяется условиями измерительной задачи. Рассмотрим характер изменения параметров КС на примере вибровискозиметрического датчика (ВВД) колебательного типа.

В большинстве датчиков, в том числе и в ВВД, КС стараются разработать таким образом, чтобы коэффициент упругости *k* в ходе измерения не изменялся (или изменялся известным образом) [4,6,10,11,14–16,20–23,65,60,98, 102,103125–127]. Это приводит к упрощению вычисления двух других параметров КС – присоединенной массы и коэффициента демпфирования – по результатам измерения отклика, то есть отклонения центра масс от положения равновесия

(покоя) [18]. Так, например, при измерении температурных зависимостей параметров жидкостей ВВД изменение плотности и вязкости жидкости приводит к изменению коэффициента демпфирования *h* и массы инерционного элемента *M* [13,14,19,21,37,45,65,128], а коэффициент упругости к практически не изменяется.

Для данной модели КС уравнение движения колеблющейся массы при вынужденных колебаниях будет иметь вид:

$$(M + m(t))\frac{d^2 y}{dt^2} + h(t)\frac{dy}{dt} + ky = F(t), \qquad (2.3)$$

где F(t) – периодическая возбуждающая сила, приложенная к центру масс, которую без ограничения общности анализа (поскольку любую периодическую функцию можно представить в виде суммы гармоник) примем изменяющейся по гармоническому закону:

$$F(t) = F_a \sin(\omega t), \qquad (2.4)$$

при этом конкретный способ задания F(t) здесь рассматривать не будем.

Для определенности будем полагать, что перемещение колеблющегося элемента (центра масс) линейно и безынерционно преобразуется в электрический сигнал одним из известных способов без потери точности. Анализ погрешности преобразования перемещения в электрический сигнал представляет собой самостоятельную задачу и в данной главе не рассматривается.

Измерительная информация, как уже отмечалось, содержится в частоте, амплитуде электрического сигнала отклика КС и разности фаз между этим сигналом и возбуждающей силой. В связи с этим проведем расчет и анализ изменения параметров отклика КС в двух режимах:

1) при линейно нарастающей присоединенной массе КС;

2) при линейно нарастающем коэффициенте демпфирования КС.

3) при одновременном линейном росте присоединенной массы и коэффициента демпфирования.

2.2 Анализ колебательной системы с линейно нарастающей присоединенной массой

Для КС, представленной на рисунке 2.1, уравнение движения (2.3) только с линейно нарастающей присоединенной массой будет иметь вид:

$$(M + m(t))\frac{d^2 y}{dt^2} + h\frac{dy}{dt} + ky = F(t), \qquad (2.5)$$

где присоединенная масса изменяется по линейному закону:

$$m(t) = \alpha t \,, \tag{2.6}$$

 α – скорость увеличения массы (г/с).

Согласно [4,6,10,11,14–23,29,38] для стационарного режима колебаний добротность КС с присоединенной массой *m* зонда выражается формулой:

$$Q = \frac{\sqrt{(M+m)k}}{h}.$$
(2.7)

Из (2.7) с учетом (1.33) при условии возбуждения КС на собственной частоте можно получить выражение для коэффициента демпфирования [18]:

$$h = \frac{y_{cm}\sqrt{(M+m)k}}{y_a} \tag{2.8}$$

Значение присоединенной массы зонда КС можно найти из формулы:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M+m}} \tag{2.9}$$

Следует еще раз отметить, что выражения (2.7),(2.8) и (2.9) применимы только для стационарного режима колебаний.

Аналитическое решение уравнения (2.5) в общем виде оказалось чрезвычайно громоздким и непригодным для анализа, поэтому для решения поставленной задачи был использован метод численного решения дифференциального уравнения (2.5) методом Рунге-Кутта [129] с фиксированным шагом. В качестве исходных параметров модели КС были взяты параметры КС ВВД в жидкой среде (см. главу 4). Значения параметров представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. – Параметры КС вибровискозиметрического датчика	
Параметр	Значение
Инерционная масса М зонда КС в жидкости	7,5 г
Коэффициент пружины КС <i>k</i>	1,8·10 ⁴ Н/м
Коэффициент демпфировании h	0,025 0,1 Н·с/м

Скорость увеличения массы α задавалась в диапазоне 0 ... 0,1 г/с, что соответствует скорости приращения массы зонда ВВД в реальных жидкостях.

В результате решения численным методом уравнения (2.4) при возбуждении КС на частоте 249,2 Гц, равной ее собственной частоте при *t*=0, были получены зависимости отклонения зонда от времени (формы колебаний) при линейно нарастающей присоединенной массе. График изменения колебаний при скорости изменения присоединенной массы α =10⁻² г/с приведен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2. – Результат численного решения уравнения (2.4) на частоте 249,2 Гц собственных колебаний колебательной системы при t = 0 с: M = 7,5 г, h = 0,05 г/с, $k = 1,8 \cdot 10^4$ H/м, $\alpha = 10^{-2}$ г/с

Численным методом было рассчитано изменение во времени амплитуды колебаний КС с линейно нарастающей присоединенной массой зонда при скорости нарастания присоединенной массы $\alpha = 10^{-2} c/c$ при различных частотах f_{B036} возбуждения КС. Эти зависимости представлены изменением цвета на рисунке 2.3 в координатах (f_{B036} и *m*), где *m* – текущее значение присоединенной массы. Как и



Рисунок 2.3. – Зависимость амплитуды колебаний КС от частоты возбуждающей силы при скорости нарастания присоединенной массы α = 10⁻² ε/c

предполагалось, инерционность КС приводит к тому, что при линейно нарастающей присоединенной массе максимум амплитуды (красный фон на рисунке 2.3) наблюдается при значениях присоединенной массы, не совпадающих с расчетным значением присоединенной массы в стационарном режиме согласно (2.8).

Аналогичным образом была получены графики изменения разности фаз $\Delta \phi$ между возбуждающей силой и сигналом отклика КС с линейно изменяющейся присоединенной массой при разной частоте возбуждающей силы для тех же значений параметров КС (рисунок 2.4). Сдвиг фазы, равный 90° и соответствующий частоте собственных колебаний КС, также наблюдается при значении *m*, превышающем расчетное значение присоединенной массы в стационарном режиме.



Рисунок 2.4. – Зависимость фазы колебаний КС от частоты возбуждающей силы при скорости нарастания присоединенной массы $\alpha = 10^{-2} c/c$

Для оценки разности расчетного и наблюдаемого значений присоединенной массы, соответствующих собственной частоте колебаний КС, были построены зависимости амплитуды колебаний и разности фаз $\Delta \phi$ между возбуждающей силой и сигналом отклика КС с линейно нарастающей присоединенной массой от значения присоединенной массы (рисунок 2.5).

Частота силы возбуждения в рассматриваемом примере равна собственной частоте КС с присоединенной массой 19 *мг* в статическом режиме работы: 248,9 Гц. Из графика видно, что максимум амплитуды наблюдается при присоединенной массе 25 *мг*, а разность фаз 90° – при присоединенной массе 22 *мг*. То есть разность фаз между возбуждающей силой и сигналом отклика в точке максимума амплитуды не равна 90° , что подтверждает отставание изменения фазы отклика от изменения присоединенной массы в силу инерционности системы.

Если определять значение присоединенной массы зонда КС по частоте колебаний КС, соответствующей максимуму амплитуды, то при заданной скорости изменения присоединенной массы $\alpha = 10^{-2} c/c$, получим ошибку 6 мг. Если же значение присоединенной массы зонда КС определять по значению частоты колебаний КС, соответствующей разности фаз 90°, то ошибка составит Змг.



Рисунок 2.5 – Расчетные зависимости амплитуды и разности фаз колебаний КС от значения присоединенной массы зонда: f = 248,9 Гц, M = 7,5 г, h = 0,05 H·c/м, $k = 1,8 \cdot 10^4$ H/м, $\alpha = 10^{-2}$ г/с

Для определения коэффициента демпфирования рассмотрим зависимость амплитуды колебаний от присоединенной массы при фиксированной частоте возбуждения. Согласно [18] амплитуда зонда КС в стационарном режиме колебаний может быть рассчитана по (1.33) и для зонда КС с присоединенной массой 19 *мг* на частоте 248,9 Гц и должна составлять 239 отн. ед. По результатам численного моделирования максимальная амплитуда колебаний зонда КС составляет 233,9 отн. ед., а при разности фаз 90°, соответственно, 233,2 отн. ед. (рисунок 2.5). Согласно (2.7) коэффициент демпфирования, рассчитанный по наблюдаемому максимуму амплитуды, будет отличаться от истинного в большую сторону на 0,28·10⁻³ H·c/м (+0,52%), а при расчете по амплитуде, соответствующей сдвигу фаз 90° – на 0,26·10⁻³ H·c/м (+0,51%).

Поскольку непосредственно измерить мгновенное значение изменяющейся массы зонда механической КС не представляется возможным, для экспериментальной проверки результатов компьютерного моделирования были проведены измерения параметров колебаний в последовательном колебательном контуре (рисунок 2.6) с изменяющейся индуктивностью. В соответствии с принципом

электромеханической аналогии эквивалентом массы зонда в механической КС является индуктивность *L* в электрическом колебательном контуре.



Рисунок 2.6. – Структурная схема установки для измерения параметров колебательного контура с изменяющейся индуктивностью: *R* – резистор; *L* – катушка индуктивности; *C* – конденсатор

В качестве генератора возбуждения использовался анализатор спектра HP4195A. Сигнал возбуждения и сигнал отклика регистрировались с помощью двухканальной платы сбора данных E20-10D1 с частотой дискретизации 1 МГц. Частота возбуждающего сигнала выбиралась равной 700 Гц, что соответствовало собственной частоте колебательного контура в стационарном режиме работы при индуктивности L = 1,7 Гн.

Изменение индуктивности достигалось перемещением ферритового стержня внутри катушки индуктивности, при этом индуктивность катушки изменялась в пределах от 0,9 до 4,4 Гн.

Зависимости амплитуды и фазы выходного сигнала колебательного контура от мгновенного значения индуктивности, линейно изменяющейся со скоростью 4.3 Гн/с, в сравнении результатами численного моделирования представлены на рисунке 2.7. Эксперимент повторялся многократно при различных внешних усло-

виях и показал хорошее соответствие расчетных и экспериментальных характеристик, как для амплитуды, так и для фазы колебаний.



результат численного моделирования;
 результат эксперимента.
 Рисунок 2.7. – Зависимости амплитуды и разности фаз колебаний КС от значения индуктивности: *f* = 701 Гц, *L*₀ = 987 мГн, *C* = 30 нФ, *R* = 698 Ом, α = 4,3 Гн/с

2.3 Зависимость погрешности определения параметров колебательной системы от скорости нарастания присоединенной массы зонда

Следующим этапом анализа является исследование зависимостей погрешностей определения присоединенной массы и коэффициента демпфирования КС по формулам стационарных колебаний от скорости изменения присоединенной массы.

Для решения этой задачи также применялся метод численного моделирования. Путем численного решения (2.5) находились и строились функции у(*t*) колебаний КС при различных частотах возбуждения и различных скоростях приращения присоединенной массы зонда. При этом частоты возбуждающей силы выбирались равными частоте собственных колебаний КС при заданных значениях присоединенной массы зонда для статического режима колебаний. Для каждого значения возбуждающей частоты находили:

максимум амплитуды колебаний;

 истинное значение присоединенной массы зонда КС в момент времени соответствующий максимуму амплитуды колебаний;

 значение амплитуды колебаний при разности фаз между колебаниями зонда КС и возбуждающей силой, равной 90°;

 истинное значение присоединенной массы при разности фаз между колебаниями зонда КС возбуждающей силой, равной 90°.

После получения результатов моделирования рассчитывалась относительные погрешности определения присоединенной массы по формуле:

$$\delta = \frac{m_{ucm} - m_{u3M}}{M}, \qquad (2.10)$$

где m_{ucm} – истинное значение присоединенной массы, $m_{u_{3M}}$ – значения присоединенной массы, вычисленные согласно (2.8) по значениям собственной частоты КС, определяемым либо по максимуму амплитуды, либо по разности фаз, равной 90°.

Полученные зависимости относительных погрешностей определения присоединенной массы от ее заданного значения для различных скоростей приращения присоединенной массы зонда КС представлены на рисунке 2.8. Из рисунка видно, что указанные относительные погрешности практически не зависят от заданного значения присоединенной массы, что объясняется линейностью рассматриваемой модели КС. Некоторый разброс полученных значений от среднего уровня обусловлен, видимо, погрешностью численного решения уравнения (2.5) [129].



Рисунок 2.8. – Зависимости относительной ошибки определения присоединенной массы от ее заданного значения для различных скоростей приращения массы зонда КС по максимуму амплитуды (а) и по разности фаз, равной 90° (б): M = 7,5 г, h = 0,05 H·c/м, $k = 1,8 \cdot 10^4$ H/м

Зависимости относительной погрешности определения присоединенной массы колебательной системы от скорости изменения присоединенной массы, полученные по результатам численного моделирования, представлены на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9. – Зависимость относительной ошибки определения присоединенной массы КС от скорости изменения присоединенной массы при M = 7,5 г, $h = 0.05 \text{ H} \cdot \text{c/m}, k = 1,8 \cdot 10^4 \text{ H/m}$

По представленным зависимостям видно, что при определении присоединенной массы по частоте колебаний КС, соответствующей разности фаз 90°, погрешность примерно в 2 раза меньше, чем эта же ошибка при определении присоединенной массы по частоте КС, соответствующей максимуму амплитуды.

На рисунках 2.10 и 2.11 представлены зависимости погрешности определения присоединенной массы от скоростей приращения инерционной массы колебательной системы для различных значений коэффициента демпфирования.



Рисунок 2.10. – Зависимости погрешностей определения присоединенной массы КС по частоте колебаний, определяемой при разности фаз 90 от скорости изменения присоединенной массы при различных значениях коэффициента демпфирования



Рисунок 2.11. – Зависимости погрешностей определения присоединенной массы КС по максимуму амплитуды от скорости изменения присоединенной массы для различных значений коэффициента демпфирования

В соответствии с (2.7) по значениям максимальной амплитуды (A_f) и амплитуды колебаний при разности фаз между колебаниями зонда КС и возбуждающей силой, равной 90° (A_{φ}), были рассчитаны значения коэффициенты демпфирования. Изменение инерционной массы КС приводит к погрешности измерения коэффициента демпфирования, которую рассчитаем по формуле:

$$\varsigma = \frac{h_{usm} - h_{ucm}}{h_{ucm}}, \qquad (2.11)$$

где h_{ucm} – истинное (заданное) значение коэффициента демпфирования, $h_{u_{3M}}$ – вычисленное значение коэффициента демпфирования согласно (2.7). Полученные зависимости погрешностей измерения коэффициента демпфирования от присоединенной массы для различных скоростей приращения инерционной массы КС представлены на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12. – Зависимость относительной ошибки определения коэффициента демпфирования от присоединенной массы для различных скоростей приращения массы зонда КС по максимуму амплитуды (а) и по разности фаз, равной 90° (б): $M = 7.5 \text{ г}, h = 0.05 \text{ H} \cdot \text{c/m}, k = 1.8 \cdot 10^4 \text{ H/m}$

Как и в случае с погрешностью определения присоединенной массы (рисунок 2.6) относительные погрешности определения коэффициента демпфирования зависят от скорости изменения инерционной массы КС (рисунок 2.13) и при заданной скорости приращения присоединенной массы практически не зависят от заданного значения присоединенной массы. По представленным зависимостям видно, что при определении коэффициента демпфирования по частоте колебаний КС, соответствующей максимуму амплитуды, относительная погрешность мень-



Рисунок 2.13. – Зависимость относительной ошибки определения коэффициента демпфирования КС от скорости изменения присоединенной массы при M = 7,5 г, h = 0.05 H·c/м, $k = 1,8 \cdot 10^4$ H/м

ше, чем при определении по частоте колебаний КС, соответствующей разности фаз между откликом КС и возбуждающей силой, равной 90°.

На рисунках 2.14 и 2.15 представлены зависимости относительных погрешностей определения коэффициента демпфирования КС от скорости приращения присоединенной массы зонда КС.



Рисунок 2.14. – Зависимости погрешностей определения коэффициента демпфирования КС по максимуму амплитуды от скорости изменения присоединенной массы при различных значениях коэффициента демпфирования

61



Рисунок 2.15. – Зависимости погрешностей определения присоединенной массы КС по уровню разности фаз 90° от скорости изменения присоединенной массы для различных значений коэффициента демпфирования

2.4 Анализ колебательной системы с линейно нарастающим коэффициентом демпфирования

Уравнение движения (2.4) для модели КС, представленной на рисунке 2.1, с линейно нарастающим коэффициентом демпфирования будет иметь вид:

$$M\frac{d^{2}y}{dt^{2}} + (h_{0} + h(t))\frac{dy}{dt} + ky = F(t), \qquad (2.12)$$

где *h*₀ – начальное значение коэффициента демпфирования, *h*(*t*) – изменяющийся во времени коэффициент демпфирования согласно:

$$h(t) = \beta t \,, \tag{2.13}$$

где β – скорость изменения коэффициента демпфирования (H·c/м·c).

Как и для случая с изменением присоединенной массы зонда аналитического выражения решения уравнения (2.12) получить не удалось. Численным моделированием были получены зависимости амплитуды колебаний КС от коэффициента демпфирования при различных скоростях β изменения коэффициента демпфирования (рисунок 2.16). В качестве исходных параметров КС были использованы пара-

метры ВВД, описанного в главе 4. Значения модельных параметров КС представлены в таблице 2.1, а значение β изменялось в диапазоне от 0 до 2 H·c/м·c.



Рисунок 2.16. – Зависимости амплитуд колебаний от величины коэффициента демпфирования для различных скоростей изменения коэффициента демпфирования во времени при f = 248,9 Гц, M = 7,5 г, $h_0 = 0.05$ H·c/м, $k = 1.8 \cdot 10^4$ H/м

По полученным значениям амплитуды колебания зонда КС по формулам (1.33) и (2.8) вычислялись значения добротности и коэффициента демпфирования. Погрешность определения добротности КС вычисляли по формуле

$$\iota = \frac{Q_{u_{3M}} - Q_{u_{cm}}}{Q_{u_{cm}}},\tag{2.14}$$

где Q_{ucm} – истинное значение добротности, $Q_{u_{3M}}$ – вычисленное по (1.33) значение добротности; аналогично рассчитывалась относительная погрешность определения коэффициента демпфирования по формуле (2.7).

Результаты расчета погрешности определения добротности и коэффициента демпфирования при различных скоростях изменения коэффициента демпфирования приведены на рисунках 2.17 и 2.18, соответственно. Из графиков, приведенных на этих рисунках, видно, что погрешность определения указанных параметров резко возрастает с увеличением скорости изменения коэффициента демпфирования. При этом погрешность определения коэффициента демпфирования при

одинаковых параметрах режима измерения в несколько раз больше, чем погрешность определения добротности.



Рисунок 2.17. – Зависимости ошибок измерения добротности от величины коэффициента демпфирования для различных скоростей изменения коэффициента демпфирования во времени при f = 248,9 Гц, M = 7,5 г, $h_0 = 0,05$ H·c/м, $k = 1,8 \cdot 10^4$ H/м.



Рисунок 2.16. – Зависимости ошибок измерения коэффициента демпфирования от величины коэффициента демпфирования для различных скоростей изменения коэффициента демпфирования во времени.

При моделировании колебаний КС с изменяющимся коэффициентом демпфирования собственная частота КС соответствовала собственной частоте в статическом режиме при заданных параметрах КС, а разность фаз между возбуждающей силой и сигналом отклика КС на собственной частоте равнялась 90°, поскольку параметры реактивных элементов КС в данном случае не изменялись. Для проверки искажений формы колебаний зонда при увеличении коэффициента демпфирования КС были проведены дополнительные исследования по анализу спектрального состава колебаний, возникающих в системе в режиме вынужденных колебаний при возбуждении чисто гармонической силой. Для этого каждый период колебаний зонда КС с момента начала изменения коэффициента демпфирования (*t*=0) раскладывался в спектр методом Фурье-преобразования. При этом считалось, что раскладываемые в спектр колебания для каждого периода является периодическими. Зависимость амплитуд 2-й, 3-й, 4-й и 5-й гармоник составляющей спектра колебаний от номера периода колебаний представлена на рисунке 2.19.



Рисунок 2.19. – Зависимость гармоник спектра колебания за период от номера периода при изменении коэффициента вязкого демпфирования КС $f = 248.9 \ \Gamma$ ц, $M = 7.5 \ \Gamma$, $h_0 = 0.05 \ \text{H} \cdot \text{c/m}$, $k = 1.8 \cdot 104 \ \text{H/m}$, $\beta = 2 \ \text{H} \cdot \text{c/m} \cdot \text{c}$.

По графикам на рисунке 2.19, видно, что основной вклад в искажении формы колебаний зонда вносит вторая гармоника колебаний.

На рисунке 2.20. представлены зависимости максимумов второй гармоники от скорости изменении коэффициента демпфирования во времени для различных собственных частот КС. Следует отметить, что вторая гармоника в спектре колебаний зависит не только от собственной частоты КС, но от начального значения коэффициента демпфирования (рисунок 2.21).



Рисунок 2.20. – Зависимости максимумов второй составляющей спектра от скорости изменении коэффициента вязкого демпфирования во времени для различных собственных частот колебательной системы с $h_0 = 0.05 \text{ H} \cdot \text{c/m}$



Рисунок 2.21. – Зависимости максимумов второй составляющей спектра от скорости изменении коэффициента вязкого демпфирования во времени для различных начальных h_0 при f = 248,9 Гц, M = 7,5 г, $k = 1,8 \cdot 104$ H/м

2.5 Выводы

1. Путем численного решения уравнения вынужденных колебаний КС с линейно нарастающей присоединенной массой было установлено, что:

 – значение максимальной амплитуды в зависимости от приращения инерционной массы не совпадает с расчетным значением максимальной амплитуды колебаний инерционной массы КС в стационарном режиме;

 максимум амплитудной характеристики в зависимости от приращения инерционной массы наблюдается при значении присоединенной массы, не совпадающим с расчетным значением присоединенной массы КС в стационарном режиме согласно (2.8);

 – разность фаз между возбуждающей силой и колебаниями инерционного элемента при максимуме амплитудной характеристики в зависимости от приращения инерционной массы не равна 90°;

результат измерения присоединенной массы по значению фазы колебаний КС, равному 90°, имеет меньшую погрешность, чем результат измерения по максимуму амплитуды;

 – результат измерения коэффициента демпфирования по максимуму амплитудной характеристики в зависимости от приращения инерционной массы имеет меньшую погрешность, чем результат измерения по значению фазы 90°.

2. Путем численного решения уравнения вынужденных колебаний КС с линейно нарастающим коэффициентом демпфирования было установлено, что:

погрешность определения добротности и коэффициента демпфирования
 сильно возрастают с увеличением скорости изменения коэффициента демпфирования;

 погрешность определения коэффициента демпфирования примерно в 5 раз больше погрешности определения добротности при одинаковых параметрах режима измерения.

Глава 3. Управление режимом возбуждения колебательных систем для снижения погрешности при измерении изменяющихся параметров

3.1 Постановка задачи анализа

В датчиках на основе КС с электрическим возбуждением реализуются, как правило, два основных режима возбуждения колебаний: режим вынужденных колебаний и автоколебательный режим; режим свободных колебаний используется в отдельных случаях в датчиках с ударным возбуждением. Эти режимы были кратко рассмотрены в разделе 1.6 для случая КС с неизменяющимися параметрами [17–19,21,74–80]. В этом случае при любом режиме измерения по параметрам колебаний зонда КС (частота, амплитуда и коэффициент затухания) в установившемся режиме могут быть однозначно определены параметры КС, а значит и параметры контролируемого объекта (среды).

Для случая КС с изменяющимися параметрами амплитуда и фаза колебаний зонда (сигнала отклика) будут изменяться в процессе измерения. При этом значения параметров КС, определяемые по измеряемым в заданные моменты времени *t* параметрам колебаний КС, как показано в главе 2, будут отличаться от истинных мгновенных значений. Общая задача дальнейшего анализа состоит в определении такого способа управления режимом возбуждения КС, при котором отличие измеренных параметров КС от истинных значений будет минимальным.

На качественном уровне анализа понятно, что параметры режима возбуждения в случае КС с изменяющимися параметрами тоже должны изменяться, чтобы компенсировать инерционность КС. При этом возможны два варианта: режим возбуждения с поддержанием постоянной разности фаз и режим с поддержанием максимальной амплитуды [29,119]. Задача количественного анализа состоит в сравнительной оценке погрешности определения параметров КС с изменяющимися параметрами при различных конкретных способах управления режимом возбуждения. Необходимо также определить возможности и оценить сложность технической реализации рассматриваемых способов управления режимом возбуждения и возникающие при этом инструментальные погрешности.

3.2 Режим возбуждения колебательных систем с поддержанием постоянной разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика

Принцип предлагаемого режима возбуждения КС поясняет функциональная схема, представленная на рисунке 3.1 [29,74,119,130–134]. Для определенности начальных условий работы датчика будем считать, что до начала изменений параметров КС датчик работает в режиме вынужденных колебаний с частотой возбуждения, равной собственной частоте КС при заданных начальных параметрах [130]. При этом, очевидно, разность фаз между откликом системы и сигналом возбуждения будет равна 90°. В момент времени t=0 параметры КС начинают регулярно изменяться в результате изменения свойств контролируемого объекта (среды), и разность фаз также будет уменьшаться или увеличиваться в зависимости от направления изменения параметров КС.



Рисунок 3.1. – Функциональная схема, поясняющая работу КС в режиме вынужденных колебаний с поддержанием постоянной разности фазы путем подстройки частоты

В предлагаемом способе управления режимом возбуждения КС в отличие от классического режима вынужденных колебаний, описанного в разделе 1.6.2, предлагается постоянно, дискретным образом, подстраивать частоту выходного сигнала генератора возбуждения к собственной частоте КС, определяемой по разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика. Структурная схема для реализации предлагаемого способа показана на рисунке 3.1.

Источником сигнала возбуждения является управляемый генератор. Модуль управления частотой генератора вырабатывает команды подстройки частоты выходного сигнала управляемого генератора к собственной частоте КС [130,134]. В качестве критерия настройки генератора на собственную частоту КС используется значение разности фаз $\phi_0 = 90^\circ$ между сигналом возбуждения и выходным сигналом КС [15–19,20,29,65,74,119,130–134]. Для КС с одной степенью свободы значение разности фаз в зависимости от частоты вынуждающих колебаний согласно (1.33), является монотонной функцией (рисунок 3.2) [6,15,17–19,20,65]. Благодаря этому измеренное значение разности фаз ϕ позволяет точно определить направление изменения частоты выходного сигнала генератора, необходимое для устранения её отклонения от собственной частоты КС ω_0 [130,132,133,134].



Рисунок 3.2. – Фазочастотные характеристики КС с одной степенью свободы при различных значениях добротности

При условии равенства частоты выходного сигнала генератора и собственной частоты КС ($\omega = \omega_0$) в соответствии с выражением (1.33), как уже было отмечено, амплитуда вынужденных колебаний прямо пропорциональна добротности КС [17–19,29,74,119,130–134]. В этом случае для вычисления добротности достаточно измерить амплитуду вынужденных колебаний КС [17–19,29,74,130–134]. В

большинстве датчиков на основе КС амплитуда колебаний ЧЭ мала и для увеличения амплитуды выходного сигнала применяют усилители [6,29,100,101,119–122].

Функциональная схема с усилением сигнала отклика для реализации предлагаемого режима представлена на рисунке 3.3 [29,122,74,130–134]. У любых усилительных каскадов имеется собственная ФЧХ [29,100,101,119–122]. Очевидно, что при реализации способа необходимо учитывать ФЧХ усилительных каскадов при расчете разности фаз и значение разности фаз, полученное на выходе измерителя фазы, в модуле управления генератором необходимо сравнивать с опорным значением $\phi = \phi_0 + \phi_r(\omega)$, учитывающим $\phi_r(\omega) - \Phi$ ЧХ тракта усиления выходного сигнала КС [29].

Предлагаемый способ управления частотой сигнала возбуждения с поддержанием заданного значения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика, также как и режим вынужденных колебаний (раздел 1.6.2) позволяет измерять параметры КС с малыми значениями добротности, для которых неприменимы другие режимы, в частности автоколебательный [6,29,74,100,101,119–122, 130–134].

При этом предлагаемый режим возбуждения позволяет устранить главный недостаток классического режима вынужденных колебаний – расширить динамический диапазон рабочих частот КС [29,74,119,130–134].



Рисунок 3.3. – Функциональная схема, поясняющая работу датчика на основе КС в режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фазы путем подстройки частоты с усилением сигнала отклика КС

Основными ограничениями предлагаемого способа являются:

 скорость измерения (периодичность получения информации) разности фаз и амплитуды выходного сигнала КС;

время принятия решения для подстройки частоты выходного сигнала генератора.

При работе датчика в предлагаемом режиме возбуждения незначительные отклонения разности фаз от значения $\phi = \phi_0 + \phi_\tau(\omega)$ неизбежны в силу ограниченного быстродействия системы подстройки частоты при изменении параметров КС, например при изменении значения присоединенной массы зонда.

Таким образом, необходимо провести анализ быстродействия системы с дискретной подстройкой частоты и анализ погрешности вычисления параметров КС при отклонении разности фаз от значения $\varphi = \varphi_0 + \varphi_T(\omega)$ [29,119,134].

3.3 Переходные процессы в колебательной системе в режиме с подстройкой частоты

Будем считать, что в момент времени t=0 выходная частота генератора равна собственной частоте КС, т. е. $\xi=1$, а $\varphi_0 = 90^\circ$. За время т амплитуда выходного сигнала и разность фаз могут измениться из-за изменения добротности и (или) собственной частоты КС. Оценкой погрешности измерения амплитуды ϑ_y и разности фаз ϑ_{φ} в данном случае будет разность между истинным значением указанных параметров в момент времени *t* и их измеренным значением за время т. При этом погрешности измерения амплитуды ϑ_y и разности фаз ϑ_{φ} , как правило, не должны превышать значения шумов в измеряемых трактах реальной системы Ψ_y и Ψ_{φ} , соответственно [38,119,135–137]:

$$\Theta_{y} \leq \Psi_{y}; \tag{3.1}$$

$$\Theta_{\varphi} \le \Psi_{\varphi}. \tag{3.2}$$

Считая, что $\omega_0 = const$ и $\xi = 1$ при выполнении условия (3.1) из выражения (1.33) получаем, что изменение добротности ΔQ КС за время измерения τ не должно превышать отношения значения шумов Ψ_y в измеряемом тракте к статическому смещению y_{cm} :
$$\Delta Q \le \frac{\Psi_y}{y_{cm}}.$$
(3.3)

В соответствии с (1.33) при изменении собственной частоты КС ω_0 за время т изменится как амплитуда, так и разность фаз φ . При этом, максимально возможные значения ϑ_y и ϑ_{φ} можно определить следующим образом [119]:

73

$$\Theta_{y} = y_{a}(Q(0), \omega_{0}(0)) - y_{a}(Q(\tau), \omega_{0}(\tau)), \qquad (3.4)$$

$$\Theta_{\varphi} = \varphi(Q(0), \omega_0(0)) - \varphi(Q(\tau), \omega_0(\tau)).$$
(3.5)

Очевидно, что максимальное изменение добротности не должно нарушать условие (3.3). Максимальное изменение собственной частоты КС согласно (3.4) и (3.5) не должно нарушать условия (3.1) и (3.2). Из этого условия следует, что модуль управления генератором (рисунок 3.3) должен выдавать сигнал об изменении выходной частоты генератора, если отклонение разности фаз φ больше значения шумов Ψ_{φ} в тракте измерения разности фаз, т.е.:

$$\varphi_i - \varphi_{i+N} \ge \psi_{\varphi}, \qquad (3.6)$$

где *i* – номер отсчета измерения фазы, после которого было выдана команда об изменении частоты выходного сигнала генератора, *N* – количество измерений после начала изменении частоты. Из условия (3.6) при выполнении (3.2) получается, что для принятия решения об изменении частоты генератора необходимо провести, как минимум, два измерения [119,130,134].

Самый простой способ подстройки частоты, не требующий больших вычислительных мощностей, заключается в изменении выходной частоты генератора на минимальный шаг $\Delta \omega$ перестройки в ту или иную сторону в соответствии с (1.33). Значение этого шага $\Delta \omega$ необходимо выбирать таким образом, чтобы изменение частоты генератора приводило к изменению разности фаз $\Delta \varphi$ на значение приблизительно равное фазовым шумам Ψ_{φ} в измеряемом тракте:

$$\Delta \varphi(\Delta \omega) \approx \psi_{\varphi}. \tag{3.7}$$

Таким образом, при максимальной скорости изменения собственной частоты КС, при соблюдении условия (3.7), генератор будет перестраиваться после каждо-

го измерения, так как будет выполняться условие (3.6), а величина ошибки настройки на собственную частоту КС будет ≈∆ω [119,130,132].

После перестройки частоты генератора в КС возникают переходные процессы затухания колебаний на частоте ω₁ и нарастания колебаний с новой частотой ω₂. Начиная с момента перестройки частоты генератора выходной сигнал КС можно представить в следующем виде [119]:

$$U_{_{6bix}}(t) = y_{_{a1}}e^{^{-\delta t}}\sin(\omega_{_{1}}t - \varphi_{_{1}}) + y_{_{a2}}(1 - e^{^{-\delta t}})\sin(\omega_{_{2}}t - \varphi_{_{2}}), \qquad (3.8)$$

где y_{a1} – амплитуда вынужденных колебаний на частоте ω_1 , δ – коэффициент затухания колебаний в КС, φ_1 – разность фаз на частоте ω_1 , y_{a2} – амплитуда вынужденных колебаний на частоте ω_2 , φ_2 – разность фаз на частоте ω_2 . В результате измеренные амплитуда и частота выходного сигнала КС будут отличны от y_{a2} и φ_2 [122].

Для определения ошибки измерения разности фаз воспользуемся выражением для разности выходного сигнала КС и сигнала, соответствующего установившемуся режиму колебаний на частоте ω_2 :

$$y_{a2}\sin(\omega_{2}t - \varphi_{2}) - U_{_{6btx}}(t) = y_{a2}\sin(\omega_{2}t - \varphi_{2}) - y_{a1}e^{-\delta t}\sin(\omega_{1}t - \varphi_{1}) + y_{a2}(1 - e^{-\delta t})\sin(\omega_{2}t - \varphi_{2}) = -e^{-\delta t}(y_{a1}\sin(\omega_{1}t - \varphi_{1}) - y_{a2}\sin(\omega_{2}t - \varphi_{2})).$$
(3.9)

При малых значениях $\Delta \omega$ можно считать, что $y_{a1} \approx y_{a2}$; при этом получаем:

$$y_{a2}\sin(\omega_{2}t-\varphi_{2})-U_{abx}(t)=-2y_{a}e^{-\delta t}\sin(\frac{\Delta\omega t-\Delta\varphi}{2})\cos(\frac{(\omega_{1}+\omega_{2})t-\varphi_{1}-\varphi_{2}}{2}), (3.10)$$

где $\Delta \phi = \phi_1 - \phi_2$.

Полученное выражение отражает насколько выходной сигнал КС отличается от ожидаемого сигнала с частотой ω_2 в каждый момент времени с момента перестройки генератора (далее разностное значение). Множитель $-2e^{-\delta t}\sin(\frac{\Delta\omega t - \Delta\phi}{2})$ является огибающей разностного значения, т.е. соответствует максимально возможному отклонению разностного значения в каждый момент времени [119]. В этом случае ошибку измерения разности фаз можно записать следующим образом:

$$\psi(t) = \arcsin(-2e^{-\delta t}\sin(\frac{\Delta\omega t - \Delta\varphi}{2})). \qquad (3.11)$$

Зависимость ошибки измерения разности фаз от времени после перестройки частоты в соответствии с (3.11) представлена на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4. – Зависимость ошибки измерения разности фаз от времени после перестройки частоты для двух значений добротности КС: 1 - Q = 70; 2 - Q = 100,

при
$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 250 \Gamma \mu$$
 и $\Delta f = \frac{\Delta \omega}{2\pi} = -5 \cdot 10^{-3} \Gamma \mu$

Видно, что при малых значениях перестройки частоты максимальное значение погрешности измерения разности фаз будет наблюдаться сразу после изменения частоты генератора. Из (3.11) получаем:

$$\psi_0 = \arcsin(-2\sin(\frac{-\Delta\phi}{2})). \qquad (3.12)$$

При малых значениях $\Delta \omega$ можно считать, что: $\Psi_0 \approx -\Delta \phi$. Для подтверждения описанных переходных процессов на рисунке 3.5 представлена зависимость разности фаз от времени для реального датчика, соответствующая моменту перестройки генератора с искусственно увеличенным шагом (в эксперименте умышленно нарушены ранее введенные условия (3.1) и (3.2)).



Рисунок 3.5. – Изменение разности фаз $\Delta \phi$ после перестройки с собственной частоты КС на один шаг $\Delta f = \frac{\Delta \omega}{2\pi} = -2,75\Gamma \mu$ для различных добротностей

Из рисунка 3.5 видно, что изменение разности фаз $\Delta \varphi$, вызванное изменением частоты выходного сигнала генератора, на много больше, чем погрешность измерения в виде выброса ($\varphi_{6bd\delta}$), вызванная переходными процессами. Таким образом, при малом значении шага перестройки частоты выходного сигнала генератора $\Delta \omega$ (при соблюдении условий (3.4), (3.5)) можно считать, что переходной процесс не вносит существенных погрешностей в результат измерения. В соответствии с (3.11) можно построить зависимость отклонения разности фаз (Ψ) от количества периодов (t / f) и добротности КС (Q) после перестройки частоты выходного сигнала генератора на определенный шаг (рисунок 3.6) [119,132]. По построенной зависимости можно оценить погрешности, вызванные перестройкой частоты.

Полученные результаты позволяют получить оценку возможного быстродействия системы подстройки частоты.



Рисунок 3.6. – Зависимость отклонения разности фаз (Ψ) от количества периодов (t/f) и добротности колебательной системы (Q) после перестройки частоты выходного сигнала генератора на величину $\Delta f = -0.15\Gamma \mu$

Из поведенного анализа следует, что для предложенного режима вынужденных колебаний с поддержанием разности фаз путем подстройки частоты, максимальная отслеживаемая скорость изменения собственной частоты КС, предложенным способом, за время т будет определяться принятыми ограничениями (3.1) и (3.2), т.е. когда:

$$\Psi_{y} = y_{a}(Q(0), \omega_{0}(0)) - y_{a}(Q(\tau), \omega_{0}(\tau))$$
(3.13)

$$\psi_{\varphi} = \varphi(Q(0), \omega_0(0)) - \varphi(Q(\tau), \omega_0(\tau))$$
(3.14)

При этом разность частоты выходного сигнала генератора и собственной частоте КС (при выполнении условия (3.6)) не будет превышать шага Δω перестройки частоты генератора.

Необходимо отметить, что даже при значительном отклонении частоты выходного сигнала генератора от значения собственной частоты КС возможно вычисление точных значений добротности и собственной частоты по выражениям, полученным из (1.33) [16,119,132]:

$$\xi^{2} = 1 \pm \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{y_{a}}{y_{cm}}\right)^{2} \left[1 + tg^{2}(\varphi)\right]}}, "+" \partial_{\pi} \varphi > \frac{\pi}{2}, \qquad (3.15)$$

$$Q = \frac{\xi}{\sqrt{\left(\frac{y_{cm}}{y_{a}}\right)^{2} - (1 - \xi^{2})^{2}}}$$
(3.16)

ИЛИ

$$Q = \frac{\xi}{(1 - \xi^2) t g(\varphi)}.$$
 (3.17)

Видно, что для вычислений необходимо знать значение разности фаз, амплитуды и частоты вынужденных колебаний, а также статическое смещение. Таким образом, погрешность вычисления параметров КС при неточной установке частоты выходного сигнала генератора равной собственной частоте КС будет зависеть только от шумов в измерительных трактах Ѱу и Ѱф.

Согласно выражению (3.15) после каждого измерения амплитуды вынужденных колебаний и разности фаз можно вычислять и устанавливать частоту выходного сигнала генератора равной собственной частоте КС. При этом шаг перестройки частоты генератора, $\Delta \omega$ необходимо выбрать таким, чтобы вызываемое изменение разности фазы при перестройке $\Delta \phi (\Delta \omega)$ было меньше, чем шумы Ψ_{ϕ} в тракте измерения разности фаз:

$$\Delta \varphi(\Delta \omega) \le \Psi_{\odot} \,. \tag{3.18}$$

Очевидно, что данный способ перестройки потребует больших вычислительных мощностей, относительно ранее предложенного способа. При этом величина перестройки частоты генератора в обоих случаях будет примерно одна и та же если выполняется условие (3.18). При выполнении (3.6) в ходе отслеживания изменения собственной частоты КС периодичность изменения частоты выходного сигнала генератора на величину $\Delta \omega$ возможна с частотой обновления информации о разности фаз, т.е. максимальная скорость перестройки будет $\Delta \omega \cdot f_{mek}$, где f_{mek} – текущая частота выходного сигнала генератора, частота при котором было произведено измерение разности фаз [29,119].

В некоторых случаях корректное измерение амплитуды колебаний невозможно или крайне сложно [10,16,69,98,133]. Для этого случая был разработан способом определения добротности электромеханической КС по ФЧХ [133].

3.4 Способ определения добротности электромеханической колебательной системы по фазо-частотной характеристике

Предлагаемый способ основан на том, что для КС с одной степенью свободы на собственной частоте ω_0 разность фаз ϕ между вынуждающей силой и колебаниями КС равна 90° при любом значении Q добротности КС [18,74,130–134]. Это следует из теоретически известной ФЧХ такой системы (1.33) [18]. При изменении частоты от ω_0 до ω_1 фазовый сдвиг между вынуждающей силой и выходным сигналом датчика положения изменится и становится равным 90°+ ϕ_1 рад, и в соответствии с (1.33), будет справедливо следующее выражение:

$$tg\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{1}\right) = \frac{\omega_{1}}{\omega_{0}} \cdot \frac{1}{Q} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{1}}{\omega_{0}}\right)^{2}},$$
(3.19)

где ω_1 – частота колебаний, на которой фазовый сдвиг равен $\pi/2 + \phi_1$ рад.

Как известно

$$tg\left(\frac{\pi}{2}+\varphi_{1}\right)=-ctg(\varphi_{1})=-\frac{1}{tg(\varphi_{1})}.$$
(3.20)

Из (3.19) и (3.20) добротность определяется как:

$$Q = \frac{\omega_1}{\omega_0} \frac{tg(\varphi_1)}{\left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2 - 1}.$$
(3.21)

С учетом выше изложенного предлагаемый способ реализуется следующим образом. Определяется частота ω_0 вынуждающей силы для КС, при которой сдвиг

фазы φ между вынуждающей силой и колебаниями КС равен $\pi/2$ рад. Далее частоту вынуждающей силы для КС изменяют до значения ω_1 , при которой сдвиг фазы между вынуждающей силой и колебаниями КС становится равным $\pi/2+\varphi_1$, при этом φ_1 выбирается не равным $\pi/2$. При уменьшении задаваемого значения $|\pi/2-\varphi_1|$ уменьшается диапазон перестройки частоты от ω_0 до ω_1 , тем самым уменьшается время определения Q [133].

Погрешность определения добротности в стационарном режиме будет определяться точностью установления ω_0 и ω_1 , точностью измерения $\phi_0=\pi/2$ рад и ϕ_1 . В нестационарном режиме работы КС погрешность измерения добротности обусловлена ещё и изменением собственной частоты КС в ходе установления ω_1 и определяется согласно (3.21) выражением:

$$\Delta Q = Q_{me\kappa} - Q_{u_{3M}} = tg(\varphi_1) \cdot \frac{\omega_1(\omega_1^2 - \omega_{u_{3M}} \cdot \omega_{me\kappa})(\omega_{u_{3M}} - \omega_{me\kappa})}{(\omega_1^2 - \omega_{me\kappa}^2)(\omega_{u_{3M}}^2 - \omega_1^2)}, \qquad (3.22)$$

где $Q_{me\kappa}$ – реальное значение добротности, $Q_{u_{3M}}$ – измеренное значение добротности в соответствии (3.21), $\omega_{me\kappa}$ – реальное значение собственной частоты КС в момент времени измерения ω_1 , $\omega_{u_{3M}}$ – измеренное значение собственной частот КС

Таким образом, предложенный способ определения добротности электромеханической КС по ФЧХ позволяет измерять добротность КС датчиков без измерения амплитуды колебаний. Описанный способ имеет недостаток, для перестройки с частоты ω_0 до ω_1 и обратно потребуется затратить некоторое время (см. раздел 3.2).

3.5 Алгоритм подстройки частоты выходного сигнала генератора

Как было отмечено в разделе 3.3, для реализации предложенного способа (раздел 3.1) целесообразнее всего перестраивать частоту выходного сигнала генератора на фиксированный шаг $\Delta \omega$ [29,119,74,130–134]. Решение о перестройке генератора можно принять после измерения разности фаз между сигналом возбуждения и выходным сигналом КС, если соблюдается условие (3.6) и при этом $\varphi_0 \neq \pi/2$ [74,130,134].

Схема алгоритма принятия решения о перестройке частоты выходного сигнала генератора, представлена на рисунке 3.7. Алгоритм запускается после получения информации о разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика колебательной системы. Выполнение алгоритма реализуется в виде программного кода (подпрограммы) в модуле управления генератором (рисунок 3.7).

Вначале в подпрограмму загружаются все необходимые данные, а именно:

- текущая частота выходного сигнала генератора (ω);
- шаг изменения частоты (Δω);
- количество проведенных измерений разности фаз после принятия решения об изменении частоты (*N*);
- измеренное значение разности фаз (физм);
- значение разности фаз колебательной системы, при котором было принято решение об изменении частоты (φ_i);
- значение разности фаз вносимые вспомогательными элементами (не колебательной системой) для данной частоте (φ_T(ω));
- величина шумов в измерительном тракте разности фаз (ϕ_{Ψ}).

После загрузки необходимых данных производится вычисление значения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика колебательной системы (ϕ_{i+N}), таким образом, исключается влияние вспомогательных элементов системы. Происходит проверка условия (3.6). Если условие (3.6) не выполняется, то программа завершает свое выполнение. При выполнении условия (3.6) программа вычисляет величину отклонения ($\Delta \phi$) от значения $\pi/2$. Если величина отклонения меньше чем шумы в тракте измерения разности фаз, то программа завершает свое выполнения проверяет, в какую сторону необходимо изменить частоту выходного сигнала генератора. После вычисления нового значения частоты запоминаются необходимые переменные и передаются в основную программу, что в свою очередь является итогом работы данного алгоритма [74,130,134].





3.6 Режим возбуждения колебательных систем с поддержанием максимальной амплитуды колебаний путем подстройки частоты

В общем случае возможен режим подстройки частоты генератора к собственной частоте КС с поддержанием максимальной амплитуды колебаний зонда КС. Для разработки такого алгоритма необходимо использовать формулы, связывающие максимальную амплитуду колебаний и собственную частоту КС при заданных начальных значениях параметров (η) КС:

$$A_{\max} = F(\omega_{co\delta}, \eta); \ \omega_{co\delta} = W(\eta).$$
(3.23)

Тогда изменение максимальной амплитуды колебаний КС при малом изменении параметра η КС можно записать в виде полного дифференциала:

$$\Delta A_{\max} = \frac{\partial F}{\partial \omega_{co\delta}} \Delta \omega_{co\delta} + \frac{\partial F}{\partial \eta} \Delta \eta, \qquad (3.24)$$

а изменение собственной частоты колебаний КС определяется по формуле

$$\Delta \omega_{co\delta} = \frac{\partial W}{\partial \eta} \Delta \eta \,. \tag{3.25}$$

Подставляя (3.25) в выражение для приращения максимальной амплитуды получим

$$\Delta A_{\max} = \frac{\partial F}{\partial \omega_{co\delta}} \frac{\partial W}{\partial \eta} \Delta \eta + \frac{\partial F}{\partial \eta} \Delta \eta, \qquad (3.26)$$

откуда

$$\Delta \eta = \frac{\Delta A_{\text{max}}}{\frac{\partial F}{\partial \omega_{co\delta}} \frac{\partial W}{\partial \eta} + \frac{\partial F}{\partial \eta}}.$$
(3.27)

Измеряя на каждом шаге изменение максимальной амплитуды, вычисляем по формуле (1.33) приращение параметра η КС и, подставляя это значение в (3.25), получим выражение для расчета изменения собственной частоты КС

$$\Delta \omega_{co\delta} = \frac{\partial W}{\partial \eta} \frac{\Delta A_{\max}}{\frac{\partial F}{\partial \omega_{co\delta}} \frac{\partial W}{\partial \eta} + \frac{\partial F}{\partial \eta}} = K(\omega_{co\delta}, \eta) \Delta A_{\max}, \qquad (3.28)$$

где
$$K(\omega, \eta) = \frac{\frac{\partial W}{\partial \eta}}{\frac{\partial F}{\partial \omega_{co\delta}} \frac{\partial W}{\partial \eta} + \frac{\partial F}{\partial \eta}} = \left(\frac{\partial F}{\partial \omega_{co\delta}} + \frac{\partial F}{\partial W}\right)^{-1}$$

ATT7

Несмотря на громоздкие формулы, алгоритм управления частотой генератора возбуждения с поддержанием максимальной амплитуды технически не сложно реализовать, при этом амплитуду колебаний целесообразно измерять на каждом периоде. В этом способе минимально измеряемое изменение амплитуды будет определяться шумами и погрешностью АЦП. Исходя из этого порогового значения ΔA_{nop} будет определяться и оптимальный шаг перестройки частоты генератора сигнала возбуждения.

3.7 Выводы

1. Предложен режим возбуждения КС с поддержанием заданного значения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика путем подстройки частоты возбуждающего сигнала позволяющий измерять параметры низкодобротных КС, когда неприменимы другие режимы возбуждения КС. В отличие от автоколебательного и от обычного режима вынужденных колебаний, предложенный режим позволяет исследовать динамику изменения параметров КС с малой добротностью в реальном времени [29,120].

2. На основе анализа работы КС в режиме с подстройкой частоты разработан алгоритм подстройки частоты сигнала управляемого генератора.

3. Проведенный анализ работы КС с подстройкой частоты сигнала возбуждения показал, что:

 перестройку частоты выходного сигнала генератора целесообразнее всего производить при выполнении условия (3.6);

– при соблюдении условия (3.6) целесообразнее всего перестраивать частоту выходного сигнала генератора на фиксированный шаг $\Delta \omega$, а не вычислять собственную частоту ω_0 КС;

 величину шага Δω перестройки частоты необходимо выбирать такой, чтобы изменения разности фаз и амплитуды колебаний, вызванные изменением частоты сигнала возбуждения, были меньше, чем погрешность измерения этих величин; в противном случае необходимо некоторое время для затухания переходных процессов;

изменение частоты выходного сигнала генератора на величину Δω возможно с частотой обновления информации о разности фаз при принятии решения в соответствии с условием (3.6);

 даже в случае отклонения частоты выходного сигнала генератора от значения собственной частоты КС возможно точное определение параметров системы по значениям амплитуды колебаний и разности фаз.

3. В общем случае, в датчиках на основе электромеханических КС возможен режим подстройки частоты генератора к собственной частоте КС с поддержанием максимальной амплитуды колебаний зонда КС. Для реализации такого режима необходимо знать функциональную зависимость, связывающую максимальную амплитуду колебаний и собственную частоту КС при заданных начальных значениях параметров КС.

Глава 4. Экспериментальная установка для исследования метрологических характеристик вибровискозиметрического датчика на основе электромеханической колебательной системы

4.1. Конструкция и принцип работы вибровискозиметрического датчика

Предложенные способы и алгоритмы управления режимом возбуждения КС апробированы и исследованы на примере ВВД камертонного типа, разработанного в УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН и используемого в составе Анализатора низкотемпературных свойств жидкостей [60,66–75] (далее Анализатор). Анализатор предназначен для измерения температурных зависимостей плотности и вязкости многокомпонентных жидкостей, в частности нефтепродуктов [66,67,72,73]. При измерении указанных зависимостей небольшую пробу жидкости охлаждают и нагревают по заданному (обычно, линейному) закону [66–68,70–73,138–144]. При изменении температуры жидкости изменяются её вязкость и плотность, что приводит к изменению амплитуды и частоты колебаний КС и ее добротности, которые и регистрируются ВВД [10,11,29,69,74,119,131–134,141,145]. По результатам изменения амплитуды и частоты КС для заданного режима возбуждения по известным формулам (2.8), (2.9) рассчитываются параметры КС: присоединенная масса m и коэффициент демпфирования h [17–19]. По рассчитанным параметрам КС вязкость η и плотность ρ жидкости находятся путем решения системы уравнений [11,19,37]:

$$h = 3\pi\eta d \left(1 + \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\omega\rho}{2\eta}} \right)$$

$$m = \frac{\pi}{12} d^3 \left(\rho + \frac{9}{d} \sqrt{\frac{2\eta\rho}{\omega}} \right)$$
(4.1)

d – диаметр зонда ВВД.

Основой ВВД [11,19,37] является КС, в состав которой входит камертон 1 и стеклянный шток 4 со сферическим зондом 5 на конце, прикрепленным к нижнему плечу камертона (рисунок 4.1). Для измерения отклонения плеч камертона от положения равновесия используется датчик положения 2 на основе оптрона с открытым оптическим каналом. Электромагнитный возбудитель 3 создает периодическую силу, действующую на камертон, зонд 5 которого во время испытаний находится в исследуемой жидкости, температура зонда 5 измеряется термопарой, размещенной внутри зонда. Температура зонда 5 фактически является температурой жидкости, что дает дополнительную информацию при исследовании жидкости. Технические характеристики ВВД, описание его электронной части и порядка настройки электромеханической КС ВВД представлены в приложении Б.



Рисунок 4.1. – Конструкция основного узла вибровискозиметрического датчика

На базе Анализатора создан лабораторный стенд для исследования метрологических характеристик ВВД в трех режимах работы КС: в автоколебательном режиме, в режиме вынужденных колебаний на фиксированной частоте и режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика путем подстройки частоты возбуждающего сигнала. Для проведения исследований были реализованы возможности:

-сформировать возбуждающий сигнал;

-измерять амплитуду выходного сигнала ВВД;

- в автоколебательном режиме измерять частоту выходного сигнала ВВД;

 в режимах с внешним возбуждением измерять разность фаз между сигналом возбуждения и выходным сигналом ВВД

– перестраивать частоту генератора по сигналу измерителя разности фаз.

Блок охлаждения и нагрева предназначен для изменения по заданному закону температуры исследуемого образца жидкости. Описание блока охлаждения и нагрева представлено в приложении В [60,66–68,70–73,138–140,142].

На блок охлаждения и нагрева устанавливается измерительная кювета с исследуемой пробой, которая совмещена с волоконно-оптическим датчиком [146–153] проходного типа [154], предназначенным для измерения оптических свойств жидкостей в ходе испытания [138–140, 155–162](см. Приложение Г).

4.2 Варианты формирования возбуждающего сигнала

Каскады, отвечающие за формирование возбуждающего сигнала ВВД, реализованы на объединительной плате Анализатора (Приложение Д).

Для режимов с внешним возбуждением использовался генератор электрических сигналов низкой частоты. Основными критериями выбора генератора НЧ являлись: возможность управления частотой выходного сигнала и форма сигнала возбуждения [163–166]. В качестве сигнала возбуждения КС используется периодические сигналы [11,17–20,29,69,74,119,131,132,134,141,145]: синусоидальной формы и меандр. Сигналы других форм (пилообразной, треугольной и т.д.), не рассматривались, так как не имели дополнительных преимуществ [35,167–174].

В качестве основной формы сигнала возбуждения в конечном варианте АПК использовался меандр. Это было обусловлено тем, что при проектировании АПК в качестве управляющего устройства был выбран микроконтроллер серии АТ91SAM7X, в состав которого входит программируемый ШИМ регулятор [172]. Согласно [17,167,168,173,174], использование сигнала формы меандр не внесет существенных искажений в форму выходного сигнала КС.

В автоколебательном режиме в качестве источника возбуждающего сигнала используется прошедший через фазовращатель выходной сигнал ВВД сдвинутый по фазе для обеспечения положительной обратной связи (автогенерации) [17–19].

4.3 Способы измерения амплитуды выходного сигнала ВВД

При выборе способа измерения амплитуды сигнала ВВД ориентировались на следующие критерии:

 возможность измерять амплитуду выходного сигнала ВВД при любом способе возбуждения ВВД;

возможность измерения амплитуды выходного сигнала ВВД в каждом периоде колебаний;

- минимальная погрешность измерения.

При измерении CB3 и CK3 время измерения определяется постоянной времени ФНЧ [17,38,101,135]. Метод синхронного детектирования [135] также не позволяет измерять амплитуду выходного сигнала BBД в каждом периоде колебаний. Кроме того из-за высокой чувствительности синхронного детектора к разности фаз между опорным и измеряемым сигналом усложнит реализацию режимов работы BBД.

Для измерения амплитуды выходного сигнала ВВД в каждом периоде разработан способ синхронной выборки, заключающийся в синхронизации моментов выборок АЦП с фазой выходного сигнала ВВД. Сущность способа заключается в осуществлении выборки АЦП в момент времени, соответствующий максимальному значению сигнала за один период (при фазе гармонического сигнала равной $\pi/2$ или $3\pi/2$ рад) [66,67,70–73,133,138].

Таким образом, для измерения амплитуды выходного сигнала ВВД подходят два способа: пиковый детектор [17,135,175] и метод синхронной выборки [70–73]. Для выбора одного из двух способов было проведено их сравнение путем численного моделирования с наложением на измеряемый сигнал белого шума P(t). Исходные данные для численного моделирования представлены в таблице 4.1.

При моделировании измерения амплитуды ВВД пиковым детектором использовалась структурная схема, представленная на рисунке 4.2, а методом синхронной выборки – на рисунке 4.3. Компаратор служит для фиксации момента перехода измеряемого сигнала через «ноль». В пиковом детекторе по сигналу от компаратора устройство управления вырабатывает команду измерения для АЦП.

таолица 4.1 Пеходные данные для численного моделирования процессаизмерения амплитуд			
	Вид сигнала	$A(t) = A\sin(\omega t) + P(t)$	
	Амплитуда входного сигнала	A=1 B	
	Частота сигнала	$\omega=2\pi f$, $f=300~\Gamma u$	
	Интервал времени моделирования	$t = 0\frac{10^3}{f}$, при $\Delta t = \frac{1}{f \cdot 10^4}$	
	Характеристика шума в сигнале	P(t) - белый шум с нормальным распределением	

Таблица 4.1 – Исходные данные для численного моделирования процессаизмерения амплитуды.



Рисунок 4.2. – Структурная схема пикового детектора





При моделировании измерения амплитуды ВВД пиковым детектором использовалась структурная схема, представленная на рисунке 4.2, а методом синхронной выборки – на рисунке 4.3. Компаратор служит для фиксации момента перехода измеряемого сигнала через «ноль». В пиковом детекторе по сигналу от компаратора устройство управления вырабатывает команду измерения для АЦП. По окончании измерения формируется сигнал сброса. За период производится два измерения амплитуды сигнала: положительной и отрицательной полуволны; по измеренным значениям находится средняя амплитуда за период.

В методе синхронной выборки (рисунок 4.3) необходимо измерять период сигнала. Для этого компаратор настраивается на момент перехода сигнала через ноль. По выходному сигналу компаратора устройство управления производит измерение периода. По измеренному значению предыдущего периода сигнала устройство управления вырабатывает команду измерения для АЦП в моменты времени равные ¹/₄ и ³/₄ периода. По двум измеренным значениям находится средняя амплитуда за период.

На рисунке 4.4 представлены результаты расчета среднеквадратического отклонения (СКО) измеренного значения амплитуды сигнала от среднего значения в зависимости от отношения сигнал-шум. Из рисунка видно, что случайная составляющая погрешности измерения амплитуды сигнала ВВД методом синхронной выборки примерно в 3 раза больше, чем пиковым детектором.



Отношение среднеквадратического отклонения шума к амплитуде (σ / A), %

Рисунок 4.4. – Зависимость СКО измеренного значения амплитуды от уровня шума

Это связано с тем, что при измерении амплитуды выходного сигнала ВВД методом синхронной выборки к наложенному шуму добавляется методическая (апертурная) погрешность [66,67,176,177], обусловленная неточной синхронизацией момента выборки АЦП с моментом максимального отклонения зонда ВВД от положения равновесия. Эту погрешность можно оценить по формуле:

$$\frac{\Delta A}{A} = 1 - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta t}{T}, \qquad (4.2)$$

где ΔA – абсолютная погрешность измерения амплитуды колебаний зонда ВВД, Δt – отклонение момента выборки АЦП от момента максимального отклонения зонда ВВД, *T* – период колебаний зонда ВВД. Отличие момента выборки АЦП от момента максимального отклонения датчика ВВД (Δ*t*) может быть вызвано несколькими факторами [66,67,176,177]:

– неправильное вычисление моментов выборки АЦП вследствие низкой разрешающей способности по времени устройства управления;

– влияние шумов на компаратор.

Результаты численного расчета отклонения среднего измеренного значения амплитуды сигнала ВВД от истинного (заданного) значения в зависимости от отношения шум/сигнал при измерении амплитуды пиковым детектором и методом синхронной выборки показаны на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5. – Зависимость средней ошибки измерения в зависимости от шумовой составляющей входного сигнала по результатам численного моделирования

Абсолютная систематическая погрешность измерения амплитуды пикового детектора всегда положительна и составляет $\approx 3\sigma_{\text{Ш}}$, тогда как погрешность измерения амплитуды методом синхронной выборки может быть как положительной, так и отрицательной (на рисунке 4.10 график построен для модуля погрешности).

По результатам численного моделирования можно сделать вывод, что при наложении на измеряемый сигнал шумовой составляющей результат измерения амплитуды выходного сигнала ВВД методом синхронной выборки имеет меньшую суммарную погрешность, чем при измерении пиковым детектором.

4.4 Измерение частоты в автоколебательном режиме и разности фаз в режиме вынужденных колебаний

При измерении амплитуды выходного сигнала ВВД методом синхронной выборки необходимо синхронизировать моменты выборок АЦП с фазой выходного сигнала ВВД. Синхронизацию лучше проводить по моменту перехода сигнала через ноль, поскольку этот момент не зависит от амплитуды измеряемого сигнала. Для фиксации момента перехода через ноль использован компаратор, выходные импульсы которого управляют таймер-счетчиком микроконтроллера. Таймер-счетчик задает моменты времени, соответствующие максимальному значению сигнала за период [66,67]. Период колебаний определяется как интервал времени между выходными импульсами компаратора.

При работе в режиме вынужденных колебаний частота выходного сигнала ВВД известна. Сигнал, вырабатываемый компаратором, используется и для синхронизации моментов выборки АЦП и для измерения разности фаз между сигналом возбуждения и выходным сигналом ВВД.

В автоколебательном режиме необходимо измерять частоту выходного сигнала ВВД и для задания моментов выборки АЦП используется значение частоты, измеренное в предыдущем периоде колебаний.

4.5 Описание структурной схемы аппаратно-программного комплекса для исследования теплофизических свойств жидкостей

Структурная схема аппаратно-программного комплекса (АПК) для исследования теплофизических свойств жидкостей представлена на рисунке 4.6. Охлаждение и нагрев кюветы с пробой жидкости производится с помощью элементов Пельтье (1-я ступень и 2-я ступень). Изменение температуры кюветы осуществляется путем изменения величины и полярности тока, поступающего на элемент Пельтье второй ступени от устройства управления термомодулем. Для повышения стабильности изменения температуры кюветы в качестве сигнала, задающего закон изменения температуры, используется напряжение с выхода цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Сигналы с термодатчика 2 и ЦАП поступают на вычитающее



Рисунок 4.6. – Структурная схема АПК

устройство, которое вырабатывает сигнал ошибки ($U_{\text{ошиб}}$). Этот сигнал управляет мощным операционным усилителем, питающим элемент Пельтье.

В процессе охлаждения пробы с помощью АЦП измеряются сигналы с ВВД $(U_{вибp})$, термодатчика зонда (U_{T1}) , датчика оптического пропускания жидкости (U_{ontr}) и термодатчика кюветы (U_{T2}) . Перед подачей на вход АЦП сигналы проходят через фильтры нижних частот (ФНЧ_1, ФНЧ_2, ФНЧ_3, ФНЧ_4), что повышает отношение сигнала к шуму. Выбор сигнала для цифрового преобразования осуществляется с помощью коммутатора (Коммутатор_1), управляемого микроконтроллером. При любом способе возбуждения сигнал с выхода коммутатора поступает на устройство формирования напряжения возбуждения, где происходит его усиление и подстройка фазового сдвига [10,11,29,66–74,119,131–134,138, 138–145].

Кроме измерения температурных и вязкостных характеристик жидкостей в АПК предусмотрено измерение их оптических свойств жидкостей в ходе испытаний [138–140, 155–162]. Оптический канал АПК выполнен в виде волоконно-оптического датчика проходного типа [154] (см. Приложение Г). С использованием оптического канала предложен и реализован способ определения температурой помутнения и кристаллизации дизельных и авиационных топлив [139,142,143,178] по изменению (снижению) оптического сигнала.

Для повышения быстродействия и точности совместных измерений параметров колебаний ВВД, температуры кюветы и зонда ВВД, сигнала от оптического модуля предложен способ синхронизации моментов выборок АЦП с фазой выходного сигнала ВВД [66,67]. Сущность способа поясняет рисунок 4.7. Сигнал с ВВД выпрямляется двухполупериодным измерительным выпрямителем. Моменты выборки сигналов датчиков обозначены цифрами. В моменты времени 2 и 2′ измеряется амплитуда колебаний зонда ВВД (см. раздел 4.3).



Рисунок 4.7 – Временная диаграмма процессов выборки сигналов датчиков

Эти моменты выборок выходного сигнала ВВД соответствуют максимумам его амплитуды (фаза гармонического сигнала равна 90° и 270°). В результате код на выходе АЦП соответствует амплитуде измеряемого сигнала [177].

В моменты времени 4 и 4' измеряется интенсивность оптического излучения, проходящего через исследуемую пробу. Этот момент соответствует нейтральному положению зонда ВВД относительно потока оптического излучения. Благодаря этому удается минимизировать эффект модуляции оптического излучения зондом ВВД, который частично перекрывает путь распространения излучения оптического датчика, и добиться независимости показаний оптического датчика от амплитуды колебаний зонда ВВД [68].

В моменты времени 1 и 1' измеряется температура зонда ВВД. В моменты времени 3 и 3' измеряется температура кюветы с исследуемой пробой.

Таким образом, за один период колебания зонда ВВД все сигналы измеряются дважды и затем усредняются.

Совместное измерение сигналов оптического датчика, ВВД и термопар кюветы и зонда ВВД [66,67] реализовано модулем сбора данных (Приложение Е). Результаты измерений в виде кадров, содержащих 100 выборок для каждого из сигналов, передаются на компьютер (РС) [68].

4.6 Анализ методических погрешностей измерения параметров сигналов вибровискозиметрического датчика

4.6.1 Анализ погрешностей измерения амплитуды вибровискозиметрического датчика в режиме вынужденных колебаний

Для измерения периода колебаний сигнала ВВД используется таймерсчетчик микроконтроллера. На его вход с выхода компаратора поступают прямоугольные импульсы, фронты которых соответствуют моментам перехода сигнала ВВД через нуль. По этим импульсам таймер-счетчик микроконтроллера определяет период колебаний и осуществляет привязку моментов выборок АЦП к нулевой фазе колебаний зонда ВВД [66,67,177].

При анализе возможных погрешностей при измерении амплитуды сигнала ВВД принимались следующие исходные данные и допущения:

а) Измеряемый сигнал в общем виде может быть представлен суммой:

$$U(t) = A \cdot \sin(\omega t) + P(t), \qquad (4.3)$$

где A – амплитуда полезного сигнала, ω – угловая частота полезного сигнала, t – время, P(t) – сигнал ошибки или помехи.

b) Измеряемый сигнал U(t) поступает на вход идеального выпрямителя.

с) Микроконтроллер непрерывно формирует тактовые импульсы с постоянным и высокостабильным периодом τ и содержит в своем составе таймерсчетчик тактовых импульсов, управляемый идеальным компаратором.

d) Выпрямленное напряжение сигнала U(t) оцифровывается однополярным быстродействующим АЦП в моменты времени θ по командам микроконтроллера.

Задача анализа состоит в оценке методической погрешности измерения параметров сигнала A и ω в каждом периоде колебаний при различных видах помех с учетом того, что в общем случае частота сигнала ω может являться монотонной или случайной функцией времени $\omega(t)$.

Случай 1. В простейшем случае сигнал U(t) считаем идеальным, т.е.

$$\omega(t) = \omega_0 = const \ u \ P(t) = 0. \tag{4.4}$$

Определение амплитуды A и частоты ω_0 сигнала [67], в этом случае осуществляется следующим образом. Запуск и остановка таймера-счетчика микроконтроллера происходят в каждом периоде измеряемого сигнала, и в каждом периоде счетчик накапливает $N_{u_{3M}}$ импульсов тактового генератора. Значения периода $T_{u_{3M}}$ и частоты $\omega_{u_{3M}}$ колебаний определяется по числу $N_{u_{3M}}$ накопленных импульсов:

$$T_{u3M} = \frac{2\pi}{\omega_{u3M}} = N_{u3M} \cdot \tau \ . \tag{4.5}$$

Максимальная погрешность дискретизации при измерении периода методом дискретного счета, как известно [177], равна $\pm \tau$.

По значению $N_{u_{3M}}$ в каждом последующем периоде таймер-счетчик задает (вырабатывает сигнал) момент времени $\theta = T_{u_{3M}}/4 = N_{u_{3M}}\tau/4$, при котором $sin(\omega_0 t)=1$, т.е. фаза сигнала равна $\frac{\pi}{2}$. В этот момент времени θ АЦП преобразует выпрямленный сигнал в цифровой код, подаваемый в оперативную память.

Так как в автоколебательном режиме работы ВВД значение текущего периода неизвестно [66,177], то определение θ производится по результатам измерения предыдущего периода сигнала. Поскольку максимальная погрешность определения момента θ для сигналов с постоянной частотой не превышает τ , то относительная апертурная погрешность измерения амплитуды идеального сигнала, обусловленная дискретизацией по времени, согласно (4.3) запишется в виде:

$$\delta_{A} = \frac{\Delta A}{A} = 1 - \cos \frac{2\pi \cdot \tau}{T_{_{U3M}}}.$$
(4.6)

При условии 2*π* · *τ* << *T*_{изм} функцию косинуса с достаточной точностью можно представить двумя первыми членами ряда Маклорена [165]:

$$\cos\left(\frac{2\pi\cdot\tau}{T_{_{u_{3M}}}}\right) \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi\cdot\tau}{T_{_{u_{3M}}}}\right)^2.$$
(4.7)

Подставляя (4.7) в (4.6) получим:

$$\delta_{A} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi \cdot \tau}{T_{_{u_{3M}}}} \right)^{2} . \tag{4.8}$$

При использовании счетчика с достаточно высокой тактовой частотой, например, $\tau < 10^{-7}$ с при $T_{_{U3M}} > 10^{-3}$ с апертурная погрешность будет $\delta_A < 4 \times 10^{-7}$, то

есть пренебрежимо малой [37,38]. Для этого необходимо тактовый генератор счетчика микроконтроллера запрограммировать на частоту выше 10 МГц.

Случай 2. Рассмотрим случай, когда частота измеряемого сигнала меняется от времени. При постоянстве амплитуды измеряемого сигнала в отсутствии помехи ($P(t) \equiv 0$) и небольшом изменении текущего периода (T_2) относительно предшествующего периода (T_1) сигнал U(t) можно считать квазисинусоидальным, т.е. считать, что в каждом периоде сигнал описывается синусоидальной функцией времени.

Разность $\Delta T = T_2 - T_1$ значений текущего и предшествующего периодов колебаний приводит к отклонению расчетного значения момента выборки АЦП от истинного значения θ и появлению дополнительной апертурной погрешности измерения амплитуды сигнала. В результате измеренное АЦП значение U(t) будет меньше истинной амплитуды сигнала

$$A_{\mu_{3M}} = A \times \cos(\Delta T/T_2). \tag{4.9}$$

Заметим, что эту погрешность можно достаточно легко компенсировать последующей обработкой данных; при известных значениях T_1 и T_2 истинное значение амплитуды находится из (4.9):

$$A = A_{\mu_{3M}} \times \cos^{-1} \left(\Delta T / T_2 \right). \tag{4.10}$$

Случай 3. Рассмотрим погрешность измерения, вызванную наличием помехи в виде постоянной составляющей: P(t) = z = const.

В этом случае срабатыванию компаратора по нулевому уровню будет соответствовать условие:

$$A \times sin(\varphi) + z = 0, \tag{4.11}$$

откуда легко находится значение срабатывания компаратора:

$$\varphi = \arcsin\left(-\frac{z}{A}\right),\tag{4.12}$$

и относительная апертурная погрешность δ_A измерения амплитуды сигнала:

$$\delta_{A} = \frac{\Delta A}{A} = 1 - \cos\left[\arcsin\left(-\frac{z}{A}\right)\right]. \tag{4.13}$$

Для измеренного значения амплитуды сигнала $A_{u_{3M}}$ можно записать следующее выражение:

$$A_{\mu_{3M}} = A - \delta_A \cdot A + z , \qquad (4.14)$$

и суммарная относительная погрешность измерения амплитуды составит:

$$\delta_{A_{uum}} = \frac{z}{A} - \delta_A \tag{4.15}$$

При $\frac{z}{A} < 0,1$ $\delta_A < 5 \times 10^{-3}$ и суммарная погрешность измерения амплитуды

будет определяться аддитивной составляющей погрешности $\delta_{a\partial} = z/A$.

Влияние постоянной составляющей на погрешность измерения амплитуды можно исключить, если пропустить сигнал через двухполупериодный выпрямитель и измерять его амплитуду в каждом полупериоде в фазовых точках 90° и 270° относительно момента запуска счетчика-таймера. Для значений амплитуд $A_{uзм1}$ и $A_{uзм2}$ в этих точках в соответствии с (4.14) можно записать

$$A_{_{u_{3M1}}} = A - \delta_{_{A}} \cdot A + z \,, \ A_{_{u_{3M2}}} = A - \delta_{_{A}} \cdot A - z \,. \tag{4.16}$$

При вычислении среднего значения амплитуды аддитивная составляющая сокращается:

$$A_{u_{3M}} = \frac{A_{u_{3M}} + A_{u_{3M}2}}{2} = A - \delta_A \cdot A, \qquad (4.17)$$

и остается только мультипликативная составляющая $\delta_A << \delta_{Au_{3M}}$.

Случай 4. Проведем оценку погрешности измерения амплитуды при наличии в измерительном сигнале помехи промышленной частоты [177]:

$$P(t) = B \cdot \sin(\Omega \cdot t), \qquad (4.18)$$

где Ω – угловая промышленная частота, а B – амплитуда помехи.

Помеха систематическая и максимальная суммарная погрешность измерения амплитуды A будет равна сумме максимальной аддитивной δ_{ad} и максимальной апертурной δ_{an} погрешностей.

Используя ранее описанную процедуру усреднения измерений в соответствии с выражением (4.17), получим:

$$\delta_{a\partial} = \frac{B}{2A} \times \sin\left(\frac{\pi\Omega}{\omega}\right). \tag{4.19}$$

При этих условиях легко показать, что апертурная погрешность имеет вид:

$$\delta_{an} = 1 - \cos\left[\arcsin\left(\frac{B}{A} \times \sin\frac{\pi\Omega}{2\omega}\right)\right].$$
(4.20)

Для сигналов с параметрами $\Omega = 2\pi \times 50$ рад/с, $\omega = 2\pi \times 500$ рад/с; B = 0, 1A, из выражений (4.19) и (4.20) получаем следующие значения для составляющих относительной погрешности $\delta_{ad} \approx 1,55 \times 10^{-2}$ и $\delta_{an} = 1,22 \times 10^{-4}$.

Случай 5. Рассмотрим погрешность измерения амплитуды, вызванную наличием помехи в виде белого шума [179,180].

Пусть сигнал помехи P(t) является случайным сигналом S(t) со средней амплитудой S_0 . В режиме двукратного запуска АЦП в моменты времени t_1 и t_1 + T/2 для измеренных значений амплитуд можно записать:

$$A_{u_{3M}l} = A + S(t_{l}); (4.21)$$

$$A_{u_{3M2}} = A + S\left(t_1 + \frac{T}{2}\right).$$
(4.22)

Рассмотренный способ оцифровки и обработки выходного сигнала ВВД может быть использован в других приложениях, где требуется следить за параметрами гармонического сигнала в каждом периоде.

4.6.2 Анализ погрешностей измерения периода сигнала вибровискозиметрического датчика в автоколебательном режиме

Как и в предыдущем разделе, измеряемый сигнал ВДД также представим выражением (4.3): $U(t) = A \cdot \sin(\omega t) + P(t)$.

Случай 1. В простейшем случае сигнал U(t) считаем идеальным, т.е. частота сигнала не меняется и сигнал помехи отсутствует:

$$\omega(t) = \omega_0 = const \text{ is } P(t) = 0. \tag{4.23}$$

Погрешность измерения периода T методом дискретного счёта равна τ , и соответственно для погрешности измерения частоты можно записать:

$$\Delta \omega = 2\pi \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T \pm \tau} \right) = 2\pi \left(\frac{\pm \tau}{T(T \pm \tau)} \right). \tag{4.24}$$

Так как $\tau \ll T$, то величиной τ в знаменателе можно пренебречь и [176]:

$$\Delta \omega = 2\pi \frac{\tau}{T^2} = \omega^2 \frac{\tau}{2\pi}.$$
(4.25)

Случай 2. Рассмотрим погрешность измерения периода, вызванную наличием постоянной составляющей в измеряемом сигнале: P(t) = z = const.

Так как полезный сигнал синусоидальный, то при срабатывании компаратора по нулевому уровню постоянное смещение сигнала не вызовет никакой дополнительной погрешности при измерении периода сигнала, поскольку запуск и остановка таймера-счетчика происходит с одинаковой задержкой. Погрешность измерения частоты в данном случае, как и в Случае 1, будет определяться только погрешностью дискретизации согласно (4.25) [176].

Случай 3. В случае, когда в измеряемом сигнале присутствует помеха в виде гармонического сигнала $P(t) = B \cdot \sin(\Omega \cdot t)$, где Ω – произвольная угловая частота помехи, а В – амплитуда помехи, момент срабатывания компаратора по нулевому уровню будет определяться из условия:

$$A \cdot \sin(\omega \cdot t) + B \cdot \sin(\Omega \cdot t) = 0.$$
(4.26)

Качественный анализ этого условия показывает, что гармоническая помеха вызывает эффект, подобный биениям, и погрешность измерения частоты полезного сигнала, в зависимости от соотношения фаз, частот и амплитуд сигнала и помехи, будет изменяться от нуля до некоего максимального значения.

Решение уравнения (4.27) для произвольного периода измеряемого сигнала является довольно громоздким и неудобным для анализа, поэтому оценка погрешности измерения периода колебаний полезного сигнала, для рассматриваемого случая, была проведена численным моделированием. По результатам численного моделирования были получены зависимости максимальной погрешности измерения периода колебания от отношения (*B/A*) амплитуд помехи и сигнала при заданных значениях отношения (ω/Ω) частоты измеряемого сигнала к частоте помехи. Из графиков на рисунке 4.8 видно, что эти зависимости хорошо описываются линейной функцией.

Численным моделированием получены зависимости погрешности измерения периода колебания от отношения (ω/Ω) частот при заданном отношении



Рисунок 4.8. График зависимости погрешности измерения периода синусоидального сигнала с гармонической помехой от соотношения амплитуд

(*В*/*А*) амплитуд. Полученные зависимости (рисунок 4.9) аппроксимированы выражением

$$\frac{\Delta T}{T} = 0.315 \frac{B}{A} \left(8.35 \cdot \sin\left(\frac{\omega}{\Omega} - \left\lfloor\frac{\omega}{\Omega}\right\rfloor + 1.07\right) - 7.34 \right)$$
(4.27)

с СКО аппроксимирующей кривой от результатов численного моделирования равным 5,2x10⁻⁴ [162].

Случай 4. Наиболее распространенной помехой является шум [176]. Допустим, что на измеряемый сигнал накладывается белый шум с ограниченной полосой со среднеквадратическим отклонением равным σ . Для оценки максимальной погрешности в этом случае амплитуду помехи примем равной $B \approx 3\sigma$. Тогда максимальная погрешность измерения периода составит [176]:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{2\pi} \arcsin\left(\frac{3\sigma}{A}\right). \tag{4.28}$$



значения численного моделирования
аппроксимирующая кривая

Рисунок 4.9. График зависимости погрешности измерения периода синусоидального сигнала с гармонической помехой от соотношения частот при *P*/*U* = 0,1

4.6.3 Анализ погрешностей измерения разности фаз сигнала датчика и сигнала возбуждения в режиме вынужденных колебаний.

Для измерения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика используется таймер-счетчик микроконтроллера. Таймер-счетчик подсчитывает число *n*_{изм} импульсов между соседними точками перехода через нуль сигнала генератора и сигнала ВВД. Так как период сигналов известен, то по подсчитанному числу импульсов разность фаз сигналов вычисляется по формуле:

$$\varphi = \frac{n_{\scriptscriptstyle u_{3M}} \cdot \tau}{2\pi \cdot T},\tag{4.29}$$

Поскольку максимальная погрешность дискретизации равна τ , то относительная погрешность измерения разности фаз определяется простой формулой

$$\delta_{\varphi} = n_{u_{3M}}^{-1}. \tag{4.30}$$

В случае №1, когда сигнал помехи отсутствует (4.32), погрешность измерения будет определяться только погрешностью измерения временного интервала таймер-счетчика в соответствии (4.30) [176].

При наличии постоянной составляющей в выходном сигнале ВВД (случай №2) моменту срабатывания компаратора по нулевому уровню будет соответствовать условие (4.10), приводя к ошибке измерения разности фаз [176]:

$$\Delta \varphi = \arcsin(-z/A). \tag{4.31}$$

В случае №3, когда в полезном сигнале присутствует гармонический сигнал помехи, срабатывание компаратора по нулевому уровню происходит при выполнении условия (4.26). При этом максимальная погрешность измерения фазы будет в том случае, когда компаратор сработает на пиковом значении помехи. Т.е максимальное значение ошибки $\Delta \varphi$ при измерении фазы будет аналогично случаю №2, а именно [176]:

$$\Delta \varphi = \arcsin(-B/A). \tag{4.32}$$

В случае №4 при наложении белого шума для оценки максимальной погрешности $\Delta \varphi_{max}$ измерения фазы полагаем $B \approx 3\sigma$ [176], и:

$$\Delta \varphi_{\max} = \arcsin(3\sigma/A). \tag{4.33}$$

4.7 Оценка инструментальной погрешности отдельных узлов АПК

Экспериментальное исследование инструментальной погрешности измерительного блока АПК проводилось в несколько этапов.

Вначале исследовалась погрешность АЦП в тестовом режиме. Для этого на вход АЦП подавалось высокостабильное напряжение, и производилась его оцифровка в течение 2,6 минуты, по массиву данных объемом 40000 выборок АЦП проводились оценки среднего и СКО результатов измерения.

Для исследования влияния на погрешность измерения энергопотребления АПК в различных режимах работы все измерения были проведены для двух значений температуры кюветы + 25 °С (энергопотребление термоэлектрических преобразователей мало) и минус 40 °С (энергопотребление термоэлектрических преобразователей близко к максимальному). В обоих случаях СКО во всем динамическом диапазоне АЦП составило не более 0,4% от максимального значения. Это свидетельствует о том, что наиболее энергоемкие блоки АПК не влияют на точность измерения.

После оценки относительной погрешности АЦП проведено исследование инструментальной погрешности измерения для каждого датчика. Измерения проводились при постоянной температуре пробы, равной плюс 23 °C. В качестве пробы использовался этиловый спирт. В память компьютера записывались массивы данных с выходов каждого датчика объемом 3000 отсчетов. Графики полученных массивов данных приведены на рисунке 4.10.

Результаты обработки полученных данных приведены в таблице 4.2.

погрешности измерения сигналов датчиков А		
Патник	Среднее квадратическое	Относительная
Датчик	отклонение	погрешность
Температура кюветы	0,01 °C	$1 \cdot 10^{-4}$
Температура зонда	0,01 °C	1.10^{-4}
Оптического сигнала	6·10 ⁻⁵ отн. ед.	4,5.10-4
Вибровискозиметрический	4·10 ⁻³ отн. ед.	5,5·10 ⁻³
латчик		

Таблица 4.2 – Результаты обработки экспериментальных данных для оценки

В ходе испытаний были получены зависимости амплитуды и частоты выходного сигнала ВВД от величины возбуждающего сигнала (рисунок 4.11 и 4.12). Максимальное значение возбуждающего сигнала и принцип возбуждения колебательной системы ВВД представлен в приложении Б.

Измерения проводились в режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика путем подстройки частоты возбуждающего сигнала. Время измерения для каждого значения амплитуды сигнала возбуждения составляло 2 минуты. Добротность КС в этом случае равна примерно 71.



Рисунок 4.10 – Зависимости выходных сигналов от номера выборки і при постоянной температуре кюветы (+ 23 °C): а – датчик температуры кюветы Tc_i (°C); б – датчик температуры зонда Tp_i (°C); в – датчик оптического сигнала (отн. ед.); г – вибродатчик (отн. ед.)



Рисунок 4.11 – Зависимость измеренной амплитуды выходного сигнала ВВД от амплитуды возбуждающего сигнала



Рисунок 4.12 – Зависимость измеренной частоты выходного сигнала ВВД и СКО от амплитуды возбуждающего сигнала

Среднеквадратическое отклонение измеренной амплитуды выходного сигнала ВВД для всего диапазона амплитуд сигнала возбуждения составило 4,3·10⁻³ В. Зависимость измеренной амплитуды сигнала ВВД от амплитуды сигнала возбуждения КС (рисунок 4.11) является практически линейной. Как и предполагалось, частота выходного сигнала ВВД практически не зависит от амплитуды возбуждающего сигнала КС (рисунок 4.12).
4.8 Выводы

1. Описана экспериментальная установка для исследования метрологических характеристик ВВД в различных режимах возбуждения на основе аппаратно-программного комплекса для исследования низкотемпературных свойств жидкостей.

2. Предложен алгоритм синхронизации измерений сигналов нескольких датчиков аппаратно-программного комплекса для исследования низкотемпературных свойств жидкостей с фазой колебаний ВВД, позволяющий уменьшить взаимное влияние указанных сигналов и снизить погрешность совместных измерений.

3. По результатам численного моделирования был сделан вывод, что при наложении на измеряемый сигнал шумовой составляющей результат измерения амплитуды выходного сигнала ВВД методом синхронной выборки имеет меньшую суммарную погрешность, чем при измерении пиковым детектором.

4. Получены оценки методических погрешностей измерения параметров колебаний в автоколебательном режиме и режиме вынужденных колебаний с подстройкой частоты, а так же представлены результаты оценки инструментальных погрешностей ВВД и отдельных блоков АПК.

Глава 5. Экспериментальная оценка метрологических характеристик вибровискозиметрического датчика при различных режимах возбуждения

5.1 Оценка стабильности сигнала ВВД в стационарных условиях измерения при различных режимах возбуждения

Для оценки стабильности сигнала ВВД в автоколебательном режиме и режиме вынужденных колебаний с поддержанием разности фаз 90° путем подстройки частоты были проведены испытания ВВД при его работе в стационарных условиях и нахождении зонда в воздухе, в этиловом спирте и в трансформаторном масле (для задания разных значений добротности КС). Измерялась амплитуда выходного сигнала ВВД и его частота. Каждое измерение (сбор данных) проводилось в течении 10 минут. При этом амплитуда сигнала 1 В соответствует амплитуде механических колебаний зонда 0,7 мкм. Результаты испытаний представлены в Таблице 5.1 [29,132].

Таблица 5.1 – Результаты экспериментальных исследований стабильности выходного сигнала вибровискозиметрического датчика, работающего в автоколебательном режиме (А) и режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз путем подстройки частоты (В).

	1.1		1		
Среда	Измеряемый параметр колебаний	Режим	Среднее значение	Относительная погрешность	Добротность колебательной системы
Воздух	Амплитуда	A	0,87 B	$5,5 \cdot 10^{-3}$	71
		В	0,87 B	$4,3 \cdot 10^{-3}$	
	Частота	Α	252,3 Гц	$6,7 \cdot 10^{-4}$	
		В	252,4 Гц	4,4.10-5	
Этиловый спирт	Амплитуда	Α	0,73 B	$5,9 \cdot 10^{-3}$	59
		В	0,72 B	$5,0.10^{-3}$	
	Частота	Α	249,6 Гц	7,6.10-4	
		В	249,3 Гц	4,8.10-5	
Трансформаторное масло марки ТТЗ-10	Амплитуда	Α	-	-	17
		В	0,21 B	12,0.10-3	
	Частота	Α	-	-	
		В	248,8 Гц	8,0·10 ⁻⁵	

Из представленных результатов видно, что стабильность частоты колебаний ВВД в режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз на порядок выше по сравнению с автоколебательным режимом. При этом погрешность измерения амплитуды практически не изменилась. Это связано с тем, что основной вклад в погрешность измерения амплитуды вносят шумы и помехи, накладывающиеся на выходной сигнал датчика, влияние которых в обоих режимах идентично. Следует отметить, что для трансформаторного масла, при добротности КС порядка 30, не удалось добиться устойчивой работы ВВД в автоколебательном режиме.

Таким образом, применение режима вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз путем подстройки частоты возбуждающего сигнала позволяет улучшить метрологические характеристики ВВД по сравнению с автоколебательным режимом [29,132].

5.2. Способ определения добротности и собственной частоты колебательной системы в режиме вынужденных колебаний

В предложенном режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика путем подстройки частоты возбуждающего сигнала возможно нахождение значений добротности и собственной частоты КС из выражений (3.15), (3.16), (3.17), которые используются для вычисления добротности и собственной частоты КС в классическом режиме вынужденных колебаний [119]. Для проверки корректности вычисления указанных параметров были измерены АЧХ и ФЧХ ВВД, зонд которого помещен в тридекан (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1. – Амплитудно-, фазо-частотная характеристика ВВД с зондом, помещенным в тридекан Q = 59

111

По полученным значениям АЧХ и ФЧХ по формулам (3.15), (3.16) рассчитывалась добротность (рисунок 5.2) и собственная частота (рисунок 5.3) КС в зависимости от частоты вынужденных колебаний.

Разброс вычисленных параметров на графиках рисунков 5.2 и 5.3 зависит от отношения сигнал-шум. Для проверки влияния шума на результат вычисления добротности и собственной частоты КС были проведены аналогичные расчеты для идеальных характеристик АЧХ и ФЧХ согласно (1.33) [18,29], с наложенным шумом электронного тракта (рисунки 5.4 и 5.5). Сравнение результатов вычисления добротности и собственной частоты КС по АЧХ и ФЧХ реальной и модельной систем показывает, что измеренные и расчетные значения разброса сопоставимы. Таким образом, основной вклад в разброс измеренных значений добротности и собственной частоты КС вносят наложенные на выходной сигнал ВВД шумы.



Рисунок 5.2. – Зависимость вычисленной добротности КС ВВД по АЧХ и ФЧХ ВВД от частоты вынужденных колебаний КС



Рисунок 5.3. – Зависимость вычисленной собственной частоты КС ВВД по АЧХ и ФЧХ вибровискозиметрического датчика в зависимости от частоты вынужденных колебаний



Рисунок 5.4. – Зависимость вычисленной добротности КС ВВД по АЧХ и ФЧХ согласно (1.33) при наличии шумов в зависимости от частоты вынужденных колебаний КС

113



Рисунок 5.5. – Зависимость вычисленной собственной частоты КС ВВД по АЧХ и ФЧХ согласно (1.33) при наличии шумов в зависимости от частоты вынужденных колебаний

При проверке вычислений добротности и собственной частоты КС по АЧХ и ФЧХ аналогичных по конструкции ВВД было выявлено, что обнаруженные отклонения зависят от формы АЧХ и ФЧХ датчиков. Это связано с тем, что при вычислении добротности и собственной частоты КС было принято допущение, что АЧХ и ФЧХ реальных датчиков описываются выражениями (1.33). Из зависимостей, представленных на рисунках 5.6 и 5.7, следует, что при работе КС в режиме вынужденных колебаний отклонение рабочей частоты возбуждающего сигнала от собственной частоты КС вызовет дополнительную погрешность, зависящую от конкретного экземпляра ВВД. Так же стоит отметить, что погрешность вычислений параметров КС минимальна при частоте возбуждающего сигнала равной собственной частоте КС (при разности фаз равной 90°). Таким образом, при работе в предложенном режиме возбуждения ВВД (раздел 3.1) погрешность измерения собственной частоты и добротности КС, связанная с неидеальностью АЧХ и ФЧХ, будет меньше по сравнению с классическим режимом вынужденных колебаний.



Рисунок 5.6. – Зависимость среднего значения вычисленной добротности КС ВВД по АЧХ и ФЧХ ВВД в зависимости от частоты вынужденных колебаний КС



Рисунок 5.7. – Зависимость среднего значения вычисленной собственной частоты КС ВВД по АЧХ и ФЧХ ВВД в зависимости от частоты вынужденных колебаний.

Для экспериментальной проверки минимальности погрешности вычисления параметров КС измерения, обусловленной не идеальностью АЧХ и ФЧХ в области собственных частот, в статическом режиме были измерены АЧХ и ФЧХ датчика при нескольких значениях добротности КС ВВД. Измерения проводились при нахождении зонда на воздухе (Q = 71), в этиловом спирте (Q = 59) и в трансформаторном масле (Q = 17) при температуре +25°C. На рисунках 5.8

115

и 5.9 представлены нормированные зависимости вычисленных по АЧХ и ФЧХ ВВД средних значений добротности и собственной частоты КС в зависимости от частоты вынужденных колебаний для разных значений добротностей.



Рисунок 5.8. – Нормированные зависимости средних вычисленных значений добротности КС по АЧХ и ФЧХ ВВД в зависимости от частоты вынужденных колебаний для разных значений добротностей



Отношение частоты вынужденных колебаний к истинному значению собственной частоты колебательной системы, ξ

Рисунок 5.9. – Нормированные зависимости средних вычисленных значений собственной частоты КС по АЧХ и ФЧХ ВВД в зависимости от частоты вынужденных колебаний для разных значений добротностей

Графики подтверждают, что при работе на собственной частоте КС (при ξ = 1) погрешности измерения, обусловленные не идеальностью АЧХ и ФЧХ КС ВВД, будут минимальны.

5.3. Определение параметров колебательной системы при работе в нестационарном режиме

Для сравнения режимов возбуждения КС в динамике были проведены испытания ВВД при размещении зонда в тридекане (степень чистоты - ч). Данная жидкость была выбрана в качестве калибровочной в связи с тем, что является однокомпонентной жидкостью, имеет четкую область застывания (температура застывания - минус $5,4^{\circ}$ C) [181] и не проявляет неравновесновзрывную кристаллизацию [123,124,182–184]. Испытания проводились при охлаждении жидкости от +25°C до минус 10°C со скоростью охлаждения 0,3°C/с. Амплитуда возбуждающего сигнала ВВД для всех испытаний была одинаковой. На рисунках 5.10 представлены результаты экспериментальных испытаний ВВД для тридекана в трех режимах возбуждения вибровискозиметрического датчика.



Рисунок 5.10 – Зависимости нормированных амплитуд выходного сигнала ВВД от температуры жидкости: 1 – автоколебательный режим; 2 – режим вынужденных колебаний (установлен максимум ампл. на воздухе); 3 – режим вынужденных колебаний (установлен максимум ампл. в жидкости); 4 – режим вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз

Перед каждым измерением (запуском на охлаждение) выдерживалась пауза ≈3мин. для измерения величины отношения сигнал/шум (см таблицу 5.2) при значении СКО сигнала 4,3·10⁻³ В (раздел 4.6).

		\mathbf{r}	
N⁰	Режим возбуждения	Относительная погрешность, отн. ед.	
1	автоколебательный	5,9·10 ⁻³	
2	вынужденных колебаний	1,1.10-2	
	(установлен максимум ампл. на воздухе)		
3	вынужденных колебаний	$5.2 \cdot 10^{-3}$	
5	(установлен максимум ампл. в жидкости)	5,2 10	
4	вынужденных колебаний с поддержанием заданного	5,1.10-3	
	значения разности фаз		
		•	

Таблица 5.2 – результаты измерения относительной погрешности перед началом испытания для различных режимов возбуждения ВВД

По рисунку 5.10 видно, что зависимости нормированных амплитуд выходного сигнала ВВД от температуры жидкости для разных режимов различаются. В автоколебательном режиме, как уже отмечалось в 5.1 при измерениях в стационарных условиях, при малых значениях добротности колебания прекращаются. Это связано с нарушением амплитудных и фазовых условий автогенерации [121,122].

В классическом режиме вынужденных колебаний заметна сильная зависимость результатов измерения от частоты выходного сигнала генератора. При установке частоты выходного сигнала генератора, равной частоте в максимуме амплитуды колебаний ВВД зонда на воздухе (рисунок 5.10, график 2) амплитуда выходного сигнала ВВД, при опускании зонда в жидкость уменьшается в 2..4 раза. Связанно это с тем, что уменьшается собственная частота и добротность КС. Из-за различия между частотой колебаний КС в жидкости и установленной ранее частотой выходного сигнала генератора ВВД менее чувствителен к изменению параметров жидкости. При установке частоты выходного сигнала генератора равной частоте максимума амплитуды колебаний зонда ВВД в жидкости (рисунок 4.10, график 3) датчик более чувствителен к изменению свойств жидкости. Поскольку изменение амплитуды выходного сигнала ВВД зависит не только от изменения добротности КС, но и от изменения собственной частоты КС, это негативно влияет на отношение сигналшум вблизи температуры застывания жидкости.

При работе в режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз (рисунок 5.10, график 4) выходная частота генератора постоянно подстраивается к значению собственной частоты КС. В связи с этим расширяется диапазон температур (вблизи температуры застывания) в котором возможно измерение реологических свойств жидкости.

СКО измеренного значения амплитуды выходного сигнала ВВД не зависит от её величины (раздел 4.7). Используя относительную погрешность при начальной температуре (таблица 5.2) по зависимостям, представленным на рисунке 5.10, был сделан расчет зависимости относительной погрешности измерения амплитуды ВВД от температуры жидкости (рисунок 5.11).



Рисунок 5.11 – Зависимости относительной погрешности измерения амплитуд выходного сигнала ВВД от температуры жидкости: 1 – автоколебательный режим; 2 – режим вынужденных колебаний (установлен максимум ампл. на воздухе);
3 – режим вынужденных колебаний (установлен максимум ампл. в жидкости);
4 – режим вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз

По представленным графикам видно, что в режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз из-за возможности "слежения" за собственной частотой КС отношение сигнал-шум в области температуры застывания выше. Кроме того, в этом режиме датчик сохраняет работоспособность в области высоких вязкостей, где в случае других режимов возбуждения наблюдается срыв колебаний из-за значительного уменьшения амплитуды колебаний.

На рисунке 5.12 представлены зависимости частоты выходного сигнала генератора и разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика от температуры при охлаждении тридекана в предложенном режиме. Сигналы показаны без предварительной обработки.



Рисунок 5.12. – Зависимости частоты выходного сигнала генератора и разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика от температуры при охлаждении тридекана в режиме с подстройкой частоты ты по разности фаз: 1 – частота выходного сигнала генератора; 2 – разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика

В области температуры застывания (минус 5,4°С, рисунок 5.12), частота выходного сигнала генератора начинает возрастать. При этом среднее значение разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика в "окрестности" температур минус $5,4 \pm 0,07$ °С (температуры застывания) составляло $90 \pm 0,8^{\circ}$. Таким образом, разработанный комплекс с применением режима возбуждения ВВД позволяет наблюдать за изменением свойств жидкости в моменте её застывания. Так же по представленным на рисунке 5.12 зависимостям видно, что до температуры жидкости \approx минус 5,47°С значение часто-

ты выходного сигнала генератора практически равно собственной частоте КС ВВД. При этом "перегиб" (примерно минус $5,4^{\circ}$ C) зависимости частоты выходного сигнала генератора не совпадает с "перегибом" зависимости разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика (примерно минус $5,47^{\circ}$ C). Это расхождение по температуре связано со свойствами в жидкости, а именно с процессами ее кристаллизации [182–184], что занимает некоторое время [123,124], что видно на рисунке 5.12.

Для проверки инерционности ВВД были проведено его испытание при измерении параметров бензола (степень чистоты – хч, температура застывания - 5,5°С [181]). Данная жидкость была выбрана в связи с тем, что является однокомпонентной жидкостью, имеет четкую область застывания (с переохлаждением), а при переохлаждении жидкости быстро (за время менее 1 мс) кристаллизуется. Так как собственная частота КС не превышает 300 Гц, т.е. период больше 3,3 мс, то застывание бензола в кювете приведет к мгновенному внесению в систему бесконечно большого демпфирования.

На рисунке 5.13 представлены зависимости амплитуды выходного сигнала ВВД, частоты выходного сигнала генератора и разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика от времени в момент застывания бензола. По представленным зависимостям видно, что в момент времени \approx 95,7 с происходит кристаллизация. С этого момента времени частота выходного сигнала генератора не перестраивается [119, 132]. Амплитуда сигнала ВВД и разность фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика реагируют на кристаллизацию жидкости примерно за 2 – 3 периода ВВД. Так как период измерения равна периоду выходного сигнала генератора, то время реакции на застывание бензола составило 9 – 14 мс.

Полученное время можно считать постоянной времени реакции КС ВВД.



Рисунок 5.13. – Зависимости частоты выходного сигнала генератора, разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика и амплитуды выходного сигнала ВВД от времени при охлаждении бензола (без предварительной обработки): 1 – частота выходного сигнала генератора; 2 – разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика; 3 – амплитуда выходного сигнала вибровискозиметрического датчика

Время, необходимое для охлаждения на 0,07 °С тридекана (рисунок 5.12), составило около 230 мс, что на порядок больше, чем время реакции на застывание бензола.

Таким образом, показано, что режим вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз между сигналом возбуждения и

122

сигналом отклика путем подстройки частоты возбуждающего сигнала, имеет более широкий динамический диапазон относительно автоколебательного режима и классического режима вынужденных колебаний.

По измеренным значениям выходного сигнала КС для различных режимов работы ВВД были рассчитаны зависимости добротности и собственной частоты КС (рисунки 5.14 и 5.15). Далее по формулам (2.8, 29), были получены зависимости коэффициента демпфирования и присоединенной массы КС от температуры тридекана (рисунки 5.16 и 5.17).

В автоколебательном режиме, как уже отмечалось, из-за нестабильной генерации (см. раздел 5.1) колебаний при малых добротностях (менее 30) полученным данным не стоит доверять. Для представленной зависимости спада добротности КС (рисунок 5.14, график 1) резкое увеличение коэффициента демпфирования (рисунок 5.16, график 1) в отличии от других зависимостей (от минус 4,5°C и ниже), является результатом нестабильной работа КС. Зависимость собственной частоты (рисунок 5.15, график 1) и присоединенной массы (рисунок 5.17, график 1) в автоколебательном режиме менее чувствительны к изменению параметров КС. Это может быть вызвано несоблюдением баланса фаз и амплитуд автогенераторного режима работы ВВД при изменении собственной частоты КС.

Для режима вынужденных колебаний с установленной амплитудой на воздухе, как уже отмечалось, наблюдается малая чувствительность к измерениям параметров КС, что и подтверждают представленные зависимости. Между результатами, полученными в режиме возбуждения с частотой возбуждения КС, установленной перед началом испытаний по максимуму амплитуды в жидкости, и в предложенном режиме возбуждения КС наблюдается наибольшее соответствие. Некоторые отличия могут быть вызваны отклонением возбуждающей частоты от собственной частоты КС классического режима вынужденных колебаний.



Рисунок 5.14. – Зависимости добротностей колебательной системы вибровискозиметрического датчика от температуры жидкости: 1 – автоколебательный режим; 2 – режим вынужденных колебаний (установлен максимум амплитуды на воздухе); 3 – режим вынужденных колебаний (установлен максимум амплитуды в жидкости); 4 – режим вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз



Рисунок 5.15. – Зависимости собственной частоты колебательной системы вибровискозиметрического датчика от температуры жидкости: 1 – автоколебательный режим; 2 – режим вынужденных колебаний (установлен максимум амплитуды на воздухе); 3 – режим вынужденных колебаний (установлен максимум амплитуды в жидкости); 4 – режим вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз



Рисунок 5.16. – Зависимости коэффициентов демпфирования колебательной системы вибровискозиметрического датчика от температуры жидкости: 1 – автоколебательный режим 2 – режим вынужденных колебаний (установлен максимум амплитуды на воздухе); 3 – режим вынужденных колебаний (установлен максимум амплитуды в жидкости); 4 – режим вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз



Рисунок 5.17. – Зависимости присоединенной массы вибровискозиметрического датчика от температуры жидкости: 1 – автоколебательный режим: 2 – режим вынужденных колебаний (установлен максимум амплитуды на воздухе); 3 – режим вынужденных колебаний (установлен максимум амплитуды в жидкости); 4 – режим вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз

5.4. Статистические испытания

В разработанных в УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН Анализаторах «ИРЭН 2.5», предназначенных для измерения низкотемпературных свойств жидкостей, в частности температуры застывания [185–187], ВВД работал в режиме вынужденных колебаний без подстройки частоты сигнала возбуждения. За температуру застывания жидкости принималось значение температуры, при которой амплитуда ВВД уменьшалась до значения 10% от исходной. Для каждого экземпляра анализатора по результатам испытаний вводился поправочный коэффициент Погрешность измерения температуры застывания данным способом составляла ±2°C [188] со среднеквадратической сходимостью результатов измерения (σ) равной 0,6°C [180,181].

В соответствии с проведенными исследованиями с новым способом возбуждения КС ВВД было предложено принимать за температуру застывания температуру, при которой происходит «перегиб» частотной зависимости (рисунок 5.12), так как в этот момент в испытуемой жидкости начинаются процессы кристаллизации. В соответствии с данным критерием было проведено испытание на 37 образцах топлив с измеренным значением температуры застывания согласно ASTM-стандартам (American Society for Testing and Materials) D5972 и D715 [186,187]. Результаты испытаний представлены в приложении Ж. Согласно проведенным испытаниям среднее значение отклонения от значений, полученных по ASTM-стандарту, составило 1,6°C со среднеквадратической сходимостью результатов измерения (σ) [189,190] равной 0,32°C. Таким образом, при измерении температуры застывания жидкости предложным способом воспроизводимость результатов измерения улучшилась в 1,87 раза по сравнению с ранее применяемым способом.

5.5 Выводы

1. Проведены экспериментальные исследования метрологических характеристик ВВД при работе в автоколебательном режиме и режиме вынужденных колебаний с подстройкой частоты, а так же результаты статистических испытаний ВВД при измерении теплофизических параметров различных жидкостей.

2. Показано, что стабильность частоты колебаний КС ВВД в режиме вынужденных колебаний с поддержанием разности фаз 90° возросла на порядок по сравнению с автоколебательным режимом. При этом погрешность измерения амплитуды практически не изменилась. Это связано с тем, что основной вклад в погрешность измерения амплитуды вносят шумы и помехи в выходном сигнале датчика, влияние которых в обоих режимах идентично.

3. Экспериментально и путем численного моделирования подтверждено, что при определении добротности и собственной частоты КС ВВД по АЧХ и ФЧХ, погрешность вычислений параметров КС минимальна при частоте возбуждающего сигнала, равной собственной частоте КС.

4. Для сравнения режимов возбуждения КС в динамике был проведен ряд испытаний на модельной жидкости – тридекане с температурой застывания минус 5,4°C. Установлено, что при работе в режиме вынужденных колебаний с поддержанием разности фаз диапазон температур (вблизи температуры застывания), при которых поддерживаются колебания КС ВВД, увеличивается примерно на 0,5 °C, а погрешность измерения амплитуды ВВД в заданном диапазоне температур уменьшается в несколько раз.

5. На основе выборочных измерений температуры застывания 37 образцов тестовых жидкостей показано, при измерении температуры застывания жидкости в режиме возбуждения ВВД предложным способом воспроизводимость результатов измерения улучшилась в 1,87 раза по сравнению с режимом вынужденных колебаний без подстройки частоты сигнала возбуждения.

Заключение

В результате проведенных исследований получены следующие основные научные результаты:

1. Впервые, на основе численного моделирования работы механической КС с одной степенью свободы в режиме с гармоническим возбуждением при линейном изменении параметров элементов КС (присоединенной массы и коэффициента демпфирования), получены зависимости погрешностей определения мгновенных значений параметров КС (собственной частоты и добротности) по параметрам вынужденных колебаний от скорости изменения параметров КС.

2. Разработан новый способ возбуждения КС датчиков в нестационарных режимах их работы с поддержанием разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика КС, равной 90°, путем подстройки частоты сигнала возбуждения, позволяющий по сравнению с автоколебательным режимом и режимом вынужденных колебаний на фиксированных частотах повысить отношение сигнал-шум и уменьшить погрешность измерения собственной частоты КС на порядок, а добротности – на 20%-60%, в зависимости от значения добротности.

3. Для режима возбуждения КС ВВД с поддержанием разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика КС, равной 90°, путем подстройки частоты сигнала возбуждения значения шага перестройки частоты генератора сигнала возбуждения предложено выбирать из условия, при котором переходные процессы изменения фазы сигнала отклика, вызванные перестройкой частоты, становятся меньше фазовых шумов и не оказывают влияния на погрешность измерения параметров сигнала отклика КС.

4. Для апробации предложенных способов повышения точности ВВД на основе электромеханических КС и исследования их метрологических характеристик на базе Анализатора низкотемпературных свойств жидкостей с ВВД камертонного типа разработана и изготовлена экспериментальная установка,

прозволяющая реализовывать различные режимы возбуждения КС и измерять различные параметры колебаний КС.

5. Для случаев, когда достоверное измерение амплитуды колебаний КС затруднительно или невозможно, предложен способ определения добротности КС в составе ВВД по значениям ее фазо-частотной характеристики в режиме вынужденных колебаний путем периодической перестройки частоты сигнала возбуждения при заданном отклонении разности фаз между сигналом отклика и сигналом возбуждения от $\pi/2$ рад.

6. Предложен способ синхронизации моментов измерения сигналов нескольких датчиков Анализатора низкотемпературных свойств жидкостей с ВВД камертонного типа с фазой колебаний ВВД, позволяющий уменьшить взаимное влияние сигналов датчиков и повысить точность измерений при совместных измерениях.

4. Для сравнения режимов возбуждения КС ВВД в динамике на разработанной экспериментальной установке был проведен ряд испытаний на модельной жидкости – тридекане с температурой застывания минус $5,4^{\circ}$ С. Установлено, что при работе ВВД в режиме вынужденных колебаний с поддержанием разности фаз 90° диапазон температур (вблизи температуры застывания), при которых поддерживаются колебания КС ВВД, увеличивается примерно на 0,5 °C, а погрешность измерения амплитуды ВВД в этом диапазоне температур уменьшается в несколько раз.

5. На основе выборочных измерений на разработанной экспериментальной установке температуры застывания 37 образцов тестовых жидкостей показано, при измерении температуры застывания жидкости в режиме возбуждения КС ВВД предложным способом воспроизводимость результатов измерения улучшилась в 1,87 раза по сравнению с режимом вынужденных колебаний без подстройки частоты сигнала возбуждения.

Предложенные в работе способы и алгоритмы повышения точности измерения параметров КС ВВД в нестационарных режимах работы могут быть использованы в датчиках на основе электромеханических КС различных видов.

Результаты анализа переходных процессов в колебательных системах с периодическим возбуждением при дискретной ступенчатой перестройке частоты сигнала возбуждения могут быть использованы при выборе режимов в управления в измерительных системах с перестройкой частоты.

Способ измерения параметров КС с подстройкой частоты по сдвигу фазы, реализован в модифицированном варианте Анализатора низкотемпературных свойств жидкостей с ВВД камертонного типа, что позволило повысить повторяемость и уменьшить погрешность измерения теплофизических параметров жидкостей.

Результаты работы использованы при выполнении НИР по проекту №10258 обработки «Разработка эффективного метода средств измерительной И информации «ИРЭН2.4»» аппаратно-программного комплекса (контракт № 7462р/10267 от 30.01.2010 г. по программе У.М.Н.И.К.). Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере и НИР по №21943 «Разработка образца проекту опытного экспресс-анализатора низкотемпературных свойств нефтепродуктов с улучшенными метрологическими характеристиками» по программе «Старт-2013» того же Фонда (контракт №11950р/21943 от 27.06.2013). По итогам НИОКР был создан опытный образец аппаратно-программного комплекса для экспресс-анализа низкотемпературных свойств нефтепродуктов.

Список литературы

1. Маврин, Е.М. Исследование и контролирование измерительного модуля струнного датчика / Е.М.Маврин // Молодежный научно технический вестник. – 2015. – № 9. – С. 25.

2. Ахтямов, А.М. О диагностике механической системы из струн по конечному набору собственных значений /Ахтямов А.М., Аксенова З.Ф. // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 5, Часть 1. – С. 27–31.

3. Ведерников М. В., Прохорович Г. Е., Марченко М. А. Системы долговременного контроля несущих конструкций зданий и сооружений на основе струнных датчиков деформации // Технологии гражданской безопасности. 2006. №3.

4. Heinisch, M. Tunable resonators in the low kHz range for viscosity sensing / M. Heinisch, E.K. Reichel, I. Dufour, B. Jakoby // Sensors and Actuators A: Physical. – 2012. – October 2012, Vol. 186. – P. 111–117.

5. Земляков, В.Л. Программно-аппаратный комплекс для исследовательских целей в области пьезоэлектрического приборостроения / Земляков В.Л., Ключников С.Н. // Инженерный вестник дона. – 2015. – Т. 38, №4. – С. 15.

6. Зацерклянный, О.В. Исследование путей расширения диапазона вязкости вибрационного плотномера // Сборник тезисов VIII Всероссийской науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения», 10–15 сентября 2012, г. Ростов–на-Дону.- Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2012. – С.45–48.

7. Доля, В.К. Метод контроля качества пьезоэлектрических преобразователей / Доля В.К., Земляков В.Л., Ключников С.Н. // Инженерный вестник дона. - 2016. - №1 (40).- С. 3.

8. Resonant-mode effect on fluidic damping of piezoelectric microcantilevers vibrating in an infinite viscous gaseous environment / Huacheng Qiu, Dara Feili, Xuezhong Wu, Helmut Seidel // Sensors and Actuators A: Physical. – Volume 232, 1 August 2015. – P. 1–7.

9. Design, fabrication and characterization of a resonant magnetic field sensor based on mechanically coupled dual-microresonator / Guoqiang Wu, Dehui Xu, B. Xiong, Y.L. Wang // Sensors and Actuators A Physical 248. July 2016.

10. Соломин, Б.А. Миниатюрный вибровискозиметрический датчик повышенной чувствительности и быстродействия / Б.А.Соломин, А.М.

Низаметдинов, М.Л. Конторович, А.А. Черторийский // Датчики и системы. – 2015. – №7(194). – С. 35–39.

11. Соломин, Б.А. Камертонный вибровискозиметрический датчик для исследования термостимулированных процессов в жидкостях / Б.А.Соломин, А.М. Низаметдинов, М.Л. Конторович, А.А. Черторийский // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015. – Т.17, №2. – С. 26 – 30.

12. Optimal quality factor for tuning forks in a fluid medium / Guillaume Aoust, Raphaël Levy, Béatrice Verlhac, Olivier Le Traon // Sensors and Actuators A: Physical.- Volume 243, 1 June 2016.- P. 134–138.

13. Buchacz, A. Designing of discrete mechatronic vibrating systems with negative value parameters / Andrzej Buchacz, Damian Gałęziowski // Mechanical Systems and Signal Processing .-Volume 78, 1 October 2016.- Pp. 134-142.

14. Application of resonant steel tuning forks with circular and rectangular cross sections for precise mass density and viscosity measurements / Heinisch M., Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E.K. and all. // Sensors and Actuators A: Physical. – Volume 226, 1 May 2015, Pages 163–174.

15. Reduced order models for resonant viscosity and mass density sensors / Heinisch M., Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E.K. and all. // Sensors and Actuators A: Physical. – Volume 220, 1 December 2014, Pages 76–84.

16. Лопатин, С.С. Датчики предельного уровня для жидкостей. Физические принципы работы и возможности вибрационных датчиков / С.С. Лопатин, Х. Пфайффер // Автоматизация в промышленности. – 2004. – №12. – С. 24-29.

17. Основы теории колебаний / Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н., под ред. В.В. Мигулина.- М.: Наука, Главная редакция физикоматематической литературы, 1978.

18. Иориш Ю.И. Виброметрия / Иориш Ю.И. – М.: Государственное научнотехническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 756 с.

19. Соловьев, А. Н. Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей / А. Н. Соловьев, А. Б. Каплун. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1970.

20. Нейман, Л.А. Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник ИГЭУ.- 2015.- выпуск 6.- С. 35–40.

21. Томилин, А.К. Колебания электромеханических систем с распределенными параметрами / А.К. Томилин.- Усть-Каменогорск: Издательство ВКГТУ.- 2004.- 286 с.

22. Митрофанов, В. П. Колебательные системы с малой диссипацией (от макро- до наносцилляторов): Учебное пособие. – М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. – 74 с.

23. Копейкин, А.И. Управляемые электромеханические колебательные системы: Учебное пособие / Копейкин А.И., Малафеев С.И.-. Владимир: Издательство "Посад", 2001. - 128 с.

24. Verma, V.K. Stochastic resonance in MEMS capacitive sensors / Verma V.K., Yadava R.D.S. // Sensors and Actuators B: Chemical. – Volume 235, 1 November 2016, Pages 583-602.- Режим доступа: https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.05.110.

25. Черногоров, Е.П. Колебания механических систем: Курс лекций / Черногоров, Е.П.- Челябинск: Южно-Уральский госуниверситет, 2013.- 69 с.

26. Resonant cantilever sensors operated in a high-Q in-plane mode for real-time bio/chemical detection in liquids /Tao Y, Li,X., Xu T. and all. // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2011. – Vol. 157, Is.2. – P. 606–614.

27. A resonating rheometer using two polymer membranes for measuring liquid viscosity and mass density / Heinisch M., Reichel E.K., Dufour I. and all. // Sensors and Actuators A: Physical. -2011 - Vol. 172, Is.1. -P. 82–87.

28. Антонец, И.В. Динамические системы с демпфирирующими устройствами/ Антонец И.В., Терешенок А.П. // Журнал «Сборка в машиностроении и приборостроении» – №10 – М: Издательство «Инновационное машиностроение», – 2012. – С.3–6.

29. Низаметдинов, А.М. Измерение добротности и собственной частоты колебательной системы вибровискозиметрического датчика / Низаметдинов А.М. // Датчики и системы. – 2016. – №10. – С. 15–20.

30. Сергеев, В. А. Моделирование механической колебательной системы с меняющейся во времени коэффициентом демпфирования / В.А. Сергеев, А.М. Низаметдинов // XI всероссийская молодежная научно-инновационная школа "Математика и математическое моделирование": сборник материалов, 11-13 апреля 2017, г. Саров.- Саров:ООО "Интерконтакт". – 2017. – С. 175–176.

31. Лачин, В.И. Экспериментальное исследование метода повышения точности интеллектуального датчика вибрации / Лачин В.И., Плотников Д.А. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012. – № 3. – С. 72–77.

32. Лачин, В. И. Реализация функций самодиагностики интеллектуальных датчиков вибрации/ Лачин В.И., Плотников Д.А. // Известия ЮФУ. Технические

науки. – 2012. – №3 (128). – С. 241–251

33. ГОСТ Р 8.825-2013 Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы ускоренных испытаний. Введ. 01.01.2015. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2015.

34. ГОСТ Р 8.673-2009 Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. Введ. 01.12.2010. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2010.

35. Софьина, Н.Н. Evaluation of the technical condition mining and oil field equipment by excitation of resonant vibrations / Софьина Н.Н., Шишлянников Д.И., Корнилов К.А. // Горное оборудование и электромеханика. – М.: Издательство "Новые технологии". – 2016. – № 9(127). – С. 34–37.

36. Патент РФ 2343523. МПК G04B 17/28. Двухосевой турбийон для часов, в частности для наручных часов / Мюллер Ф.(СН); патентообладатель Франк Мюллер Вотчленд С.А. (СН). – заявка 2004110096, заявл. 28, 02.04.2004, опубл. 10.01.2009, бюл. № 1.

37. Патент РФ 2419781. МПК G01N 25/02. Вибровискозиметрический датчик / Соломин Б.А., Конторович М.Л, Подгорнов А.А.; патентообладатель Учреждение РАН ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН (RU). – заявка 2008137896, заявл. 22.09.2008, опубл. 27.05.2011 бюл. № 15.

38. Фролов И.В. Средства измерения малосигнальных и шумовых параметров светоизлучающих диодов для целей диагностики их качества: дис. канд. технич. наук: 05.11.01: защищена 18.06.14. – Ульяновск, 2014. – 169 с.

39. Нуруллин, Р.Ю. Механизм работы синтезатора частот на основе автогенераторов с фазовой автоподстройкой частоты / Нуруллин Р.Ю., Долгов А.Н. // Проблемы современной науки и образования (Иваново). – 2016. – № 38(80). – С. 30–33.

40. Генерация и фильтрация СВЧ излучения в схеме микрополосковой антенны-генератора, интегрированной с волноводом, встроенным в диэлектрическую подложку / В. Е. Любченко, В. И. Калинин, В. Д. Котов и др.// Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 10. – С. 9.

41. Патент РФ 2528578. МПК G01N 29/24. Система ультразвукового контроля / Оберхоф Дитмар (DE), Флор Гвидо (DE); патентообладатель Оберхоф Дитмар (DE), Флор Гвидо (DE). – заявка 2011146131, заявл. 15.04.2010, опубл. 20.09.2014 бюл. № 26.

42. Мирский Г. Я. Радиоэлектронные измерения. – 3-е изд., пере- раб. и доп. /

Г. Я. Мирский. – М. : Энергия, 1975. – 600 с.

43. Багдасарян, А.С., Фильтры на ПАВ, выдерживающие входную мощность радиосигнала 1-2 Вт, для телекоммуникационной аппаратуры / Багдасарян А.С., Синицына Т.В. // Техника радиосвязи. – 2016. – № 3(30). – С. 80–89.

44. Аистов, Н.М. Применение ультразвуковой кавитации для улучшения качества товарного мазута / Аистов Н.М., Моисеева Л.С. // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – N 3. – С. 55–57.

45. Патент 2422776 Российская Федерация. МПК G01F 1/20. Струйный автогенераторный расходомер-счетчик / Черторийский А.А., Сергеев В.А., Аристов П.А, Беринцев А.В., Севелов А.Н; патентообладатель Учреждение РАН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (RU). – заявка: 2009110653, заявл. 23.03.2009, опубл. 27.06.2011 бюл. № 18.

46. Моисеев, С.Г. Дефектные моды одномерной фотонно-кристаллической структуры с резонансным нанокомпозитным слоем / С.Г. Моисеев, В.А. Остаточников // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 8. – С. 743–748.

47. Патент 2520963 Российская Федерация. МПК G01B 9/02. Волоконнооптическая измерительная система (варианты) / Яцеев В.А.; патентообладатель ООО "Оптические измерительные системы". – заявка 2012135565, заявл. 20.08.2012, опубл. 27.06.2014 бюл. № 18.

48. Сканирующая зондовая микроскопия лазерно-графитизированных алмазоподобных углеродных пленок / Фролов В.Д., Заведеев Е.В., Комленок М.С., Арутюнян Н.Р., Шупегин М.Л., Пименов С.М. // Российские нанотехнологии. – 2016. – Т. 11, № 7-8. – С. 71–75.

49. Король, Д.В. Микромеханические резонансные датчики / Король Д.В., Петрищев М.С. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2006. – Т. 6, № 5(28). – С. 181.

50. Якимова, А.В. Организация входного контроля чувствительных элементов микромеханических датчиков на пластине / Якимова А.В., Белогуров А.А., Беляев Я.В. // Датчики и системы. – 2017. – № 2(211). – С. 47–52.

51. Surtchev, M. Comprehensive Characterization of Neat Polymers and Compositional Imaging Heterogeneous Polymer Systems with AFM Based Mechanical, Electric and Spectroscopic Methods / M.Surtchev , S.Belikov), I.Malovichko,S.Magonov // MRS Proc., Volume 1754 January 2015, pp. 75-80. – Режим доступа: DOI: https://doi.org/10.1557/opl.2015.199

52. Неволин, В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике / Неволин В.К.-

Изд. 2-е, испр. – М.: Техносфера, 2014. – 176 с.

53. Ильин, В.А. Сканирующая зондовая микроскопия / Ильин В.А., Кудрявцев В.В., Ширина Т.А. // Физика в школе. – 2016. – № 6.– С. 3–13.

54. Гуляев, П.В. Координатная привязка СТМ-изображений наночастиц с фильтрацией особых точек / Гуляев П.В., Шелковников Е.Ю., Тюриков А.В., Кизнерцев С.Р. // Химическая физика и мезоскопия. – 2017. – Т. 19, № 1, С. 140–146.

55. Царенко, И.С. Сканирующий туннельный микроскоп / Царенко И.С. // В мире научных открытий: сбор.тр.конф.,2016. – Ульяновск: Ульяновская гос.с.хоз.акад.им. П.А. Столыпина, 2016. – С.201–204.

56. Шелковников, Е.Ю. Методы и средства контроля дисперсности наночастиц в сканирующей туннельной микроскопии / Шелковников Е.Ю., Гуляев П.В., Тюриков А.В. и др. // Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов: сборник статей. – Ижевск: Институт механики УрО РАН, 2015. – С. 291–311.

57. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: Учебное пособие для студентов старших курсов / Миронов В. Л. – Н.Новгород: Институт физики микроструктур, 2004. – 110 с.

58. Лушников, Д.Е. Реализация теневого метода измерения деформаций с использованием многоэлементного фотоприемника / Лушников Д.Е., Черторийский А.А. // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 17-й всероссийской молодежной научной школысеминара, Ульяновск, 2–4 декабря, 2014. – Ульяновск: УлГТУ. – 2014. – С. 213–214.

59. Увалов И.В. Резонансная свойства трехслойных металлических кантилеверов наноразмерной толщины: дис. канд. физ-мат. наук. Ярославль, – 2013. – 126 с.

60. Соломин, Б.А Система автоматизированного управления анализатором низкотемпературных свойств многокомпонентных жидкостей / Б.А.Соломин, А.М. Низаметдинов, А.А. Черторийский // Сборник докладов молодёжной научно-технической конференции "Автоматизация процессов управления", г. Ульяновск, 13–14 декабря 2011 г. – Ульяновск: ФНПЦ ОАО «НПО «Марс», 2011 – С. 66–71.

61. Соломин Б.А. Вискозиметрический датчик для исследования многокомпонентных жидкостей / Соломин Б.А., Низаметдинов А.М. // Вузовская

наука в современных условиях. Сборник материалов 47-й научно-технической конференции (28 января - 2 февраля 2013года) Ульяновск: УлГТУ – Часть 2. – 2013 – С. 102–105

62. Вискозиметр вибрационный SV-100A. [Электронный ресурс].– Режим доступа: http://granat-e.ru/%3E%3C/a%3E%3C/viscosimeter_sv-a.html. – Дата обращения 20.01.2017.

63. Pat. US 5191316(A). Int.Cl. G08B21/00. Apparatus for determining and/or monitoring a predetermined contents level in a container / Inventor(s): Dreyer Volker [DE]; Applicant(s): ENDRESS HAUSER GMBH CO [DE].– Priority №: DE19893931453 19890921, application №: US19910700134 19910520.

64. Pat. US 6236322. Int. Cl. G01F23/296. Apparatus for establishing and/or monitoring a predetermined filling level in a container / Inventor(s): Lopatin S.[DE]; Pfeiffer H.[DE]; Mueller A.[DE]; Dreyer V.[DE]; Brutschin Wolfgang [DE]; Applicant(s): Endress Hauser GMBH CO [US]. – priority №: US19990388299 19990901, application №: US19990388299 19990901

65. Modeling and Experimental Investigation of Resonant Viscosity and Mass Density Sensors Considering their Cross-Sensitivity to Temperature / Heinisch M., Reichel E.K., Dufour I. and all. // EUROSENSORS 2014, the 28th European Conference on Solid-State Transducers. – 2014. – Vol. 87. – P. 472–475.

66. Solomin, B.A. A Hardware-software system for the operational investigation of the thermal properties of a liquid / B.A. Solomin, A.A. Chertoriiskii, M.L. Kontorovich, A.M. Nizametdinov // Measurement techniques. –2014. – Vol. 57, №3. – P.312–317.

67. Соломин, Б.А. Аппаратно-программный комплекс для оперативного исследования теплофизических свойств жидкости / Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов, М.Л. Конторович, А.А. Черторийский // Измерительная техника. – 2014. – №3. – С. 49–52.

68. Низаметдинов, А.М. Аппаратно-программный комплекс для оперативного исследования теплофизических свойств жидкости ИРЭН 2.5. / А.М. Низаметдинов, Б.А. Соломин, А.А. Черторийский, М.Л. Конторович // Научно-практическая конференция "Научное приборостроение - современное состояние и перспективы развития": сборник материалов, 15-16 ноября 2016, Москва. – Москва: Богородский печатник, 2016.

69. Соломин, Б.А. Необремененный вибровискозиметрический датчик / Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов, М.Л. Конторович, А.А. Черторийский // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов. – Ульяновск:

УлГТУ. – 2015 – С.161–166.

70. Низаметдинов, А.М. Аппаратно-программный комплекс ИРЭН2.5 // Актуальные проблемы физической и фундаментальной электроники: тезисы докладов 13-й региональной научной школы-семинара, 1-3 декабря 2010, г.Ульяновск. – Ульяновск: УлГТУ. – 2010. – С.47.

71. Соломин, Б.А. Расширение функциональных возможностей аппаратнопрограммного комплекса для исследования свойств нефтепродуктов / Б.А.Соломин, М.Л. Конторович, А.М. Низаметдинов, А.А. Черторийский // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов.– Ульяновск: УлГТУ. – 2010. – С.196.

72. Патент на полезную модель № 139169 Российская Федерация. МПК G01N25/00. Устройство для исследования низкотемпературных свойств многокомпонентных жидкостей / Соломин Б.А. и Низаметдинов А.М.; патентообладатель ООО МИП "Микроэлектронный контроль". – заявка № 2013150420, заявл. 12.11.2013, опуб. 10.04.2014, бюл. 10.

73. Патент РФ 2504757 РФ, МПК G01N25/00. Способ исследования теплофизических свойств жидкостей и устройство для его осуществления / Соломин Б.А., Конторович М.Л.,Черторийский А.А., Низаметдинов А.М.; патентообладатель ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. – заявка 2012117930, заявл. 28.04.2012, опуб. 20.01.2014 бюл. №2.

74. Низаметдинов А.М. Способы и устройства резонансного возбуждения механической колебательной системы вибровискозиметра / Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов // Актуальные проблемы физической и фундаментальной электроники: тезисы докладов 18-й Всероссийской молодежной научной школы– семинара, 1-3 декабря 2015, г.Ульяновск. – Ульяновск: УлГТУ. – 2015. – С. 215–216.

75. Патент РФ № 2574862 Российская Федерация. МПК G01N 11/10. Вибровискозиметрический датчик / Низаметдинов А.М., Соломин Б.А., Черторийский А.А., Конторович М.Л.; патентообладатель ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (RU). – заявка 2013158404/28, заявл. 26.12.2013, опуб. 10.02.2016, бюл. № 4.

76. Ермолаев, И.Н. Неразрушающий контроль. Кн.2. Акустические методы контроля: практическое пособие / И.Н. Ермолаев, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; под ред. В.В. Сухорукова. – В 5 кн.; кн. 2. – М.: Высшая школа, 1991. – 283с.

77. Механические модели и методы управления движением гибридных

колебательных систем: отчет о НИР/НИОКР / Исполнитель: Институт проблем механики РАН, 1994; науч. рук. Болотник Н.Н., исполнители Акуленко Л.Д., Костин Г.В., Корнеев С.Б. – М., 1994.

78. Белокобыльский, С.В. К вопросу о математической модели цепной механической системы / Белокобыльский С.В., Елисеев А.В., Ситов И.С., Артюнин А.И. // Системы. методы, технологии. – 2017. – № 1(33).– С. 7–18.– Режим доступа: DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-7-18

79. Яворский, Б.М. Справочник по физике / Яворский Б.М., Детлаф А.А. – М.: Наука, 1974. – С.942.

80. Вибрации в технике: Справочник. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И. И. Блехмана. – В 6-ти т., Т. 2. – М.: Машиностроение, 1979. – 351 с.

81. Шубин, А. С. Курс общей физики: Учебное пособие для инж. – эконом.
специальностей вузов / Шубин А. С. – Изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 1976. – 480
с.

82. Гоноровский, И.С. Радиосигналы и переходные явления в радиоцепях / Гоноровский И.С. – М.: Гос. изд. литературы по вопросам связи и радио, 1954 г. – 326 с.

83. Белов, К.П. Редкоземельные магнетики и их применение /К.П. Белов. –
М.: Наука. 1980. – 240 с.

84. Катаев, Г.И. Физика магнитных материалов и новые редкоземельные магнетики / Г. И. Катаев, Р. З. Левитин. – М.: Общество "Знание" РСФСР, 1976. – 41 с.

85. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – Москва: Техносфера, 2012. – 624 с.

86. Ацюковский, В.А. Емкостные дифференциальные датчики перемещения / Ацюковский В.А. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 104 с.

87. Форейт, И. Емкостные датчики неэлектрических величин / Форейт И. – Библиотека по автоматике, выпуск 213. – М. – Л.: «Энергия», 1966. – 162 с.

88. Михлин, Б.З. Высокочастотные емкостные и индуктивные датчики. Массовая радиобиблиотека / Михлин Б.З. – М.: Госэнрегоиздат, 1960.

89. Виглеб, Г. Датчики / Виглеб Г. – Пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 196 с.

90. Котюк, А.Ф. Датчики в современных измерениях: Справочное издание. Массовая радиобиблиотека. Вып. 1277 / Котюк А.Ф. – М.: Радио и связь, Горячая линия-Телеком 2006. – 96 с.

91. Конструирование роботов: Пер. с франц./Андре П., Кофман Ж.-М., Лот Ф., Тайар Ж.-П. – М.: Мир, 1986. – 360 с

92. Дмитриенко, А.Г. Вихретоковые чувствительные элементы для бесконтактных датчиков перемещений / Дмитриенко А.Г., Нефедьев Д.И., Трофимов А.А. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – №1. – С. 4–9.

93. Патент РФ 2442965. МПК G01D 5/20, G01N 27/90. Вихретоковый датчик осевых смещений / Давыдов В.Ф., Батырев Ю.П., Дунаевский В.П., Багдатьев В.Е.; патентообладатели "Московский государственный университет леса" и ОАО "НПО ИТ". – заявка № 2010141890/28, заявл. 13.10.2010, опубл. 20.02.2012 Бюл. № 5.

94. Волков, С.С. Контроль качества сварных соединений в процессе ультразвуковой сварки пластмасс / Волков С.С., Дерябин А.А., Холодов С.С.// Известия вузов. Машиностроение. – 2017. – № 2(683). – С. 30–38.

95. Богомолов, В.Н. Устройства с датчиками Холла и датчиками магнитосопротивления / Богомолов В.Н. – Библиотека по автоматике, выпуск 42. - М. – Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 168 с.

96. Кузьминов, В.Ю. Магнитострикционный уровнемер / В.Ю.Кузьминов, А.Г.Фролов // СФЕРА НЕФТЕГАЗ. – 2012. – № 1. – С. 26–28.

97. Федоров, Ю. Н. Справочник инженера по АСУТП: проектирование и разработка / Федоров Ю. Н. – М.: Инфа-Инженерия, 2008. – 928 с.

98. Патент РФ 2416092. МПК G01N 27/22. Способ диэлькометрического контроля влажности материалов/ Иванов Б.Р., Лисичкин В.Г., Шведов С.Н.; патентообладатель Академия ФСО России. – заявка: 2010103260, заявл. 01.02.2010, опубл. 10.04.2011 бюл. № 10.

99. Баскаков, С.И. Радио технические цепи и сигналы / Баскаков С.И. – Изд. 3-е перер.и допол.–М.: Высшая школа, 2000.

100. Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузницев, В.А. Долгов, В.М. Коневский и д.р.; Под. ред. В.А. Кузнецева. – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 512 с.

101. Андреев, В.С. Теория нелинейных электрических цепей: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1982 – 280 с.

102. Ахтямов, А. М. Диагностирование местоположения трещины в стержне по собственным частотам продольных колебаний / А. М. Ахтямов, А. Р. Каримов // Техническая акустика. – 2010. – Т.10. – 3 с.

103. Сидоров В.А., Сотников А.Л. Применение резонансного частотомера для оценки технического состояния механического оборудования // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2008. – №3(14). – С. 31–35.

104. Земляков, В.Л. Диагностика пьезокерамического элемента по активной составляющей проводимости [Электронный ресурс] / Земляков В.Л. Толмачев С.А. // Инженерный вестник Дона. – 2013. –Т. 25, вып. 2 (25). – Режим доступа: http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1622.

105. Ключников, С.Н. Методы определения добротности резонансных систем / Ключников С.Н. // Ползуновский вестник. – 2011. – №3/1. – С.42 – 43.

106. Земляков В. Л., Ключников С. Н., Ерусалимский Ю. А. Уменьшение погрешности определения добротности по дискретным значениям частотной характеристики пьезорезонаторов / Земляков В. Л., Ключников С. Н., Ерусалимский Ю. А.// Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 33, №1-1.

107. Патент РФ 2134930 МПК H03L 7/18. Синтезатор частоты с делением на дробное число и коррекцией остаточной погрешности и способ синтеза частоты / А.В.Хитала (US); патентообладатель Моторола, Инк. (US). – заявка 95121757, заявл. 16.09.1994, опубл. 20.08.1999

108. Белов, Л. Компоненты синтезаторов стабильной частоты. генераторы, управляемые напряжением / Белов Л. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – № 1 (51). – С. 42–47.

109. Крюков, Я.В. Модель фазового шума с учетом спектральной маски синтезаторов частоты и генераторов сигнала / Крюков Я.В., Рогожников Е.В., Покаместов Д.А. // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2014. – №5. – С. 45–51.

110. Пидченко, С.К. Цифровой синтез высокостабильных колебаний с термои виброкомпенсацией нестабильности кварцевого опорного генератора/ Пидченко С.К., Таранчук А.А., Хоптинский Р.П. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процессах. – 2015. – № 1(50). – С. 96–99.

111. Голубков, В. Г. Двухканальный малошумящий синтезатор частот с регулируемой фазой и амплитудой / Голубков В.Г., Голубков А.В., Кочемасов В.Н. и др. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2015. – № 3. – С. 77–80.

112. Котельников В.А. Собрание трудов. В 5 т. Т. 4. Основы радиотехники. Часть 1. Т.4, ч.1 / ред. А.С. Прохоров. М.: Физматлит, 2015. 368 с. – Режим доступа: URL: http://vak.rutgers.edu/T4.html. (дата обращения: 17.06.2017).

113. Земляков, В.Л. Электротехника и электроника: учебник / В.Л. Земляков. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. – 304 с.

114. Земляков, В.Л. Определение параметров пьезокерамических элементов по амплитудным измерениям / Земляков В.Л., Ключников С.Н. // Измерительная техника. – 2010. – № 3. – С. 38–40.

115. Ключников, С.Н. Метод определения добротности резонансных систем по амплитудным измерениям и его аппаратная реализация на базе LabView / Ключников С.Н. // Инженерный вестник дона. – 2011. – Т. 18, № 4. – С. 90–93.

116. Земляков, В.Л. Компьютерное моделирование нового метода определения добротности резонансных систем / Земляков В.Л., Ключников С.Н. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – №5(118). – С.80–83.

117. Бодрикова, Т.А. Исследование быстродействия методов определения параметров пьезокерамических элементов / Бодрикова Т.А., Ключников С.Н. // Инженерный вестник дона. – 2013. – Т. 24, №1 (24). – С.7.

118. Земляков, В.Л. Упрощенное определение параметров пьезоматериалов на образцах элементов в форме диска / Земляков В.Л., Ключников С.Н. // Инженерный вестник дона. – 2012. – №3(21). – С. 473–482.

119. Низаметдинов, А.М. Анализ работы вибровискозиметрического датчика в режиме с подстройкой частоты вынужденных колебаний / Низаметдинов А.М. //Автоматизация процессов управления. – 2016. – №4. – С. 108–115.

120. Джексон, Р.Г. Новейшие датчики/ Джексон Р.Г., пер. с англ. под ред. В.В. Лучинина // Москва: Техносфера, 2007. – 384с.

121. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство / Титце У., Шенк К.; пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с., ил.

122. Картер Б. Операционные усилители для всех / Б. Картек, Р. Манчини; пер. с англ. А. Н. Рободзея. – М.: Додэка-XXI, 2011. – 544с.

123. Александров, В.Д. Особенности кристаллизации О-, М-, Р- терфенилов из расплава / Александров В.Д., Покинтелица Е.А. // Материаловедение. – 2016. – № 6. – С. 23–27.

124. Александров, В.Д. Исследование предкристаллизационных переохлаждений капель уксусной кислоты / Александров В.Д., Постников В.А., Щебетовская Н.В., Амерханова Ш.К. // Вестник Новгородского гос.ун-та им. Ярослава Мудрого. – 2014. – № 81. – С. 64–68.

125. Design and fabrication of in-plane resonant microcantilevers / Wu Y., Panaitov G., Zhang Y. and all. // Microelectronics Journal. – 2008. – Vol. 39, Is.1. – P.

44-48.

126. Symmetric mechanical plate resonators for fluid sensing / Abdallah A., Reichel E.K., Voglhuber-Brunnmaier T. and all. // Sensors and Actuators A: Physical. – 2015 – Vol. 232. – P. 319–328.

127. Исмагилов Ф.Р., Герасин А.А., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами.–М.: Машиностроение, 2014. –267 с

128. Abdallah, A. Measurement error estimation and quality factor improvement of an electrodynamic-acoustic resonator sensor for viscosity measurement / Ali Abdallah, Martin Heinisch, Bernhard Jakoby // Sensors and Actuators A: Physical.- Vol.199, 1 September 2013, Pages 318–324.

129. Каримкулова, Ш.К. Сравнение методов точного интегрирования дифференциальных уравнений / Каримкулова Ш.К. // Современные инновации. – 2016. – № 12-14. – С. 6–7.

130. Низаметдинов, А.М. Алгоритм реализации резонансного возбуждения механической колебательной системы / Низаметдинов А.М. // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 19-ой всероссийской молодежной научной школы-семинара, 6-8 декабря 2016, г.Ульяновск. – Ульяновск: УлГТУ. – 2016. – С. 198–199.

131. Низаметдинов, А.М. Расширение динамического диапазона вибровискозиметрического датчика / Низаметдинов А.М. // Материалы международной научно-технической конференции ИНТЕРМАТИК-2016, 21 – 25 ноября 2016, Москва, Ч4. – М.: МИРЭА. – С. 71–73.

132. Низаметдинов, А.М. Реализация способа возбуждения колебательной системы с поддержанием заданного значения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика / Низаметдинов А.М. // Труды XIII межд. науч.техн. конф."Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП-2016, 3 – 6 октября 2016, Новосибирск, Ч.2. – Новосибирск. – Т.3. – С. 13–17.

133. Заявка на патент РФ № 2016128297. МПК G01H 1/00 Способ определения добротности механической колебательной системы / Соломин БА, Низаметдинов А.М.; заявитель ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. – заявка № 2016128297, заявл. 12.07.2016, решение о выдаче патента 18.04.2017.

134. Патент РФ № 2607048 Российская Федерация. МПК G01N 25/00. Способ и устройство внешнего резонансного возбуждения механической колебательной системы вибровискозиметра / Низаметдинов А.М., Соломин Б.А., Черторийский

А.А.; патентообладатель ООО "Малое инновационное предприятие "Микроэлектронный контроль" (RU). – заявка 2015126832, заявл. 03.07.2015, опубл. 10.01.2017, бюл. № 1.

135. Макс, Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Том 2 / Ж.Макс, М.Мартен, М.Тротто и др. Пер.с фран. Ю.В. Пяткова и др. Под ред. Н.Г. Волкова. – М.: Изд-во «Мир», 1983. – 257 с.

136. Сергеев, В.А. Аппроксимация АЧХ селективного нановольтметра при шумовых измерениях / Резчиков С.Е., Сергеев В.А. // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 19-й всерос. молодежной науч.школы-семинара. – Ульяновск: УлГТУ. – 2016. – с.194–195.

137. Сергеев, В.А. Оценка погрешности определения показателя степени в спектре НЧ-шума / Резчиков С.Е., Сергеев В.А. //Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ. – 2015. – № 1(7). – С. 94–98.

138. Низаметдинов, А.М. Усовершенствованная система охлаждения для аппаратно-программного комплекса ИРЭН2.4 / Низаметдинов А.М. // Актуальные проблемы физической и фундаментальной электроники: тезисы докладов 14-й региональной научной школы–семинара, 7-9 декабря 2011, г.Ульяновск. – Ульяновск: УлГТУ. – 2011.–С.43.

139. Соломин, Б.А. Оперативное определение низкотемпературных свойств дизельных и авиационных топлив /Б.А.Соломин, А.М. Низаметдинов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – №5. – С.121–125.

140. Соломин, Б.А. Метод количественного определения содержания восков в растительных маслах / Б.А.Соломин, М.Л. Конторович, А.М. Низаметдинов, А.А. Черторийский // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т.15, № 4. – С.42–46.

141. Черторийский, А.А. Моделирование колебательной системы вибровискозиметра / А.М. Низаметдинов, А.А. Черторийский // Сборник трудов 48-й научно-технической конференции «Вузовская наука в современных условиях». –Ульяновск: УлГТУ. – 2014. – С. 41–44.

142. Соломин, Б.А. Особенность и способ измерения температуры кристаллизации / Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов // Актуальные проблемы физической и фундаментальной электроники: тезисы докладов 17-й всероссийской молодежной научной школы–семинара, 2-4 декабря 2014, г.Ульяновск. – Ульяновск: УлГТУ. – 2014. – С. 199.
143. Соломин, Б.А. Оперативное определение показателей низкотемпературных свойств дизельных топлив и авиационных керосинов / Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов.– Ульяновск: УлГТУ. – 2013 – С.211.

144. Низаметдинов, А.М. Особенности обработки данных при исследовании низкотемпературных свойств топлив / А.М. Низаметдинов, С. А. Росоха, А.А. Черторийский / Актуальные проблемы физической и фундаментальной электроники: тезисы докладов 15-й региональной научной школы–семинара, 4-7 декабря 2012, г.Ульяновск. – Ульяновск: УлГТУ. – 2012. – С. 25.

145. Низаметдинов, А.М. Многофункциональный вибровискози-метрический датчик с необремененным зондом // Актуальные проблемы физической и фундаментальной электроники: материалы 16-й региональной научной школы– семинара, 4-6 декабря 2013, г.Ульяновск. – Ульяновск: УлГТУ. – 2013. – С. 19.

146. Кочетков, А.И. Температурные характеристики датчика изгиба на основе волокна с двойной оболочкой / Кочетков А.И., Иванов О.В., Васин С.В. // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 19-й всероссийской молодежной научной школы-семинара. – Ульяновск: УлГТУ. – 2016. – С. 40–41.

147. Веснин, В.Л. Система обработки сигналов датчиков на основе волоконно-оптических брэгговских решеток / Веснин В.Л., Иванов О.В., Низаметдинов А.М., Черторийский А.А. // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 19-й всероссийской молодежной научной школы-семинара. – Ульяновск: УлГТУ. – С. 36–37.

148. Бутов, О.В. Малогабаритная быстродействующая система обработки сигнала волоконно-оптического брэгговского датчика / Бутов О.В., Веснин В. Л., Иванов О. В., Черторийский А.А, Низаметдинов А.М. // Межвузовский сборник научных трудов «Радиоэлектронная техника». – Ульяновск: УлГТУ. – 2016. – С.75–83

149. Веснин, В. Л. Контрольно-измерительная система на основе волоконнооптических брэгговских решеток / Веснин В. Л., Иванов О. В., Черторийский А.А., Низаметдинов А.М. // Научно-проктическая конференции "Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития". Сборник материалов., 15–16 ноября 2016, Москва – С. 74–76.

150. Васин, С.В. Спектры пропускания оптического волокна при сильном скручивании / Васин С.В., Иванов О.В., Злодеев И.В.// Актуальные проблемы

физической и функциональной электроники: материалы 18-й всероссийской молодежной научной школы-семинара. – Ульяновск: УлГТУ. –С. 43–44.

151. Веснин, В.Л. Быстродействующая система обработки сигналов волоконно-оптических брэгговских датчиков на основе дифференциального фотоприемника / Веснин В.Л., Низаметдинов А.М, Иванов О.В, Черторийский А.А. // Фотон-экспресс. – 2015. – № 6(126). – С. 238–239.

152. Ivanov, O.V. Fiber-optic bend sensor based on double cladding fiber / Ivanov O.V., Chertoriyskiy A.A. // JOURNAL OF SENSORS. – 2015. – T.2015. – p. 726793.

153. Иванов. О.В. Волоконно-оптический датчик изгиба на основе преобразования мод в волокне с двойной оболочкой / Иванов О.В., Черторийский А.А. // Датчики и системы. – 2015. – № 9-10 (196). – С. 64–69.

154. Зак, Е.А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е.А. Зак – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128с.

155. Патент РФ № 2522239 РФ. МПК G01N33/03. Способ и устройство для количественного определения содержания восков и воскоподобных веществ в рафинированных растительных маслах/ Соломин Б.А., Конторович М.Л., Низаметдинов А.М., Черторийский А.А.; патентообладатель ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. – заявка 2012134490, заявл. 10.08.2012, опуб. 10.07.2014 Бюл. № 19.

156. Патент РФ № 2606850. МПК G01N33/03, G01N25/02. Способ и устройство для количественного определения содержания восков и воскоподобных веществ в рафинированных растительных маслах / Черторийский А.А., Радаев О.А., Соломин Б.А., Низаметдинов А.М.; патентообладатель Ульяновский государственный технический университет.- заявка 2015109056, заявл. 13.03.2015, опуб. 10.01.2017, бюл. № 1.

157. Низаметдинов, А.М. Адаптивные алгоритмы обработки объективных многомерных оптических сигналов при количественной оценке содержания восков в растительных маслах / А.М. Низаметдинов, Р.Р. Низаметдинова // Актуальные проблемы физической и фундаментальной электроники: тезисы докладов 15-й региональной научной школы–семинара, 4-7 декабря 2012, г.Ульяновск. – Ульяновск: УлГТУ. – 2012. – С. 23.

158. Соломин, Б.А. Использование двухканального волоконно-оптического датчика для контроля качества растительного масел / Б.А.Соломин, М.Л. Конторович, А.М. Низаметдинов, А.А. Черторийский // Радиоэлектронная техника: межвузов. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ. –2012. – С. 229.

159. Сергеев В.А. Спектры оптического пропускания многостенных углеродных нанотрубок в полимерном связующем / В.А. Сергеев, А.М. Низаметдинов, А.А. Черторийский, Д.К. Подымало, Е.С. Ваганова, О.А. Давыдова, М.В. Бузаева, Е.С. Климов // Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волновой оптики: физические свойства и применение: сборник трудов 13-й международной научной конференции-школы, Саранск, 7–10 октября 2014 г. – Саранск: Издательство Мордовского университета. – 2014 – С.51.

160. Низаметдинов, А.М. Экспериментальная установка для исследования спектров пропускания растительных масел / А.М. Низаметдинов, О.А. Радаев // Сборник трудов 48-й научно-технической конференции «Вузовская наука в современных условиях». – Ульяновск: УлГТУ. – 2014. – С. 38–41.

161. Низаметдинов, А.М. Оптоэлектронный экспресс-анализатор восков и воскоподобных веществ в растительных маслах / А.М. Низаметдинов, О.А. Радаев // Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2015», г. Томск, 13–15 мая 2015г., часть 1. – Томск. – С. 260–261.

162. Низаметдинов, А.М. канала оптоэлектронного экспресс-анализатора восков и воскоподобных веществ в растительных маслах / А.М. Низаметдинов, О.А. Радаев, А.А. Черторийский // Актуальные проблемы физической и фундаментальной электроники: тезисы докладов 18-й всероссийской молодежной научной школы–семинара, 1-3 декабря 2015, г.Ульяновск. – Ульяновск: УлГТУ. – 2015. – С.219–220.

163. Леньшин, А.В. Экспериментальные исследования синтезатора частот с коммутацией элементов кольца фазовой автоподстройки / Леньшин А.В., Тихомиров Н.М., Тихомиров В.Н. // Вестник ВИ МВД России. – 2016. – №3. Режим доступа: URL: http://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-sintezatora-chastot-s-kommutatsiey-elementov-koltsa-fazovoy-avtopodstroyki (дата обращения: 26.03.2017).

164. Четкин, О.В. Вопросы адаптивной настройки синтезаторов частот с цифровой петлей фазовой автоподстройки частоты / Четкин О.В., Гущина А.А., Жуков М.М. // Вестник ВИ МВД России. –2016. – №2. Режим доступа: URL: http://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-adaptivnoy-nastroyki-sintezatorov-chastot-s-tsifrovoy-petley-fazovoy-avtopodstroyki-chastoty (дата обращения: 26.03.2017).

165. Оськин, Н.Н. Анализ передаточных модуляционных функций частотномодулированных цифровых синтезаторов частот, инвариантных к паразитной угловой модуляции / Оськин Н.Н., Жайворонок Д.А. // Вестник Воронежского института МВД России. – 2012. – №1. – С. 122–127.

166. Никитин, Ю. Частотный метод анализа характеристик синтезаторов частот с импульсно-фазовой автоподстройкой частоты Analog Devices. Часть 4 / Никитин Ю., Дмитриев С. // Компоненты и Технологии. – 2003. – № 6. – с. 76. – Режим доступа: URL: http://cyberleninka.ru/article/n/chastotnyy-metod-analiza-harakteristik-sintezatorov-chastot-s-impulsno-fazovoy-avtopodstroykoy-chastoty-analog-devices-chast-4 (дата обращения: 26.03.2017).

167. Петров А.Г. О вынужденных колебаниях качающейся пружины при резонансе / Петров А.Г. // Доклады академии наук. – 2015. – Т. 464, №5. – С. 553. – Режим доступа: DOI: 10.7868/S0869565215290113.

168. Нихамкин, М.Ш. Моделирование колебаний осциллятора с сухим трением / Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Саженков Н.А. и др.// Вестник ПНИПУ. Механика. – 2012. – №2. – С. 128–139.

169. Азмайпарашвили, З.А. Метод измерения резонансной частоты колебательной системы / Азмайпарашвили З.А. // Измерительная техника. – 2004. – №9. – С. 49–53.

170. Адоменас, П. Измерители амплитудно-частотных характеристик и их применение / Адоменас, П., Аронсон, Я., Бирманас, Е. и др. – М.: Связь, 1968. – С.164.

171. Гетманова, Е.Е. Возбуждение колебательных систем треугольными импульсами силы / Гетманова Е.Е. // Scientific World. Секция 2. Информатика и кибернетика на проекте SWORLD. – 2012. – Т.2, № 2. – С. 66–70.

172. ARM Thumb-based Microcontrollers AT91SAM7X512/256/128 [Электронный ресурс] // 6120H-ATARM-17-Feb-09. – Режим доступа: http://www.atmel.com/AT91SAM.

173. Бобылев, Д. А. Определение параметров многоэлементных двухполюсников по мгновенным значениям отклика на импульсное тестовое воздействие / Бобылев, Д. А. // Датчики и системы. – 2014. – №1(176). – С. 18–23.

174. Бобылев, Д.А. Быстродействующий помехозащищенный преобразователь параметров многоэлементных RC-двухполюсников для мониторинга и контроля / Бобылев Д.А. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. №1 (11). – С. 55–60.

175. Заявка на патент РФ № 2016114008. МПК G01R19/04. Быстродействующий измеритель амплитуды квазисинусоидальных сигналов /

Соломин БА, Низаметдинов А.М.; патентообладатель ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. – заявка 2016114008. заявл. 11.04.2016. решение о выдаче патента 2017.04.19.

176. Соломин, Б.А. Анализ погрешностей измерения частоты и разности фаз выходного сигнала вибровискозиметрического датчика для автоколебательного режима и режима вынужденных колебаний / Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов // Межвузовский сборник научных трудов «Радиоэлектронная техника». – Ульяновск: УлГТУ. – 2016. – С.62–70

177. Соломин, Б.А. Методические погрешности определения параметров сигналов вискозиметрического датчика анализатора низкотемпературных свойств топлив / Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов, А.А. Черторийский // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ. – 2015 – С.81–87.

178. Варнаков, В.В. Результаты исследований низкотемпературных свойств биодизельного топлива / В.В. Варнаков, Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов и др.// Международный научный журнал. – 2013. – №5. – С. 104–109.

179. Уидроу, Б. Адаптивная обработка сигналов / Уидроу Б., Стирнз С.; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.

180. Хоровиц, П. Искусство схемотехники. В 3-х томах. Т. 2 / Хоровиц П., Хилл У; пер. с англ. – Изд. 4-е перераб. и доп. – М.: Мир, 1993. – 371 с.

181. Бабичев, А.П. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский; под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

182. Александров, В.Д. Исследование переохлаждений при кристаллизации смесей в системе бензол-дифенил / Александров В.Д., Щебетовская Н.В. // Материаловедение. – 2012. –№ 7. – С. 13–18.

183. Александров, В.Д. Особенности кристаллизации дифенила, дифенилметана, дифенилэтана в зависимости от термической предыстории жидкой фазы /Александров В.Д., Покинтелица Е.А. // Вестник Донецкого нац.техн.ун-та. – 2016. – № 2(2). – С. 18–23.

184. Александров, В.Д. Неравновесная кристаллизация сплавов в системе нафталин дибензил / Александров В.Д., Покинтелица Е.А., Щебетовская Н.В. // Журнал физической химии. – 2014. – Т. 88, № 7-8. – С. 11–29.

185. ГОСТ 5066-91 (ИСО 3013-74). Топлива моторные. Методы определения температуры помутнения, начала кристаллизации и кристаллизации. – взамен

ГОСТ 5066-56; введ. 01.01.93. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.

186. ASTM D5972 a. Standard Test Method for Freezing Point of Aviation Fuels (Automatic Phase Transition Method) [Стандартный метод определения температуры замерзания авиационного топлива (автоматический метод фазового перехода)] // Active Standard, Book of Standards Volume: 05.02 [USA]

187. ASTM D7153. Standard Test Method for Freezing Point of Aviation Fuels (Automatic Laser Method) [Стандартный метод определения точки замерзания авиационного топлива (автоматический метод с применением лазера)] // Active Standard , Book of Standards Volume: 05.04.

188. Анализатор низкотемпературных свойств нефтепродуктов ИРЭН 2.3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://granat-e.ru/iren_2-3.html – Дата обращения 18.08.2010.

189. ОСТ 95 10351-2001. Группа Т80. Отраслевая система обеспечения единства измерений. Общие требования к методикам выполнения измерений. – введ. 2001-11-01. – Режим доступа: <u>http://docs.cntd.ru/document/1200071554</u>, версия сайта: 2.2.7 (дата обращения 2016-2017)

190. ОСТ 95 10289-2005. Отраслевая система обеспечения единства измерений. Внутренний контроль качества измерений (с Изм. N 1). – взамен ОСТ 95 10289-98. – введ. 01 июня 2005 года.

Приложение А

Акты о внедрении и использования результатов кандидатской диссертации



Общество с ограниченной ответственностью «Малое инновационное предприятие «МИКРОЭЛЕКТРОННЫЙ КОНТРОЛЬ» (ООО «МИП МЭлКон») Тел: 8-917-637-54-11

> «УТВЕРЖДАЮ» TCTBEN иректор ООО «Малое инновационное предприятие «Микроолектронный контроль» А.М. Низаметдинов 2017 г. WOHX

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации Азата Маратовича Низаметдинова

Настоящий акт составлен в том, что результаты кандидатской диссертации А.М. Низаметдинова на тему: «Повышение точности вибровискозиметрических датчиков на основе электромеханических колебательных систем в нестационарных режимах работы» использованы при выполнении научно-исследовательской опытно-конструкторской работы (НИОКР) ООО «МИП «МЭлКон».

Так, полученный в процессе подготовки кандидатской диссертации патент №2504757 РФ на изобретение «Способ исследования теплофизических свойств жидкостей и устройство для его осуществления» (авторы: М.Л. Конторович, Б.А.Соломин, А.М. Низаметдинов, А.А. Черторийский, патентообладатель ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) был предоставлен ООО «МИП «МЭлКон» по лицензионному договору неисключительного права и использован при выполнении проекта №10258 на тему «Разработка опытного образца экспресс-анализатора низкотемпературных свойств нефтепродуктов с улучшенными метрологическими характеристиками» по Программе «Старт-2013» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Госконтракт №11950р/21943 от 27.06.2013). Использование данного патента позволило повысить точность измерения температуры застывания, а так же расширить номенклатуру испытуемых жидкостей за счет расширения динамического диапазона измерений в область высоких значений вязкости.

Инженер ООО «МИП «МЭлКон»

адаев О.А. Радаев

151

ительности утверждаю» Заместитель директора по научной работе УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, к.т.н. А. А. Черторийский 2017 г. АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации Низаметдинова Азата Маратовича

Научно-техническая комиссия в составе ведущего научного сотрудника д.ф.м.н. О. В. Иванова, старшего научного сотрудника к. ф.- м. н. В. Л. Веснина и ведущего научного сотрудника, к. т. н. Б.А. Соломина составила настоящий акт в том, что результаты кандидатской диссертации А.М. Низаметдинова, представленные в его публикациях и патентах, использованы при проведении исследований по темам «Совершенствование оптоэлектронных и механотронных средств исследования наноструктурных термостимулированных процессов в многокомпонентных жидкостях» (№ гос. регистрации 01201353889) и «Исследование фазовых и микрофазовых переходов в многокомпонентных жидкостях физическими методами» (№ гос. регистрации АААА-А16-116060210012-2), выполнявшимся в период с 2013 по 2016 год в УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в соответствии с государственным заданием на НИР.

Разработанные А.М. Низаметдиновым способы адаптивного управления режимом возбуждения вибровискозиметрического датчика, а также способы обработки выходного сигнала указанного датчика, нашли практическую реализацию в виде лабораторного стенда для проведения исследований термостимулированных процессов в жидкостях. Результаты испытаний стенда на большом числе контрольных образцов тестовых жидкостей подтвердили теоретически показанные А.М. Низаметдиновым возможности повышения чувствительности датчика и расширения его динамического диапазона измерений в область высоких значений вязкости.

Ведущий научный сотрудник, д. ф.-м. н. Ведущий научный сотрудник, к. т. н. Старший научный сотрудник, к. ф.-м. н.

О.В.Иванов Десецу Б.А. Соломин Ва В.Л. Веснин

Приложение Б

Электронная часть вибровискозиметрического датчика, настройка и отладка

Электронные узлы ВВД должны выполнять следующие задачи:

- преобразование механических колебаний зонда в электрический сигнал;
- усиление данного сигнала;
- термостатирование камертонной КС датчика;
- измерение и усиление электрического сигнала термопары зонда ВВД.

Частота собственных колебаний КС ВВД (рисунок Б.1) около 250 герц.

Колебания зонда возбуждаются переменным магнитным полем, создаваемым током через катушку возбуждения 12, расположенную в корпусе 4 ВВД. В анализаторе использован режим возбуждения колебаний на резонансной частоте с постоянной амплитудой возбуждающей силы. Катушка возбуждения 12 ВВД запитана переменным током, задаваемым каскадами возбуждения ВВД (см. Приложение Д), с постоянной составляющей.

Экспериментальные исследования датчика показали, что КС работает в линейной области при амплитуде колебаний зонда не более 1 микрометра.

Сигнал ВВД формируется с помощью оптрона открытого типа, состоящего из светодиода и фототранзистора, регистрирующего световой поток, проходящий через канал 10 в траверсе 9, перекрываемый непрозрачными шторками 7. Форма сигнала, снимаемого с фототранзистора оптрона U1, близка к синусоидальной, а амплитуда лежит в пределах 15 мВ. Переменная составляющая сигнала с оптрона усиливается в 20 раз (K=20). Сигнал с выхода инструментального усилителя является выходным сигналом ВВД U_{Вибро} с максимальной амплитудой 1,0 В.

Ток через светодиод оптрона U1 (рисунок Б.2) составляет 10 мА и ограничивается резистором R4. Ток через фототранзистор оптрона U1 при отсутствии возбуждающей силы на катушке возбуждения ВВД был выбран равным 1/10 значения максимально допустимого тока через фототранзистор, и для фототранзистора типа КР 1608F3C составляет 5 мА.



1 – шарик зонда; 2 – стеклянный капилляр; 3 – держатель зонда;
 4 – корпус; 5 – упругий элемент консоли; 6 – регулировочные винты;
 7 – шторка; 8 – верхнее плечо камертона; 9 – траверса; 10 – оптический канал;
 11 – нижнее плечо камертона; 12 – катушка возбуждения.
 Рисунок Б.1 – Колебательная система вибровискозиметрического датчика

Использование ВВД камертонного типа целесообразно ввиду малой массы зонда по сравнению с массой колеблющегося плеча камертона. В этом случае влияние присоединенной массы жидкости к зонду на собственную частоту колебаний камертона незначительно и при измерении относительно малых вязкостей связь между динамической вязкостью и амплитудой колебаний зонда задается с достаточной точностью следующим выражением:

$$\sqrt{\eta\rho} = \frac{C_1}{A} - C_2, \qquad (B.1)$$

где η – динамическая вязкость, р – плотность жидкости, А – амплитуда колебаний зонда, C₁, C₂ – вязкостные постоянные датчика.



Рисунок Б.2 – Схема формирования сигнала колебаний зонда вибровискозиметрического датчика



Рисунок Б.3. – Схема термостата вибровискозиметрического датчика

Для обеспечения стабильности работы механической КС, а так же всех электронных компонентов вся конструкция ВВД термостатируется. Для термостатирования металлический корпус ВВД нагревается до температуры ≈ 40°C. заведомо температуры окружающей среды. В качестве выше нагревательных элементов используются биполярные транзисторы VT1 и VT2 (рисунок Б.3), работающие в режиме управляемого источника тока. Контроль температуры металлический корпус камертонного ВВД включен в мостовую схему, а в качестве термозависимого элемента выбран терморезистор R7.

В качестве измерителя температуры зонда ВВД, который фактически является измерителем температуры жидкости, используется термопара в виде сферического спая 1 (рисунок Б.4) из медного и константанового изолированных проводников диаметром 0,05 мм. Проводники проходят внутри стеклянного штока 2, на внешнем конце которого жестко закреплен измерительный зонд, второй конец которого закреплен на подвижном плече камертона.

Для обеспечения термостатирован опорного спая термопары зонда с долговременной нестабильностью температуры не более 0,05°C был создан дополнительный малый термостат, со схемой регулирования, аналогичной схеме термостата корпуса ВВД, с температурой поддержания 50°С. Нагреваемым элементом в данном случае является медный брусок (размерами 5х5х8мм), на который припаиваются два нагревательных транзистора. В бруске высверлены отверстия для монтажа опорного спая термопары и терморезистора. Сигнал термопары усиливается предварительным усилителем (рисунок Б.4) с коэффициентом усиления 206,8. Диапазон измерения температур жидкости лежит в пределах от минус 70 до +60 °C, с температурой опорного спая около 50 °C, при этом разность потенциалов в точках Х4 и Х5 будет изменяться от минус 4,2 мВ до 0,8 мВ. После усилителя диапазон выходного напряжения, зависящего от температуры зонда ВВД, лежит в пределах от 0,9В до минус 0,2В.

В ходе разработки электрических принципиальных схем внутренняя электронная часть ВВД разделена на две платы – верхнюю и нижнюю. На верхней печатной плате размещен предварительный усилитель температуры зонда с термостатом опорного спая. На нижней плате находится схема контроля температуры корпуса ВВД и предварительный усилитель сигнала ВВД. Сигнал возбуждения ВВД, сформированный на объединительной плате, подается непосредственно на катушку возбуждения.

156



Рисунок Б.4 – Схема термопарного усилителя вибровискозиметрического датчика

Таким образом, на выходе ВВД будет формироваться два сигнала:

- квазигармонический сигнал ВВД с максимальной амплитудой 1,0 В;

– сигнал термопары в диапазоне напряжений от 0,9 В до минус 0,2 В.

Настройка и отладка ВВД заключается в следующем:

 – регулировке оптического зазора между шторками 16 (рисунок Б.5) оптрона открытого типа формирующего сигнал ВВД;

- балансировке массы плеч колебательной системы 17 и 20;

проверке правильности установки и подержания температуры корпуса
 ВВД и опорного спая термопары зонда.

Настройка зазора производится оптического канала помощью С регулировочных шторок 16, выполненных В виде ВИНТОВ. Винты 16 выкручиваются. Подается напряжение питания на нижнюю печатную плату 6. С помощью мультиметра контролируется падение напряжения на резисторе R6. При вывернутых винтах 16 падение напряжения на резисторе R6 равно 8 В, что соответствует току 10 мА. Медленно вворачивая один из винтов, добиваются значения напряжения на резисторе, равного 6 В (оптический канал перекрыт на 3/4). После вворачивается второй винт, до момента, когда на резисторе будет 4 В, что соответствует току 5 мА. Таким образом, регулировка оптического зазора завершена.



1 – шарик зонда; 2 – стеклянный капилляр; 3 – держатель зонда;
4 – нижняя крышка корпуса вибровискозиметрического датчика;
5 – термоизоляционный слой; 6 – нижняя печатная плата; 7 – корпус вибровискозиметрического датчика; шторка; 8 – металлический (термостатированный) корпус колебательной системы;;
9 – греющий элемент; траверса; 10 – винт крепления греющего элемента; 11 – верхняя печатная плата; 12 – верхняя крышка корпуса вибровискозиметрического датчика; 13 – винт крепления к траверсе упругого элемента колебательной системы; 14 – упругий элемента колебательной системы; 15 – регулировочные винты; 16 – винт шторки; 17 – верхнее плечо колебательной системы; 20 – нижнее плечо колебательной системы; 21 – катушка возбуждения. Рисунок Б.5 – Чертеж общего вида вибровискозиметрического датчика.

Для балансировки масс плеч колебательной системы 17 и 20 необходимо частично собрать датчик и схему анализатора для настройки, а именно:

- установить измерительный зонд с шариком (капилляр 2, шарик 1);
- установить нижнюю печатную плату 6;
- полусобранный датчик установить во внешний теплоизолирующий

пластиковый корпус 7 с нижней крышкой 4;

 верхняя печатная плата не устанавливается, а проводники, подводящие питание к данной плате, изолируются;

 – разъем ВВД подключить к ответному разъему X25 на плате объединительной (Приложение Д, рисунок Д.2);

- установить в плату объединительную плату распределения питания;

– подключить анализатор спектра (для измерения добротности системы) и к контакту 16 разъема Х24А (рисунок Д.2, плата сбора данных не подключена) подключить входной сигнал от анализатора спектра, а выходной снимается с контакта 17 разъема Х24А).

После подачи напряжения питания с помощью анализатора спектра измеряется АЧХ в пределах частот от 200 до 300 Гц (при необходимости частотный диапазон изменяется). Уменьшая и увеличивая массу плеча КС 17, добиваемся максимальной амплитуды (резонансная частота при этом может изменяться). Массу плеча 17 можно изменить с помощью шести подстроечных винтов 15. Убирая часть винтов можно облегчить верхнее плечо и таким образом приблизить значение масс верхнего 17 и нижнего 20 плеч КС.

После балансировки в датчик устанавливается и подключается верхняя плата 11. После включения проверяется правильность установки температур термостатов корпуса ВВД и опорного спая термопары зонда. Контроль температуры осуществляется с помощью регистрации напряжения и тока на задающих терморезисторах (R1 и R2) через 10 минут после подачи на ВВД питания. Затем датчик окончательно герметизируется (верхняя и нижняя крышка перед закрытием промазываются герметиком).

На рисунках Б.7 и Б.8 приведены фотографии КС и внешний вид собранного ВВД.



б)





в)

а) вид со стороны винта крепления к траверсе упругого элемента,
 б) вид с боку, со стороны установки фотоприемника оптопары открытого типа,
 в) вид сверху
 Рисунок Б.7 – Внешний вид колебательной системы



Рисунок Б.8 – Внешний вид собранного вибровискозиметрического датчика

160

Приложение В

Блок охлаждения и нагрева аппаратно-программного комплекса

При разработке блока охлаждения и нагрева аппаратно-программного комплекса в качестве прототипа использовалось система охлаждения экспрессанализатора низкотемпературных свойств нефтепродуктов ИРЭН2.3, схема которой представлена на рисунке В.1.



1-кювета, 2-охлаждаемая жидкость, 3 и 8-термоэлектрические модули,
 4-пластина крепления модуля, 5-радиатор принудительного охлаждения,
 6-термоаккумулятор, 7-теплоизоляция.
 Рисунок В.1 – Схема прототипа системы охлаждения

Прототип системы охлаждения позволяет изменять температуру пробы в диапазоне от плюс 70 °C до минус 65 °C. При этом для получения минимальной температуры пробы, температура окружающей среды должна быть не более 20°C, а потребляемая мощность системы составляет \approx 180 Вт. Для достижения температуры минус 70°C, уменьшения времени анализа до 20 минут и снижения потребляемой электрической мощности предложено:

изменить компоновку термоэлектрических модулей с аккумулятором холода;

 – экспериментально определить наиболее эффективных режимов работы термоэлектрических модулей с аккумулятором холода и системы воздушного охлаждения. Для охлаждения горячей грани термоэлектрического модуля использовано принудительное воздушное охлаждение, которое в отличие от водяного не требует дополнительных узлов прокачки жидкости, что облегчает конструкцию.

Для обоснованного выбора структуры системы охлаждения кюветы с пробой проводился тепловой расчёт блока охлаждения для конструкций, представленных на рисунках В.1 и В.2.

Схема на рисунке В.1 содержала аккумулятор тепла 6, представляющий собой параллелепипед из алюминия с большой величиной коэффициента удельной теплоёмкости, который охлаждался двумя боковыми термоэлектрическими модулями 8 до начальной температуры T₀. Далее включалась вторая ступень охлаждения, которая состояла из термоэлектрического модуля 3, расположенного на верхней грани аккумулятора. Охлаждение пробы жидкости осуществлялось с заданной скоростью изменения температуры *v*.

В схеме 2 (рисунок В.2) вместо аккумулятора тепла использовалась медная термоаккумулирующая пластина 4, которая располагалась между двумя термоэлектрическими преобразователями 3 и 5. Обе схемы адиабатически теплоизолировались. Горячие грани термоэлемента 8 в схеме 1 и термоэлемента 7 в схеме 2 охлаждались радиаторами принудительного охлаждения, с известной пропускной способностью по воздуху P_s.



Рисунок В.2 – Конструкция системы охлаждения пробы: 1-кювета, 2-охлаждаемая жидкость, 3 и 7-термоэлектрические модули, 4-термоаккумулирующая пластина, 5-радиатор принудительного охлаждения, 6- теплоизоляция.

При моделировании температура окружающей среды T_{cp} принималась равной 25 °C в начальная температура $T_0 = -15$ °C. Зависимость температуры жидкости от

162

времени представлена на рисунке В.3. Для первой схемы при увеличении скорости охлаждения наблюдается минимум в распределении температуры, величина которого увеличивается с увеличением скорости, что определяется инерционностью аккумулятора тепла.

При равных скоростях охлаждения использование второй схемы позволяет достичь более низких температур в стационарном режиме, что объясняется лучшими условиями теплоотдачи, то есть схема с медной термоаккумулирующей пластиной является предпочтительной.



Рисунок В.3. – Зависимость температуры жидкости от времени

При выборе термоэлектрического модуля (ТЭМ) учитывались следующие требования:

а) холодопроизводительность второй ступени ТЭМ не ниже 10 Вт;

б) разность температур между холодной и горячей гранями ТЭМ должна быть не меньше 80 °С;

в) потребляемая электрическая мощность не более 34 Вт.

С учётом этих требований был выбран ТЭМ марки ТВ-2-(127-127)-1,3. Параметры выбранного модуля приведены в таблице В.1.

Для унификации предложено использовать в первой и во второй ступени охлаждения однотипные ТЭМ. При этом первая ступень была реализована на двух ТЭМ для повышения холодопроизводительности.

Марка термоэлектрического модуля	Максимальный ток потребления, А	Холода производительность, Вт	Максимально допустимое напряжение, В	разность температур, ° C	Габариты (ШхДхВ), мм
TB-2-(127-127)-1,3	2,8	16,1	15,4	83	30x30x8,5

Таблица В.1 – Электрические и тепловые параметры термоэлектрического модуля

С учетом выбранных ТЭМ максимальная потребляемая электрическая мощность будет ≈ 102 Вт, что на 43% меньше, чем в прототипе.

Оптимальные режимы работы ТЭМ с аккумулятором холода и системы воздушного охлаждения были определены экспериментально.

В окончательной варианте АПК (рисунок В.4) охлаждение горячих граней ТЭМ первой ступени 10 осуществляется с помощью радиатора (2). В конструкции радиатора применяются тепловые трубки 11. В тепловых (закрытых) трубках из теплопроводящего металла (например, меди) находится легкокипящая жидкость. Перенос тепла происходит за счёт того, что жидкость испаряется на горячем конце трубки, поглощая теплоту испарения, и конденсируется на холодном, откуда, через фитиль, перемещается обратно на горячий конец. Применение тепловой трубки позволило увеличить эффективность охлаждения за счет увеличения общей площади радиатора.



6-устройство позиционирования вибровискозиметрического датчика, 7-кювета, 8- вторая ступень охлаждения, 9- аккумулятор холода, 10- первая ступень охлаждения, 11 - тепловая трубка радиатора. Рисунок В.4 – Схема расположения усовершенствованной системы охлаждения

1-основание анализатора, 2-радиатор, 3-вентилятор, 4-электронный блок, 5- вибровискозиметрический датчик,

Охлаждается радиатор вентилятором 3. Вентиляция электронного блока 4 объединена с охлаждением радиатора первой ступени 2. Первая ступень 10 постоянно включена и охлаждает аккумулятор холода 9. На аккумуляторе холода расположена вторая ступень охлаждения 8, которая охлаждает непосредственно кювету 7 с исследуемой пробой.

Вся конструкция была теплоизолирована от внешней среды. К материалу теплоизоляции предъявлялись следующие требования:

- стойкость к агрессивным жидкостям;

– сохранение теплоизолирующих свойств при температуре ниже минус 70 °C;

– гидроизоляция и гидрофобность.

В качестве теплоизолирующего материала был выбран вспененный полиэтилен. Этот материал имеет пористую структуру, является хорошим паро-, тепло- и гидроизолятором и стоек к агрессивным средам, что немаловажно при испытании различных углеводородов.

В качестве теплоизолирующего материала можно также использовать пенополиуретановый герметик, но его использование возможно только в конечной конструкции, т.к. после высыхания герметика модуль охлаждения становится неразборным.

В таблице В.2 представлены результаты измерения минимально достижимой температуры при различных скоростях охлаждения. Начальные условия эксперимента: температура пробы – плюс 60 °C; температура аккумулятора холода – минус 32°C; температура окружающей среды – плюс 26 °C; тип теплоизоляции – пенополиуретановый герметик.

I аолица D.2 = I аоли	ца минимал	івно достил	кимои темп	сратуры от	скорости с	ллаждения
Скорость охлаждения, °С/с	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Минимально достигнутая температура, °С	-60	-68	-71	-69	-65	-55
1 21 -						

Таблица В.2 – Таблица минимально достижимой температуры от скорости охлаждения

Из таблицы видно, что оптимальной скоростью охлаждения пробы является 0,2 °C/с, а минимально достижимая температура при этом равна минус 71°C.

Приложение Г

Конструкция кюветы и электронный блок датчика температуры кюветы

В новой конструкции системы охлаждения (Приложение В) было увеличено основание кюветы, что позволило крепить кювету к ТЭМ с помощью прижима изоляционным слоем и увеличить теплообмен между кюветой и ТЭМ за счёт увеличения площади соприкосновения.

Для уменьшения теплоёмкости кюветы было предложено изготавливать ее из разных по теплопроводности материалов: основание кюветы (нижняя обойма) сделано из материала с большой теплопроводностью, а верхняя обойма – из менее теплопроводящего материала (рисунок Г.1). Для данной конструкции кюветы объем исследуемой пробы составляет 0,2 мл.

Нижняя обойма изготовлена из меди марки М3р, теплопроводностью 401 Вт/(м·К) [30]; Верхняя обойма – из коррозионно стойкой латуни марки ЛЦЗ0АЗ, теплопроводностью 114 Вт/(м·К).



1-нижняя обойма, 2-отверстие для датчика температуры кюветы, 3-верхняя обойма, 4-отверстие для оптического канала.
 Рисунок Г.1 – Чертёж кюветы для испытуемой жидкости

В кювету вмонтирован волоконно-оптический датчик открытого типа, предназначенный для измерения оптических свойств жидкостей. Волоконнооптические датчики открытого типа имеют следующие преимущества:

- слабая зависимость результата измерения от температуры;

- слабая зависимость от электромагнитных полей большой интенсивности;

- слабая зависимость от вибраций в зоне измерений;

- стойкость к агрессивным средам и химическая инертность;

 высокая локальность измерения (возможность получения заданных конструктивных и метрологических характеристик за счёт конструкции).

С этой целью увеличения пространственной разрешающей способности оптического канала для ввода и вывода оптического излучения из кюветы было выбрано оптическое волокно Ceram Optec WF 200 с диаметром сердцевины, равным 200 мкм (ранее использовалось волокно с диаметром сердцевины 1 мм), и числовой апертурой – 0,22. Данное волокно имеет кварц-кварцевую структуру, что позволяет использовать его при низких температурах и в агрессивных средах. Волокно крепится к кювете с помощью пайки через промежуточный носитель. Для приема и передачи оптического излучения на свободных концах волокон закреплены и отъюстированы фотоприёмник марки BPW85B и источник оптического излучения марки BL-L314IRBC. Вводимое в волокно оптическое излучение ИК-диапазона длиной волны 880 нм обеспечивает слабое влияния цвета контролируемой жидкости на уровень оптического сигнала. При этом чувствительность оптического датчика к рассеивающему действию кристаллов парафинов и парафиноподобных веществ сохраняется.

Электронная часть датчика температуры кюветы.

Датчик температуры кюветы (ДТК) должен измерить и усилить электрический сигнала с термопары кюветы. ДТК как и датчик температуры зонда ВВД выполнен в виде спая из медного и константанового изолированных проводников диаметром 0,24 мм. Измерительный спай термопары размещен в глухом цилиндрическом канале диаметром 1 мм, сделанном в дне кюветы. Опорный спай термопары кюветы размещен внутри внешнего термостата кюветы при температуре около 50°С. В термостате кюветы, также размещен предварительный усилитель сигнала термопары кюветы, аналогичный усилителю, описанному в приложении А, с коэффициентом усиления 207. Диапазон измерения температуры кюветы соответствует диапазону измерения температуры зонда ВВД. Диапазон выходного напряжения усилителя в зависимости от температуры кюветы будет в пределах от 0,9 В до минус 0,2 В.

В качестве датчика температуры аккумулятора холода используется термопара из медного и константанового проводников диаметром 0,24 мм аналогично ДТК. Усилитель сигнала термопары аккумулятора холода и усилитель сигнала термопары кюветы расположены на одной плате, что позволяет использовать один термостат для ДТК и термопары аккумулятора холода.

На выходе ДТК будет формироваться два сигнала с идентичных датчиков температур кюветы и аккумулятора холода с диапазоном напряжений от 0,9 В до минус 0,2 В. Для работы схемы на вход ДТК необходимо подать напряжение питания схем управления и усиления ±9 В (≈±250 мА);

Внешний вид платы датчиков температуры представлен на рисунке Г.2



Рисунок Г.2 – Внешний вид платы датчиков температуры с установленными элементами, теплоизоляционный слой снят, плата установлена

Приложение Д Плата объединительная

Объединительная плата выполняет функцию коммутационной платы. На данной плате расположены следующие разъемы:

– ответные разъемы платы формирования питания, микроконтроллерной платы, оптического модуля, платы сбора данных (стандарта DIN);

- разъем подключения ВВД и кюветной платы (стандарта IDC);

- разъемы подключения первой и второй ступени (стандарта Mini-Fiat);

– разъем подключения мощного операционного усилителя для второй ступени охлаждения (стандарта Mini-Fiat);

– разъемы подключения позиционера, помпы, вентиляторов, клапанов, кнопки вкл/выкл;

- разъем питания +12B.

На объединительной плате реализованы каскады, отвечающие за формирование возбуждающего сигнала ВВД (рисунок Д.1). На рисунке Д.2



Рисунок Д.1 – Схема возбуждения колебаний вибровискозиметрического датчика представлена электрическая принципиальная схема объединительной платы.

Катушка возбуждения ВВД запитана током формы меандр с постоянной составляющей. Ток возбуждения ВВД формируется управляемым генератором тока на ОУ (D10). Подстройка постоянной составляющей (10 мА) осуществляется с помощью подстрочного резистора R13. Управляющее напряжение формы

меандр формируется на аналоговом ключе D8 и подается через инвертирующий усилитель на вход источника тока.



Аналоговый ключ переключается между опорным сигналом и аналоговой землей. Опорный сигнал задается подстроечным резистором R9 (подстраивается ток возбуждения амплитудой ≈3 мА, зависит от ВВД) или ЦАП (D5) управляемым от микроконтроллера (зависит от модификации АПК и функциональным исполнением).

Управление ключом D8 осуществляется с помощью компаратора D6 через буферное устройство D7. Выбор сигнала для компаратора D6 осуществляется с помощью ключа D4, между выводами 2 и 8, с управлением от микроконтроллера (шина 40). Сигналы на вход 2 и 8 приходят от фазосдвигающего каскада (плата сбора данных) и от ШИМ микроконтроллера (плата микроконтроллера). Выбор сигнала ШИМ или с фазосдвигающего каскада определяет способ возбуждение ВВД (От внешнего генератора или самовозбуждение).

Приложение Е

Схема электрическая принципиальная измерения сигналов от оптического датчика, вибродатчика и термодатчиков кюветы и зонда (плата сбора данных)

Плата сбора данных предназначена для:

- усиления, фильтрации и оцифровки сигналов от всех датчиков.
- формирования сигнала ошибки, управляющего мощным операционным усилителем системы охлаждения;
- обеспечения положительной обратной связи для самовозбуждения ВВД.

Для повышения быстродействия и точности совместных измерений параметров колебаний ВВД, температуры кюветы и зонда ВВД, сигнала от оптического модуля предложено использовать способ синхронизации моментов выборок АЦП с фазой выходного сигнала ВВД. Возможность реализации этого способа связана с тем, что сигнал на выходе ВВД является гармоническим и частоту этого сигнала можно считать неизменной в течение нескольких периодов.

Для измерения периода колебаний ВВД используется счетчик-таймер (TC) микроконтроллера. На его вход поступают прямоугольные импульсы с выхода компаратора. Фронты данных импульсов соответствуют моментам перехода сигнала ВВД через нулевой уровень (период колебаний ВВД). Одновременно с измерением периода эти импульсы позволяют осуществить привязку моментов выборок сигналов датчиков к нулевой фазе колебаний зонда ВВД.

Цифровой код с выхода АЦП передается на вход микроконтроллера в виде последовательного кода. Каждая выборка сигнала представляет собой кадр из 20 бит. Из них четыре первых стартовых бита всегда нули, а далее 16 бит кода выборки сигнала, начиная со старшего разряда.

Опорное напряжение АЦП – 3 В, т. е. все сигналы, поступающие на его вход, через аналоговый ключ, должен быть в пределах от 0 до 3 В. Таким образом, некоторые сигналы датчиков необходимо дополнительно усилить.

Выходной сигнал колебаний зонда ВВД может иметь максимальную амплитуду 1,0 В. Для усиления сигнала в схеме предусмотрен неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления 3. Выходной сигнал усилителя проходит

через активный фильтр нижних частот (4-го порядка) и поступает на вход двухполупериодного измерительного выпрямителя, фазосдвигающий каскад, а также на плату микроконтроллера для измерения периода колебаний ВВД. Выпрямленный сигнал поступает на один из входов аналогового ключа. Сигнал с фазосдвигающего каскада, с возможностью подстройки фазы от 0 до 90°, поступает на блок возбуждения, для обеспечения положительной обратной связи. Блок возбуждения располагается на объединительной плате (Приложение Д).

Сигналы от датчиков температуры после предварительного усиления имеют диапазон напряжений от плюс 0,9 В до минус 0,2 В. Для сдвига шкалы и усиления сигнала введен дополнительный каскад инвертирующего усилителя (рисунок Е.1). На инвертирующий вход операционного усилителя подается дополнительное напряжение сдвига (минус 5 В), сформированное из опорного напряжения АЦП. Выходные сигналы термопарных датчиков после слвига И vсиления (нормирования) лежат в пределах от 0 до 3 В в соответствии с измеряемыми температурами. Нормированные сигналы от датчиков температуры проходят через активные фильтры нижних частот без усиления и поступают на входы аналогового ключа.

Кроме того нормированный сигнал температуры кюветы поступает на вход устройства сравнения. Устройство сравнения вырабатывает сигнал ошибки, пропорциональный разности сигналов опорного и нормированного сигнала от ошибки датчика температуры кюветы. Сигнал подается мощный на операционный усилитель ДЛЯ управления второй ступенью охлаждения (Приложение В). Опорный сигнал для сравнения вырабатывается на плате микроконтроллерной и соответствует устанавливаемой температуре (напряжение от 0 до 3 В).



Рисунок Е.1 - Схема сдвига и усиления сигнала с датчика температуры

На выходе оптического модуля сигнал, пропорциональный интенсивности прошедшего через пробу оптического излучения, лежит в диапазоне от 0 до 3 В (для дальнейшего расширения функциональных возможностей предусмотрены сразу три оптических канала). Данный сигнал, пройдя через активный фильтр нижних частот, поступает на вход аналогового ключа.

На выходе платы сбора данных имеем следующие сигналы:

- сигнал ошибки, для управления системой охлаждения второй ступени;
- сигнал с фазосдвигающего каскада, для блока возбуждения ВВД;
- сигнал для измерения периода колебаний ВВД и управления АЦП
- цифровой сигнал с АЦП.

Для корректной работы АЦП и управления аналоговым ключом необходимо:

- для АЦП подавать сигнал о выборке;
- для АЦП подавать тактовые импульсы;
- для аналогового ключа подавать цифровой код, соответствующий опрашиваемому каналу.

Для управления температурой кюветы необходимо иметь опорный сигнал, соответствующий требуемой температуре, в диапазоне напряжений от 0 до 3 В. Так же для всей схемы необходимо напряжение питания ±9 В (≈±100 мА).

Полная электрическая принципиальная схема платы сбора данных представлена на рисунке Е.2.

Внешний вид собранной платы сбора данных представлен на рисунке Е.3.



Рисунок Е.2 - Схема электрическая принципиальная платы сбора данных



а) вид спереди, б) вид сзади.
 Рисунок Е.3 - Внешний вид платы сбора данных с установленными элементами

Приложение Ж Результаты испытаний аппаратно программного комплекса

Таблица Ж.	1 – Результаты ис	спытан	ий АПК на образцах различных	топлив.
	9	ния	Температура застывания полученная на	рта

витекника истор обн сте ево ородо го сте ево со сте ина го сте сте ина обн сте ево сте ина обн сте ина обн сте ина обн сте ина обн сте ина обн сте ин		lõbi	вания °C	Температура застывания полученная на АПК				дарта
Tesoro Hawaii -54,9 -54,6 -54,3 -54,47 0,43 Petrobras - -49,7 -51,3 -51,3 -51,3 -51,3 -51,3 -1,60 US Army Tarec Propulsion Lab -52,7 -53,8 -54,1 -54,6 -54,17 -1,47 Marathon MPC 627 -48,9 -48,1 -49 -49,1 -48,73 0,17 Webber Tanks, Inc. USA, Maine, Bucksport -51,1 -52,2 -52,3 -52,4 -52,00 -2,00 Marathon Louisville -46,1 -48,7 -48 -48,1 -48,27 -2,17 Tesoro Hawaii -40,6 -41,9 -42,8 -41,8 -42,17 -1,57 Conco Phillips Cherokee -55,3 -56,8 -56,9 -56,9 -56,9 -51,0 -1,57 Conco Phillips Cherokee -55,3 -56,8 -50,5 -51,2 -51,4 -51,4 -54,7 -51,8 -52,10 -1,10	Организация потребимтель	Место отбора про	Температура засты согласно ASTM,	Температура застывания. Испытание №1, °С	Температура застывания. Испытание №2, °С	Температура застывания. Испытание №3, °С	Среднее значение по трем испытаним, °C	Отклонение от стан, АSTM, °C
Petrobras - -49,7 -51,3 -51,3 -51,3 -51,3 -51,3 -1,60 US Army Tarec Propulsion Lab -52,7 -53,8 -54,1 -54,6 -54,17 -1,47 Marathon MPC 627 -48,9 -48,1 -49 -49,1 -48,73 0,17 Webber Tanks, Inc. USA, Maine, Bucksport -51,1 -52,2 -52,3 -52,4 -52,30 -1,20 Exxon Mobil Paulsboro -54,6 -55,5 -55,7 -55,27 -2,17 Exxon Mobil - - -58,0 -54,6 -55,5 -55,7 -55,27 2,73 Tesoro Hawaii -40,7 -54,7 -54,9 -56,8 -1,57 Tesoro Hawaii -52,7 -54,7 -55,6 -56,8 -1,57 Tesoro Hawaii -51,0 -52,4 -52,1 -51,8 -2,10 Valero - -64,0 -63,6 -62,5 -52,8 -52,10 -1,10 <	Tesoro	Hawaii	-54,9	-54,6	-54,5	-54,3	-54,47	0,43
US Army Tarec Propulsion Lab -52,7 -53,8 -54,1 -54,6 -54,17 -1,47 Marathon MPC 627 -48,9 -48,1 -49 -49,1 -48,73 0,17 Webber Tanks, Inc. USA, Maine, Bucksport -51,1 -52,2 -52,3 -52,4 -52,30 -1,20 Exxon Mobil Paulsboro -54,0 -56,3 -56 -55,7 -56,00 -2,00 Marathon Louisville -46,1 -48,7 -48 -48,11 -48,27 -2,17 Exxon Mobil - - -56,0 -55,7 -56,97 -76,78 -7,77 Concor Phillips Cherokee -55,3 -56,8 -2,10 -1,157 Tesoro Hawaii -52,7 -54,7 -54,7 -54,7 -54,7 -54,80 -2,10 Valero - - -64,0 -63,6 -62,5 -62,6 -62,90 1,10 Marersk DFSP Point LOMA -51,0 -51,7 -51,8	Petrobras	-	-49,7	-51,3	-51,3	-51,3	-51,30	-1,60
Marathon MPC 627 -48.9 -48.1 -49 -49.1 -48.73 0.17 Webber Tanks, Inc. USA, Maine, Bucksport -51.1 -52.2 -52.3 -52.4 -52.30 -1.20 Exxon Mobil Paulsboro -54.0 -56.3 -56 -55.7 -56.00 -2.00 Marathon Louisville -46.1 -48.7 -48 -48.1 -48.27 -2.17 Exxon Mobil - -58.0 -55.5 -55.7 -55.7 -55.27 2.73 Tesoro Hawaii -62.7 -54.7 -55.4 -62.90 -1.57 Tesoro Hawaii -52.7 -54.7 -55.4 62.90 1.10 Maersk DFSP Point LOMA -51.0 -52.4 -52.1 -51.8 -52.10 -1.10 BP Indiana -45.6 -48.3 -50.5 -50.3 -49.70 -4.10 Conco Phillips Sweeny Complex -57.3 -55.2 -54.9 -54.4 -54.17	US Army	Tarec Propulsion Lab	-52,7	-53,8	-54,1	-54,6	-54,17	-1,47
Webber Tanks, Inc. USA, Maine, Bucksport -51,1 -52,2 -52,3 -52,4 -52,30 -1,20 Exxon Mobil Paulsboro -54,0 -56,3 -56 -55,7 -56,00 -2,00 Marathon Louisville -46,1 -48,7 -48 -44,8 -44,1 -44,2,8 -41,8 -42,17 -1,57 Concoc Phillips Cherokee -55,3 -56,8 -56,9 -56,9 -56,9 -56,9 -56,9 -56,9 -56,9 -56,9 -1,57 Concoc Phillips Cherokee -55,3 -56,8 -56,9 -56,9 -56,9 -1,157 Concoc Phillips Cherokee -55,10 -52,7 -54,7 -55 -54,80 -2,10 Valero - -64,0 -63,6 -62,5 -62,6 -62,90 1,10 Maersk DFSP Point LOMA -51,0 -51,7 -51,2 -51,1 -51,6 -56,1,7 -52,0 -52,3 -52,3 -52,3 -52,1 -51,6 <	Marathon	MPC 627	-48,9	-48,1	-49	-49,1	-48,73	0,17
Exxon Mobil Paulsboro -54,0 -56,3 -56 -55,7 -56,00 -2,00 Marathon Louisville -46,1 -48,7 -48 -48,1 -48,27 -2,17 Exxon Mobil - - -55,0 -55,7 -55,27 2,73 Tesoro Hawaii -40,6 -41,9 -42,8 -41,8 -42,17 -1,57 Tesoro Hawaii -52,7 -56,9 -56,9 -56,9 -56,9 2,10 Valero - -64,0 -63,6 -62,5 -62,6 -62,90 1,10 Maersk DFSP Point LOMA -51,0 -52,1 -51,8 -51,10 -1,10 Webber Tanks Inc. USA, Maine, Bucksport -51,2 -54,1 -54 -54,4 -54,1 -54,0 -61,10 -52,2 -51,2 -51,60 1,10 Conoco Phillips Sweeny Complex -57,3 -55,2 -54,9 -54,0 -52,00 2,30 Total Petrochemicals Port Arthur Ref	Webber Tanks, Inc.	USA, Maine, Bucksport	-51,1	-52,2	-52,3	-52,4	-52,30	-1,20
Marathon Louisville -46,1 -48,7 -48 -48,1 -48,27 -2,17 Exxon Mobil - - -58,0 -54,6 -55,5 -55,7 -55,27 2,73 Tesoro Hawaii -40,6 -41,9 -42,8 -41,8 -42,17 -1,57 Conoco Phillips Cherokee -55,3 -56,8 -56,9 -56,9 -56,87 -1,57 Tesoro Hawaii -52,7 -54,7 -55 -54,80 -2,10 Valero - -64,0 -63,6 -62,5 -62,6 -62,90 1,10 Marsk DFSP Point LOMA -51,0 -52,4 -52,1 -51,8 -52,10 -1,10 Webber Tanks Inc. USA, Maine, Bucksport -51,2 -51,7 -51,2 -51,60 -1,10 Conoco Phillips Sweeny Complex -57,3 -55,2 -54,9 -54,9 -55,00 2,30 Total Petrochemicals Port Arthur Refinery -47,0 -47 -46,6	Exxon Mobil	Paulsboro	-54,0	-56,3	-56	-55,7	-56,00	-2,00
Exxon Mobil - -58,0 -54,6 -55,5 -55,7 -55,27 2,73 Tesoro Hawaii -40,6 -41,9 -42,8 -41,8 -42,17 -1,57 Conoco Phillips Cherokee -55,3 -56,8 -56,9 -56,87 -1,57 Tesoro Hawaii -52,7 -54,7 -54,7 -55 -54,80 -2,10 Valero - -64,0 -63,6 -62,5 -62,6 -62,90 1,10 Maersk DFSP Point LOMA -51,0 -52,4 -52,1 -51,8 -52,10 -4,10 Webber Tanks Inc. USA, Maine, Bucksport -51,2 -54,1 -54,4 -54,9 -51,70 -51,2 -51,7 -51,2 -51,4 -54,9 -55,00 2,30 Total Petrochemicals Port Arthur Refinery -47,0 -47 -46,6 -46,5 -46,70 0,30 BP Australia -52,0 -52,3 -52,4 -56,3 -56 -55,90 -0,70	Marathon	Louisville	-46,1	-48,7	-48	-48,1	-48,27	-2,17
Tesoro Hawaii -40,6 -41,9 -42,8 -41,8 -42,17 -1,57 Conoco Phillips Cherokee -55,3 -56,8 -56,9 -56,9 -56,87 -1,57 Tesoro Hawaii -52,7 -54,7 -54,7 -55 -54,80 -2,10 Walero - -64,0 -63,6 -62,5 -62,6 -62,90 1,10 Maersk DFSP Point LOMA -51,0 -52,4 -52,1 -51,8 -52,10 -4,10 BP Indiana -45,6 -48,3 -50,5 -50,3 -49,70 -4,10 Webber Tanks Inc. USA, Maine, Bucksport -51,2 -54,1 -54 -54,4 -54,0 -51,0 -2,97 Colonial Pipeline Confidential -50,5 -51,2 -51,2 -51,0 -51,0 -51,2 -51,0 -30,30 JV Australia -52,0 -52,3 -52,3 -52,3 -52,4 -52,33 -03,3 -0,70 Exxon	Exxon Mobil	-	-58,0	-54,6	-55,5	-55,7	-55,27	2,73
Conoco PhillipsCherokee-55,3-56,8-56,9-56,9-56,87-1,57TesoroHawaii-52,7-54,7-54,7-55-54,80-2,10Valero64,0-63,6-62,5-62,6-62,901,10MaerskDFSP Point LOMA-51,0-52,4-52,1-51,8-52,10-1,10BPIndiana-45,6-48,3-50,5-50,3-49,70-4,10Webber Tanks Inc.USA, Maine, Bucksport-51,2-54,1-54-54,4-54,17-2,97Colonial PipelineConfidential-50,5-51,9-51,7-51,2-54,9-55,002,30Total PetrochemicalsPort Arthur Refinery-47,0-47-46,6-46,5-46,700,30BPAustralia-52,0-52,3-52,3-52,4-52,33-0,73ValeroTexas City-47,7-53,8-54,9-54,1-54,27-6,57Exxon MobilPaulsboro-43,2-44-44-43,8-43,93-0,73ValeroTexas City-47,7-53,8-51,5-51,2-51,50-0,80United States NavyQuam-51,0-50,1-50,68-53,70-2,40Flint HillsCorpus Christi TX-41,7-46,4-46,7-46,5-46,53-4,83DESCUSA,Dover,AFB-49,1-50,8-51-51-50,93-1,83Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53	Tesoro	Hawaii	-40,6	-41.9	-42.8	-41.8	-42,17	-1.57
Tesoro Hawaii -52,7 -54,7 -54,7 -55 -54,80 -2,10 Valero - -64,0 -63,6 -62,5 -62,6 -62,90 1,10 Maersk DFSP Point LOMA -51,0 -52,4 -52,1 -51,8 -52,10 -1,10 BP Indiana -45,6 -48,3 -50,5 -50,3 -49,70 -4,10 Webber Tanks Inc. USA, Maine, Bucksport -51,2 -54,1 -54 -54,4 -54,17 -2,97 Colonial Pipeline Confidential -50,5 -51,2 -54,9 -54,9 -55,00 2,30 Total Petrochemicals Port Arthur Refinery -47,0 -46,6 -46,5 -46,70 0,30 US Army Valero -55,2 -55,4 -56,3 -56 -55,90 -0,70 Exxon Mobil Paulsboro -43,2 -44 -44,8 -43,93 -0,73 Valero Texas City -47,7 -53,8 -51,5 -51,2	Conoco Phillips	Cherokee	-55.3	-56.8	-56.9	-56.9	-56.87	-1.57
Valero - -64,0 -63,6 -62,5 -62,6 -62,00 1,10 Maersk DFSP Point LOMA -51,0 -52,4 -52,1 -51,8 -52,10 -1,10 BP Indiana -45,6 -48,3 -50,5 -50,3 -49,70 -4,10 Webber Tanks Inc. USA, Maine, Bucksport -51,2 -54,1 -54 -54,4 -54,17 -2,97 Colonial Pipeline Confidential -50,5 -51,9 -51,7 -51,2 -51,60 -1,10 Conoco Phillips Sweeny Complex -57,3 -55,2 -54,9 -55,00 2,30 Total Petrochemicals Port Arthur Refinery -47,0 -47 -46,6 -46,5 -46,70 0,33 US Army Valero -55,2 -55,4 -56,3 -56 -55,90 -0,70 Exxon Mobil Paulsboro -43,2 -44 -44 -43,8 -43,93 -0,73 Valero Texas City -47,7 -53,8 -51,5 <td>Tesoro</td> <td>Hawaii</td> <td>-52.7</td> <td>-54.7</td> <td>-54.7</td> <td>-55</td> <td>-54,80</td> <td>-2.10</td>	Tesoro	Hawaii	-52.7	-54.7	-54.7	-55	-54,80	-2.10
MaerskDFSP Point LOMA-51/0-52/1-51/2-52/1-51/8-52/10-1,10BPIndiana-45,6-48,3-50,5-50,3-49,70-4,10Webber Tanks Inc.USA, Maine, Bucksport-51,2-54,1-54-54,4-54,17-2,97Colonial PipelineConfidential-50,5-51,9-51,7-51,2-54,9-55,002,30Total PetrochemicalsPort Arthur Refinery-47,0-47-46,6-46,5-46,700,30BPAustralia-52,0-52,3-52,3-52,4-52,33-0,73US ArmyValero-55,2-55,4-56,3-56-55,90-0,70Exxon MobilPaulsboro-43,2-44-44,8-43,8-43,93-0,73ValeroTexas City-47,7-53,8-51,5-51,2-51,50-0,80United States NavyQuam-51,0-50,1-50-50,8-50,300,70ValeroBill Greeney Rfg-51,3-53,8-53,7-53,6-53,70-2,40Flint HillsCorpus Christi TX-41,7-46,4-46,5-46,53-4,83DESCUSA,Dover,AFB-49,1-50,8-51,7-55,5-55,60-1,80ChevronUnknown Refinery-43,4-43,3-43,3-43,3-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,7-52,5Conoco PhillipsBorger Texas <td< td=""><td>Valero</td><td>-</td><td>-64.0</td><td>-63.6</td><td>-62.5</td><td>-62.6</td><td>-62.90</td><td>1.10</td></td<>	Valero	-	-64.0	-63.6	-62.5	-62.6	-62.90	1.10
BP Indiana -45,6 -48,3 -50,5 -50,3 -49,70 -4,10 Webber Tanks Inc. USA, Maine, Bucksport -51,2 -54,1 -54 -54,4 -54,17 -2,97 Colonial Pipeline Confidential -50,5 -51,9 -51,7 -51,2 -54,4 -54,17 -2,97 Concoc Phillips Sweeny Complex -57,3 -55,2 -54,9 -55,00 2,30 Total Petrochemicals Port Arthur Refinery -47,0 -47 -46,6 -46,5 -46,70 0,30 BP Australia -52,0 -52,3 -52,4 -52,33 -0,73 Valero -55,2 -55,4 -56,3 -56 -55,90 -0,70 Exxon Mobil Paulsboro -43,2 -44 -44 -43,8 -43,93 -0,73 Valero Texas City -47,7 -53,8 -51,5 -51,2 -51,50 -0,80 United States Navy Quam -51,0 -50,1 -50 -50,8<	Maersk	DFSP Point LOMA	-51.0	-52.4	-52.1	-51.8	-52.10	-1.10
Webber Tanks Inc. USA, Maine, Bucksport -51,2 -54,1 -54 -54,4 -54,17 -2,97 Colonial Pipeline Confidential -50,5 -51,9 -51,7 -51,2 -51,60 -1,10 Conco Phillips Sweeny Complex -57,3 -55,2 -54,9 -54,9 -55,00 2,30 Total Petrochemicals Port Arthur Refinery -47,0 -47 -46,6 -46,5 -46,70 0,30 BP Australia -52,0 -52,3 -52,3 -52,4 -56,3 -56 -55,90 -0,70 Exxon Mobil Paulsboro -43,2 -44 -44 -43,8 -43,93 -0,73 Valero Texas City -47,7 -53,8 -54,9 -54,1 -54,27 -6,57 Exxon Mobil Baytown -50,7 -51,8 -51,5 -51,2 -51,00 -60,80 United States Navy Quam -51,0 -50,8 -51,7 -53,6 -53,70 -2,40 Flint Hills	BP	Indiana	-45.6	-48.3	-50.5	-50.3	-49,70	-4.10
Colonial Pipeline Confidential -50,5 -51,9 -51,7 -51,2 -51,60 -1,10 Conoco Phillips Sweeny Complex -57,3 -55,2 -54,9 -54,9 -55,00 2,30 Total Petrochemicals Port Arthur Refinery -47,0 -47 -46,6 -46,5 -46,70 0,33 BP Australia -52,0 -52,3 -52,3 -52,4 -52,33 -0,33 US Army Valero -55,2 -55,4 -56,3 -56 -55,90 -0,70 Exxon Mobil Paulsboro -43,2 -44 -44 -43,8 -43,93 -0,73 Valero Texas City -47,7 -53,8 -54,9 -54,1 -54,27 -6,57 Exxon Mobil Baytown -50,7 -51,8 -51,5 -51,2 -51,50 -0,80 United States Navy Quam -51,0 -50,1 -50 -50,8 -53,70 -2,40 Flint Hills Corpus Christi TX -41,7 -46	Webber Tanks Inc.	USA, Maine, Bucksport	-51.2	-54.1	-54	-54,4	-54.17	-2.97
Conoco PhillipsSweeny Complex-57,3-55,2-54,9-55,002,30Total PetrochemicalsPort Arthur Refinery-47,0-47-46,6-46,5-46,700,30BPAustralia-52,0-52,3-52,3-52,4-52,33-0,33US ArmyValero-55,2-55,4-56,3-56-55,90-0,70Exxon MobilPaulsboro-43,2-44-44-43,8-43,93-0,73ValeroTexas City-47,7-53,8-54,9-54,1-54,27-6,57Exxon MobilBaytown-50,7-51,8-51,5-51,2-51,50-0,80United States NavyQuam-51,0-50,1-50-50,8-50,300,70ValeroBill Greeney Rfg-51,3-53,8-53,7-53,6-53,70-2,40Flint HillsCorpus Christi TX-41,7-46,4-46,7-46,5-46,53-4,83DESCUSA, Dover, AFB-49,1-50,8-51-51-50,93-1,83Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53,8-55,6-55,7-55,5-55,60-1,80ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-46,5-46,57-45,77-45,97-3,17Wright Patterson AFBHet данных-42,8-46,5-45,7-45,7-45,97-3,17Wright Patterson AFB	Colonial Pipeline	Confidential	-50.5	-51.9	-51.7	-51.2	-51.60	-1.10
Total PetrochemicalsPort Arthur Refinery-47,0-47-46,6-46,5-46,700,30BPAustralia-52,0-52,3-52,3-52,4-52,33-0,33US ArmyValero-55,2-55,4-56,3-56-55,90-0,70Exxon MobilPaulsboro-43,2-44-44-43,8-43,93-0,73ValeroTexas City-47,7-53,8-54,9-54,1-54,27-6,57Exxon MobilBaytown-50,7-51,8-51,5-51,2-51,50-0,80United States NavyQuam-51,0-50,1-50-50,8-50,300,70ValeroBill Greeney Rfg-51,3-53,8-53,7-53,6-53,70-2,40Flint HillsCorpus Christi TX-41,7-46,4-46,5-46,53-4,83DESCUSA,Dover,AFB-49,1-50,8-51-51-50,93-1,83Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53,8-55,6-55,7-55,50-1,80ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-43,4-43,3-43,3-43,33-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,73-9,23UnknownHet данных-42,8-46,5-45,7-45,7-45,97-3,17Wright Patterson AFBHet данных-42,0-52-52	Conoco Phillips	Sweeny Complex	-57.3	-55.2	-54.9	-54.9	-55.00	2.30
BPAustralia-52,0-52,3-52,4-52,3-0,33US ArmyValero-55,2-55,4-56,3-56-52,90-0,70Exxon MobilPaulsboro-43,2-44-44-43,8-43,93-0,73ValeroTexas City-47,7-53,8-54,9-54,1-54,27-6,57Exxon MobilBaytown-50,7-51,8-51,5-51,2-51,50-0,80United States NavyQuam-51,0-50,1-50-50,8-50,300,70ValeroBill Greeney Rfg-51,3-53,8-53,7-53,6-53,70-2,40Flint HillsCorpus Christi TX-41,7-46,4-46,7-46,5-46,53-4,83DESCUSA, Dover, AFB-49,1-50,8-51-51-50,93-1,83Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53,8-55,6-55,7-55,5-55,60-1,80ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-43,4-43,3-43,3-43,3-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,73-9,23UnknownHet данных-42,8-46,5-45,7-45,7-45,97-3,17Wright Patterson AFBHet данных-42,0-52,1-52,2-51,8-51,97-1,337United States NavyPearl Harbor Hawaii-50,6	Total Petrochemicals	Port Arthur Refinery	-47.0	-47	-46.6	-46.5	-46.70	0.30
US ArmyValero-55,2-56,3-56,3-56,5-57,90-0,70Exxon MobilPaulsboro-43,2-44-44-43,8-43,93-0,73ValeroTexas City-47,7-53,8-54,9-54,1-54,27-6,57Exxon MobilBaytown-50,7-51,8-51,5-51,2-51,50-0,80United States NavyQuam-51,0-50,1-50-50,8-50,300,70ValeroBill Greeney Rfg-51,3-53,8-53,7-53,6-53,70-2,40Flint HillsCorpus Christi TX-41,7-46,4-46,7-46,5-46,53-4,83DESCUSA,Dover,AFB-49,1-50,8-51-51-50,93-1,83Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53,8-55,6-55,7-55,5-55,60-1,80ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-43,4-43,3-43,3-43,33-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,73-9,23-1,23UnknownHet данных-42,8-46,5-45,7-45,7-45,97-3,17Wright Patterson AFBFlight Line-51,0-52-52,6-52,1-52,23-1,23United States NavyPearl Harbor Hawaii-50,6-52,1-52,23-1,23-1,23InspectorateHet данных-	BP	Australia	-52.0	-52.3	-52.3	-52.4	-52.33	-0.33
Exxon MobilPaulsboro-43,2-44-44-43,8-43,93-0,73ValeroTexas City-47,7-53,8-54,9-54,1-54,27-6,57Exxon MobilBaytown-50,7-51,8-51,5-51,2-51,50-0,80United States NavyQuam-51,0-50,1-50-50,8-50,300,70ValeroBill Greeney Rfg-51,3-53,8-53,7-53,6-53,70-2,40Flint HillsCorpus Christi TX-41,7-46,4-46,7-46,5-46,53-4,83DESCUSA,Dover,AFB-49,1-50,8-51-51-50,93-1,83Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53,8-55,6-55,7-55,5-55,60-1,80ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-43,4-43,3-43,3-43,33-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,73-9,23UnknownHet данных-42,8-46,5-45,7-45,97-3,17Wright Patterson AFBHet данных-42,0-52,1-52-52,6-52,1-52,23-1,23United States NavyPearl Harbor Hawaii-50,6-52,1-52-51,8-51,97-1,37InspectorateHet данных-42,0-46,4-46,5-46,5-46,47-4,47PTJF2Phase Tec	US Army	Valero	-55.2	-55.4	-56.3	-56	-55.90	-0.70
ValeroТехаs City-47,7-53,8-54,9-54,1-54,27-6,57Exxon MobilBaytown-50,7-51,8-51,5-51,2-51,50-0,80United States NavyQuam-51,0-50,1-50-50,8-50,300,70ValeroBill Greeney Rfg-51,3-53,8-53,7-53,6-53,70-2,40Flint HillsCorpus Christi TX-41,7-46,4-46,7-46,5-46,53-4,83DESCUSA, Dover, AFB-49,1-50,8-51-51-50,93-1,83Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53,8-55,6-55,7-55,5-55,60-1,80ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-43,4-43,3-43,3-43,33-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,73-9,23UnknownHet данных-42,8-46,5-45,7-45,7-45,97-3,17Wright Patterson AFBHet данных-48,0-48,9-50-49,9-49,60-1,60Wright Patterson AFBFlight Line-51,0-52-52,6-52,1-52,23-1,23United States NavyPearl Harbor Hawaii-50,6-52,1-52-51,8-51,97-1,37InspectorateHet данных-48,0-46,4-46,5-46,5-46,47-4,47PTJF2 <td>Exxon Mobil</td> <td>Paulsboro</td> <td>-43.2</td> <td>-44</td> <td>-44</td> <td>-43.8</td> <td>-43.93</td> <td>-0.73</td>	Exxon Mobil	Paulsboro	-43.2	-44	-44	-43.8	-43.93	-0.73
Exxon MobilBaytown-50,7-51,8-51,5-51,2-51,50-0,80United States NavyQuam-51,0-50,1-50-50,8-50,300,70ValeroBill Greeney Rfg-51,3-53,8-53,7-53,6-53,70-2,40Flint HillsCorpus Christi TX-41,7-46,4-46,7-46,5-46,53-4,83DESCUSA,Dover,AFB-49,1-50,8-51-51-50,93-1,83Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53,8-55,6-55,7-55,5-55,60-1,80ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-43,4-43,3-43,3-43,33-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,73-9,23UnknownHet данных-42,8-46,5-45,7-45,77-3,17Wright Patterson AFBHet данных-42,0-48,9-50-49,9-49,60-1,60Wright Patterson AFBFlight Line-51,0-52-52,6-52,1-52,23-1,23United States NavyPearl Harbor Hawaii-50,6-52,1-52-51,8-51,97-1,37InspectorateHet данных-42,0-46,4-46,5-46,5-46,47-4,47PTJF2Phase Tech-48,0-49,1-48,9-48,5-48,83-0,83	Valero	Texas City	-47.7	-53.8	-54.9	-54.1	-54.27	-6.57
United States NavyQuam-51,0-50,1-50-50,8-50,300,70ValeroBill Greeney Rfg-51,3-53,8-53,7-53,6-53,70-2,40Flint HillsCorpus Christi TX-41,7-46,4-46,7-46,5-46,53-4,83DESCUSA,Dover,AFB-49,1-50,8-51-51-50,93-1,83Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53,8-55,6-55,7-55,5-55,60-1,80ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-43,4-43,3-43,3-43,33-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,73-9,23UnknownHet данных-42,8-46,5-45,7-45,7-45,97-3,17Wright Patterson AFBHet данных-48,0-48,9-50-49,9-49,60-1,60Wright Patterson AFBFlight Line-51,0-52-52,6-52,1-52,23-1,23United States NavyPearl Harbor Hawaii-50,6-52,1-52-51,8-51,97-1,37InspectorateHet данных-42,0-46,4-46,5-46,5-46,47-4,47PTJF2Phase Tech-48,0-49,1-48,9-48,5-48,83-0,83	Exxon Mobil	Baytown	-50.7	-51.8	-51.5	-51.2	-51.50	-0.80
ValeroBill Greeney Rfg-51,3-53,8-53,7-53,6-53,70-2,40Flint HillsCorpus Christi TX-41,7-46,4-46,7-46,5-46,53-4,83DESCUSA,Dover,AFB-49,1-50,8-51-51-50,93-1,83Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53,8-55,6-55,7-55,5-55,60-1,80ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-43,4-43,3-43,3-43,33-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,73-9,23UnknownHet данных-42,8-46,5-45,7-45,7-45,97-3,17Wright Patterson AFBHet данных-48,0-48,9-50-49,9-49,60-1,60Wright Patterson AFBFlight Line-51,0-52-52,6-52,1-52,23-1,23United States NavyPearl Harbor Hawaii-50,6-52,1-52-51,8-51,97-1,37InspectorateHet данных-42,0-46,4-46,5-46,5-46,47-4,47PTJF2Phase Tech-48,0-49,1-48,9-48,5-48,83-0,83	United States Navy	Quam	-51.0	-50.1	-50	-50.8	-50.30	0.70
Flint HillsCorpus Christi TX-41,7-46,4-46,7-46,5-46,53-4,83DESCUSA,Dover,AFB-49,1-50,8-51-51-50,93-1,83Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53,8-55,6-55,7-55,5-55,60-1,80ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-43,4-43,3-43,3-43,33-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,73-9,23UnknownHet данных-42,8-46,5-45,7-45,7-45,97-3,17Wright Patterson AFBHet данных-48,0-48,9-50-49,9-49,60-1,60Wright Patterson AFBFlight Line-51,0-52-52,6-52,1-52,23-1,23United States NavyPearl Harbor Hawaii-50,6-52,1-52-51,8-51,97-1,37InspectorateHet данных-42,0-46,4-46,5-46,5-46,47-4,47PTJF2Phase Tech-48,0-49,1-48,9-48,5-48,83-0,83	Valero	Bill Greeney Rfg	-51.3	-53.8	-53.7	-53.6	-53,70	-2.40
DESCUSA, Dover, AFB-49,1-50,8-51-51-50,93-1,83Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53,8-55,6-55,7-55,5-55,60-1,80ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-43,4-43,3-43,3-43,33-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,73-9,23UnknownHET Данных-42,8-46,5-45,7-45,7-45,97-3,17Wright Patterson AFBHET Данных-48,0-48,9-50-49,9-49,60-1,60Wright Patterson AFBFlight Line-51,0-52-52,6-52,1-52,23-1,23United States NavyPearl Harbor Hawaii-50,6-52,1-52-51,8-51,97-1,37InspectorateHET Данных-42,0-46,4-46,5-46,5-46,47-4,47PTJF2Phase Tech-48,0-49,1-48,9-48,5-48,83-0,83	Flint Hills	Corpus Christi TX	-41.7	-46.4	-46.7	-46.5	-46.53	-4.83
Conoco PhillipsLos Angeles Refinery-53,8-55,6-55,7-55,5-55,60-1,80ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-43,4-43,3-43,3-43,33-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,73-9,23UnknownHET Данных-42,8-46,5-45,7-45,7-45,97-3,17Wright Patterson AFBHET Данных-48,0-48,9-50-49,9-49,60-1,60Wright Patterson AFBFlight Line-51,0-52-52,6-52,1-52,23-1,23United States NavyPearl Harbor Hawaii-50,6-52,1-52-51,8-51,97-1,37InspectorateHET Данных-42,0-46,4-46,5-46,5-46,47-4,47PTJF2Phase Tech-48,0-49,1-48,9-48,5-48,83-0,83	DESC	USA, Dover, AFB	-49.1	-50.8	-51	-51	-50.93	-1.83
ChevronUnknown Refinery-47,2-49,6-49-49,20-2,00Conoco PhillipsBorger Texas-41,7-43,4-43,3-43,3-43,33-1,63BPRotterdam-49,5-59,1-58,4-58,7-58,73-9,23UnknownHET Данных-42,8-46,5-45,7-45,7-45,97-3,17Wright Patterson AFBHET Данных-48,0-48,9-50-49,9-49,60-1,60Wright Patterson AFBFlight Line-51,0-52-52,6-52,1-52,23-1,23United States NavyPearl Harbor Hawaii-50,6-52,1-52-51,8-51,97-1,37InspectorateHET Данных-42,0-46,4-46,5-46,5-46,47-4,47PTJF2Phase Tech-48,0-49,1-48,9-48,5-48,83-0,83	Conoco Phillips	Los Angeles Refinery	-53.8	-55.6	-55.7	-55.5	-55.60	-1.80
Conoco Phillips Borger Texas -41,7 -43,4 -43,3 -43,3 -43,33 -1,63 BP Rotterdam -49,5 -59,1 -58,4 -58,7 -58,73 -9,23 Unknown Het данных -42,8 -46,5 -45,7 -45,7 -45,97 -3,17 Wright Patterson AFB Het данных -48,0 -48,9 -50 -49,9 -49,60 -1,60 Wright Patterson AFB Flight Line -51,0 -52 -52,6 -52,1 -52,23 -1,23 United States Navy Pearl Harbor Hawaii -50,6 -52,1 -52 -51,8 -51,97 -1,37 Inspectorate Het данных -42,0 -46,4 -46,5 -46,5 -46,47 -4,47 PTJF2 Phase Tech -48,0 -49,1 -48,9 -48,5 -48,83 -0.83	Chevron	Unknown Refinery	-47.2	-49.6	-49	-49	-49.20	-2.00
BP Rotterdam -49,5 -59,1 -58,4 -58,7 -58,73 -9,23 Unknown нет данных -42,8 -46,5 -45,7 -45,7 -45,97 -3,17 Wright Patterson AFB нет данных -48,0 -48,9 -50 -49,9 -49,60 -1,60 Wright Patterson AFB Flight Line -51,0 -52 -52,6 -52,1 -52,23 -1,23 United States Navy Pearl Harbor Hawaii -50,6 -52,1 -52 -51,8 -51,97 -1,37 Inspectorate нет данных -42,0 -46,4 -46,5 -46,5 -46,47 -4,47 PTJF2 Phase Tech -48,0 -49,1 -48,9 -48,5 -48,83 -0.83	Conoco Phillips	Borger Texas	-41.7	-43.4	-43.3	-43.3	-43.33	-1.63
Unknown нет данных -42,8 -46,5 -45,7 -45,7 -45,97 -3,17 Wright Patterson AFB нет данных -48,0 -48,9 -50 -49,9 -49,60 -1,60 Wright Patterson AFB Flight Line -51,0 -52 -52,6 -52,1 -52,23 -1,23 United States Navy Pearl Harbor Hawaii -50,6 -52,1 -52 -51,8 -51,97 -1,37 Inspectorate нет данных -42,0 -46,4 -46,5 -46,5 -46,47 -4,47 PTJF2 Phase Tech -48,0 -49,1 -48,9 -48,5 -48,83 -0.83	BP	Rotterdam	-49.5	-59.1	-58.4	-58.7	-58.73	-9,23
Wright Patterson AFB нет данных -48,0 -48,9 -50 -49,9 -49,60 -1,60 Wright Patterson AFB Flight Line -51,0 -52 -52,6 -52,1 -52,23 -1,23 United States Navy Pearl Harbor Hawaii -50,6 -52,1 -52 -51,8 -51,97 -1,37 Inspectorate нет данных -42,0 -46,4 -46,5 -46,5 -46,47 -4,47 PTJF2 Phase Tech -48,0 -49,1 -48,9 -48,5 -48,83 -0.83	Unknown	нет данных	-42.8	-46.5	-45.7	-45.7	-45.97	-3.17
Wright Patterson AFB Flight Line -51,0 -52 -52,6 -52,1 -52,23 -1,23 United States Navy Pearl Harbor Hawaii -50,6 -52,1 -52 -51,8 -51,97 -1,37 Inspectorate нет данных -42,0 -46,4 -46,5 -46,5 -46,47 -4,47 PTJF2 Phase Tech -48,0 -49,1 -48,9 -48,5 -48,83 -0.83	Wright Patterson AFB	нет данных	-48.0	-48.9	-50	-49.9	-49.60	-1.60
United States Navy Pearl Harbor Hawaii -50,6 -52,1 -52 -51,8 -51,97 -1,37 Inspectorate нет данных -42,0 -46,4 -46,5 -46,5 -46,47 -4,47 PTJF2 Phase Tech -48,0 -49,1 -48,9 -48,5 -48,83 -0.83	Wright Patterson AFB	Flight Line	-51.0	-52	-52.6	-52.1	-52.23	-1,23
Inspectorate нет данных -42,0 -46,4 -46,5 -46,5 -46,47 -4,47 PTJF2 Phase Tech -48,0 -49,1 -48,9 -48,5 -48,83 -0.83	United States Navy	Pearl Harbor Hawaii	-50.6	-52.1	-52	-51.8	-51.97	-1.37
PTJF2 Phase Tech -48.0 -49.1 -48.9 -48.5 -48.83 -0.83	Inspectorate	нет данных	-42.0	-46.4	-46.5	-46.5	-46.47	-4.47
	PTJF2	Phase Tech	-48,0	-49.1	-48.9	-48.5	-48,83	-0,83

Среднее значение отклонения от значений измеренных по ASTM стандарту =	-1,64 ° C
Показаний АПК	
Результатов измерения, σ =	0,32 °C
3*σ =	0,95 °C

178