

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2017

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника, опто- и наноэлектроника»
Ульяновского государственного технического университета

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Сергеев Вячеслав Андреевич
УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН,
директор

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Лачин Вячеслав Иванович
профессор кафедры «Автоматика и телемеханика»
Южно-Российского государственного
политехнического университета (НПИ) имени
М.И. Платова

доктор технических наук, доцент
Антонец Иван Васильевич
профессор кафедры «Авиационная техника»
Ульяновского института гражданской авиации имени
Главного маршала авиации Б.П. Бугаева.

Ведущая организация – АО «Ульяновское конструкторское бюро
приборостроения»

Защита диссертации состоится «27» сентября 2017 года в 15 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета Д212.277.01 при Ульяновском государственном
техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный
Венец, 32, ауд. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного
технического университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



В.И. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Датчики на основе электромеханических колебательных систем (КС) находят широкое применение в различных областях техники. Конструкции и чувствительные элементы КС таких датчиков весьма разнообразны. Большое развитие в последнее десятилетие получили пьезоэлектрические, магнитострикционные и струнные датчики, датчики с микромеханическим зондами – кантилеверами, вибровискозиметрические датчики (ВВД) и др. Параметрами, несущими информацию об измеряемой физической величине (ФВ), являются добротность Q и собственная частота ω_0 КС датчика.

В работах Мигулина В.В., Медведева В.И., Соловьева А.Н., Иориша 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 режимов работы при различных видах возбуждения.

Во многих технических приложениях датчики на основе КС применяются для контроля объектов (сред) с изменяющимися параметрами. Режим работы датчиков на основе КС, при котором параметры контролируемой среды изменяются за время порядка или меньшее времени установления равновесных колебаний принято называть нестационарным режимом. Именно в таких режимах работают ВВД на основе КС, предназначенные для измерения реологических свойств жидкостей и газов при изменении температуры. Изменение вязкости и плотности контролируемой среды при изменении температуры приводит к изменению собственной частоты и добротности КС ВВД, которое и проявляется в параметрах выходного сигнала ВВД. Применение ВВД на основе КС в таких режимах работы наталкивается на ряд технических ограничений, в частности, работа низкодобротных КС в автоколебательном режиме нестабильна, а режим свободных колебаний сложно реализуем. В условиях ограниченного времени в реальных измерительных задачах погрешность измерения параметров КС ВВД, работающих в нестационарных режимах, может быть высока. Для таких режимов работы в последние годы активно разрабатываются адаптивные датчики, способные к вариации параметров КС и режима возбуждения КС для снижения погрешностей измерения контролируемых ФВ.

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 датчиков на основе электромеханических КС с одной степенью свободы в нестационарных режимах работы.

2. Численное моделирование переходных процессов в механической 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 ВВД камертонного типа на базе Анализатора низкотемпературных свойств жидкостей «ИРЭН 2.5».

5. Экспериментальная проверка и оценка метрологических характеристик способов повышения точности ВВД камертонного типа путем управления режимом возбуждения КС.

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 путем 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 собственной частоты и добротности КС по параметрам вынужденных колебаний от скорости изменения параметров КС.

2. Разработан способ возбуждения КС ВВД при его работе в нестационарных режимах с поддержанием разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика датчика, равной 90° , путем подстройки частоты сигнала возбуждения, позволяющий по сравнению с автоколебательным режимом и режимом вынужденных колебаний на фиксированных частотах уменьшить погрешность измерения собственной частоты КС почти на порядок величины, а добротности – на 20%–60% в зависимости от значения добротности.

3. Предложен алгоритм дискретного управления перестройкой частоты генератора сигнала возбуждения КС ВВД с шагом, при котором изменение фазы сигнала отклика, вызванного перестройкой частоты генератора, не превышает уровня фазовых шумов цепей преобразования ВВД.

4. Разработан 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 90° на заданное значение путем перестройки частоты сигнала возбуждения.

Практическая значимость работы состоит в следующем.

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 электро-механических КС различных видов.

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

Способ измерения параметров КС ВВД с поддержанием разности фазы между сигналом возбуждения и выходным сигналом датчика, равной 90° , путем подстройки частоты сигнала возбуждения реализован в модифицированном варианте Анализатора низкотемпературных свойств жидкостей «ИРЭН 2.5», что позволило уменьшить погрешность и повысить повторяемость результатов измерения теплофизических характеристик жидкостей.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории колебательных процессов, теории электрических цепей, методы обработки электрических сигналов, теории погрешностей, теории случайных 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. 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.

2. Алгоритм дискретного управления перестройкой частоты генератора сигнала возбуждения КС ВВД, состоящий в сравнении отклонения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика КС от 90° с уровнем фазового шума электронных цепей ВВД и изменения частоты генератора с шагом, при котором изменение фазы сигнала отклика, вызванное перестройкой частоты генератора, не превышает уровня фазовых шумов ВВД.

3. Способ определения добротности электромеханических КС по их фазо-частотной 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, который позволяет (при заданной погрешности) в 3...5 раз сократить время определения добротности КС, что особенно актуально для датчиков с низкодобротными КС.

4. Результаты испытаний КС ВВД в режиме вынужденных колебаний с поддержанием разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика, равной 90° , на экспериментальной установке на базе Анализатора низкотемпературных свойств жидкостей «ИРЭН 2.5», подтверждающие уменьшение погрешности и расширение рабочего диапазона измерения теплофизических характеристик жидкостей, по сравнению с ранее используемыми режимами возбуждения.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XI Всероссийской молодежной научно-инновационной школе «Математика и математическое моделирование» (г. Саров, 2017), на 14–19 Всероссийских 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 научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2016 (г. Новосибирск, 2016г.), Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2015» (г. Томск, 2015 г.), 48-й научно-технической конференции «Вузовская наука в современных условиях» (г. Ульяновск, 2014г.), Молодёжной научно-технической конференции «Автоматизация процессов управления» (г. Ульяновск, 2011г.).

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанные способы и алгоритмы были использованы при создании лабораторных стендов и исследовании низкотемпературных свойств дизельных и авиационных топлив, проводимых в рамках тематического плана НИР УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Результаты работы использованы также при выполнении проекта №10258 «Разработка эффективного метода и средств обработки измерительной информации аппаратно-программного комплекса «ИРЭН 2.4» по программе У.М.Н.И.К. (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 предприятий в научно-технической сфере (контракт №11950р/21943 от 27.06.2013).

Личный вклад автора. Теоретические и экспериментальные исследования, включая апробацию разработанных способов и алгоритмов, проведены автором лично. Обсуждение и интерпретация экспериментальных результатов проводились совместно с соавторами, где вклад автора диссертационной работы был определяющим.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 работы, в том числе 8 статей в журналах из перечня ВАК, получено 3 патента РФ на изобретения, 1 патент на полезную модель.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна результатов работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены различные виды датчиков на основе электро-механических КС, описаны способы и режимы электрического возбуждения КС и способы преобразования механических колебаний в электрический сигнал, представлен анализ их работы в стационарных режимах при различных видах возбуждения, рассмотрены особенности работы датчиков в нестационарных режимах, определены цели и задачи исследования.

Анализ способов измерения добротности и собственной частоты КС показал, что способ измерения параметров КС в режиме вынужденных колебаний со сканированием по частоте имеет низкое быстродействие и неприменим в нестационарных режимах. Способы с включением КС в состав автогенератора позволяют определять параметры КС в каждом периоде колебаний, но при малых добротностях КС возможна неустойчивость и срыв автоколебаний. При работе КС в режиме вынужденных колебаний на фиксированной частоте с уменьшением добротности и изменении собственной частоты КС амплитуда колебаний и отношение сигнал/шум уменьшаются и погрешность измерения параметров КС возрастает.

Во второй главе проведен анализ математической модели КС ВВД с линейно изменяющимися параметрами в режиме вынужденных колебаний, методом численного моделирования получены зависимости погрешности определения текущих параметров КС по амплитуде и фазе выходного сигнала КС от скорости изменения её параметров.

Модель механической КС (рисунок 1) с одной степенью свободы содержит тело (зонд) массой M , подвешенный на пружине с коэффициентом упругости k и коэффициентом демпфирования h . В общем случае параметры элементов КС зависят от параметров контролируемой среды и могут изменяться во времени. В большинстве технических приложений КС ВВД выполняют таким образом, чтобы коэффициент упругости k в ходе измерения не изменялся (или изменялся по известному закону).

Для данной модели КС уравнение движения зонда вдоль оси y в режиме вынужденных колебаний будет иметь вид:

$$(M + m(t)) \frac{d^2 y}{dt^2} + h(t) \frac{dy}{dt} + ky = F(t), \quad (1)$$

где $m(t)$ – присоединенная масса, $F(t)$ – внешняя периодическая возбуждающая сила, приложенная к центру масс, которую без ограничения общности анализа будем считать изменяющейся по гармоническому закону: $F(t) = F_A \sin(\omega t)$, где F_A – амплитуда приложенной силы, ω – угловая частота.

Для данной модели численным методом были получены зависимости амплитуды y_a колебаний и разности фаз φ между возбуждающей силой и сигналом отклика КС с линейно нарастающей присоединенной массой ($m(t) = \alpha t$, где α – скорость приращения массы ($г/с$)) от значения присоединенной массы при постоянном значении коэффициента демпфирования. При построении расчетных зависимостей параметры модельной КС принимались равными параметрам КС реального ВВД, описание которого приведено далее: $M = 7,5$ мг, $h = 0,05$ Н·с/м и $k = 1,8 \cdot 10^4$ Н/м.

На рисунке 2 в качестве примера приведены зависимости амплитуды и разности фаз колебаний КС от присоединенной массы при скорости приращения массы $\alpha = 10^{-2}$ г/с и частоте силы возбуждения, соответствующей собственной частоте (248,9 Гц) КС с присоединенной массой 19 мг в стационарном режиме работы. Из графиков видно, что максимум амплитуды колебаний наблюдается при присоединенной массе 25 мг, а разность фаз 90° – при присоединенной массе 22 мг. В стационарном режиме приведенная к статическому смещению ($y_{cm} = F_A/k$) амплитуда колебаний на собственной частоте КС при присоединенной массе 19 мг составляет 239 отн. ед. По результатам моделирования в нестационарном режиме максимальная амплитуда колебаний зонда КС составила 233,9 отн. ед., а при разности фаз 90° – 233,2 отн. ед. Соответственно, коэффициент демпфирования, рассчитанный по формуле

$h = \frac{y_{cm}}{y_a} \sqrt{(M + m)k}$, по наблюдаемому максимуму амплитуды, отличается от заданного в большую сторону на $0,28 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м, а при расчете по амплитуде, соответствующей сдвигу фаз 90° – на $0,26 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м.

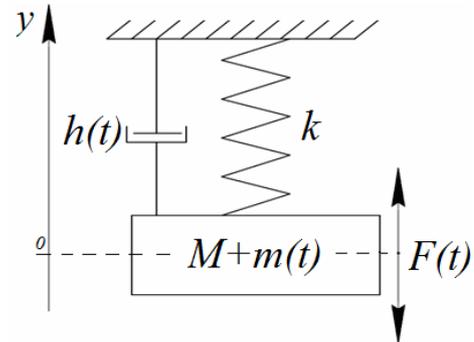


Рисунок 1 – Модель механической колебательной системы

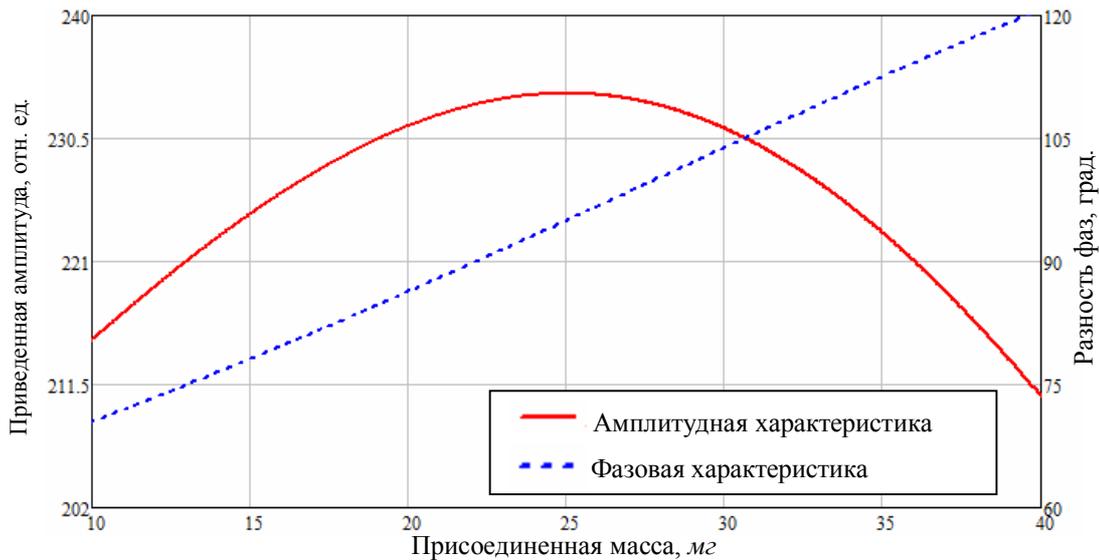


Рисунок 2 – Расчетные зависимости амплитуды и разности фаз колебаний КС от значения присоединенной массы зонда: $f = 248,9$ Гц, $M = 7,5$ г, $h = 0,05$ Н·с/м, $k = 1,8 \cdot 10^4$ Н/м, $\alpha = 10^{-2}$ г/с

Поскольку непосредственно измерить мгновенное значение изменяющейся массы механической КС не представляется возможным, для экспериментальной проверки результатов компьютерного моделирования в соответствии с принципом электромеханической аналогии были проведены измерения параметров колебаний в последовательном колебательном контуре с изменяющейся индуктивностью. Расчетные и экспериментальные зависимости амплитуды и фазы выходного сигнала колебательного контура от мгновенного значения индуктивности, линейно изменяющейся со скоростью 4.3 Гн/с, представлены на рисунке 3. Эксперимент повторялся многократно и показал хорошее соответствие расчетных и экспериментальных характеристик, как для амплитуды, так и для фазы колебаний.

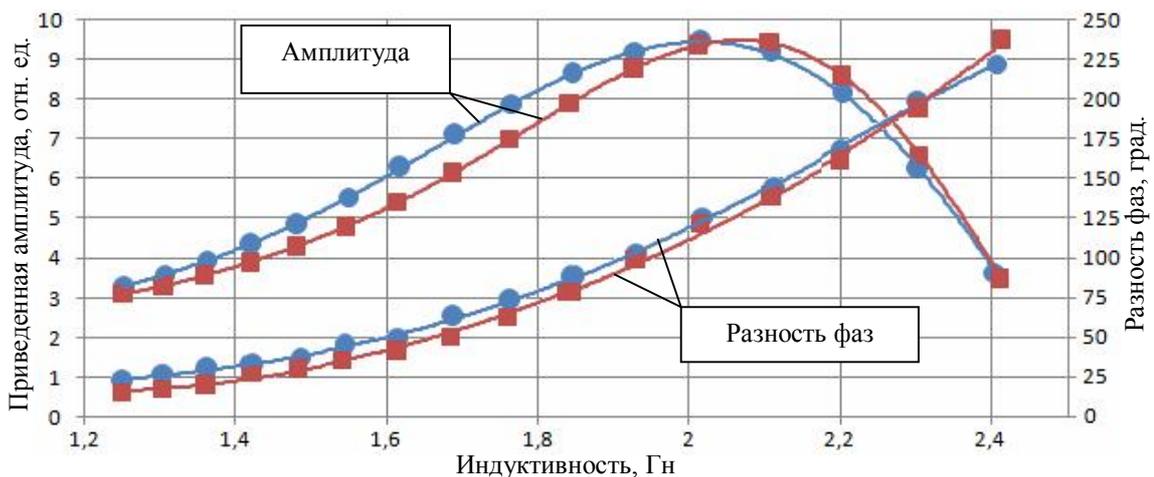


Рисунок 3 – Зависимости амплитуды и разности фаз колебаний КС от значения индуктивности: $f = 701$ Гц, $L_0 = 987$ мГн, $C = 30$ нФ, $R = 698$ Ом, $\alpha = 4,3$ Гн/с:

—●— результат численного моделирования; —■— результат эксперимента

Численное решение (1) проводилось при различных скоростях изменения присоединенной массы и частотах возбуждения, соответствующих различным значениям присоединенной массы (от 0 до 250 мг с шагом 1 мг) в стационарном режиме. Из графиков на рисунке 4 видно, что относительная погрешность опре-

деления присоединенной массы по разности фаз между возбуждающей силой и сигналом отклика равной 90° , меньше, чем по максимуму амплитуды, тогда как погрешность измерения коэффициента демпфирования по разности фаз 90° , больше, чем погрешность измерения по максимуму амплитуды.

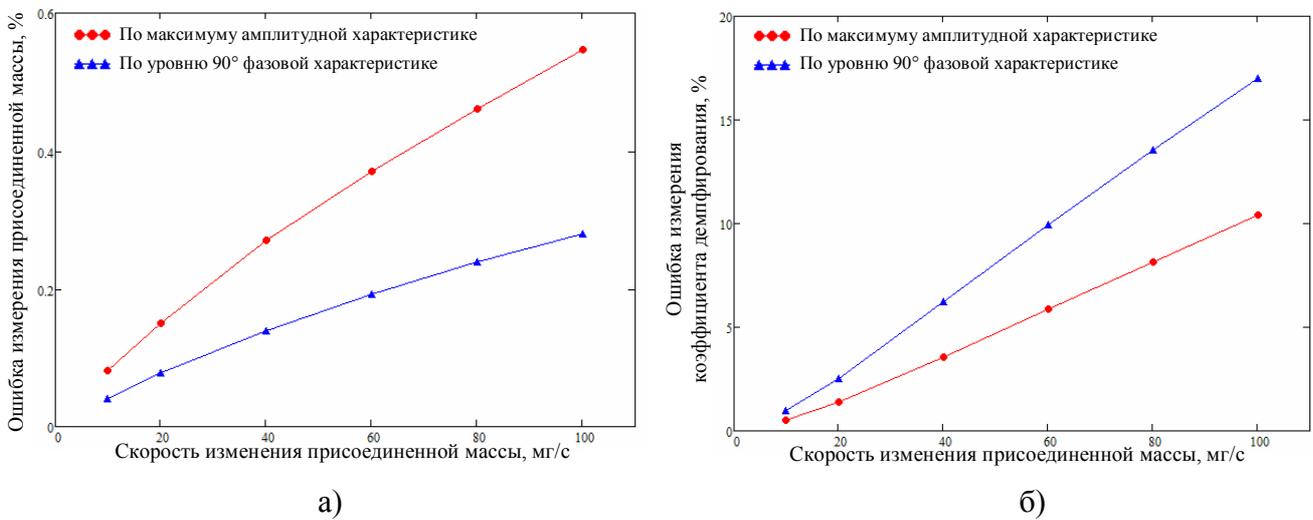


Рисунок 4 – Зависимость относительной погрешности определения присоединенной массы (а) и коэффициента демпфирования (б) КС от скорости изменения присоединенной массы при $M = 7,5$ г, $h = 0,05$ Н с/м, $k = 1,8 \cdot 10^4$ Н/м

Аналогично были рассчитаны зависимости амплитуды колебаний и разности фаз $\Delta\varphi$ между возбуждающей силой и сигналом отклика КС с линейно нарастающим коэффициентом демпфирования ($h(t) = \beta t$, β – скорость изменения коэффициента демпфирования (Н/м)) при неизменной массе зонда КС, т.е. $m(t) = 0$. Показано, что из-за инерционности КС при линейном изменении коэффициента демпфирования возникает погрешность измерения только коэффициента демпфирования (рисунок 5).

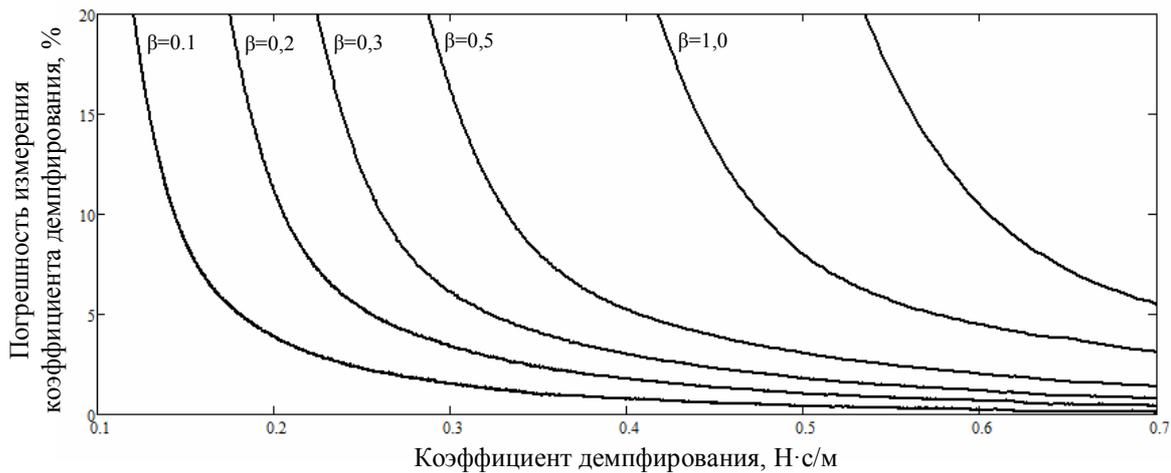


Рисунок 5 – Зависимость погрешности измерения коэффициента демпфирования от величины коэффициента демпфирования h (Н с/м) для различных скоростей изменения коэффициента демпфирования β (Н/м)

В третьей главе описан оригинальный способ управления режимом возбуждения вынужденных колебаний КС ВВД с поддержанием разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика, равной 90° путем подстройки частоты

сигнала возбуждения, позволяющий повысить точность измерения параметров КС в нестационарных режимах.

Сущность предложенного способа поясняется функциональной схемой на рисунке 6.

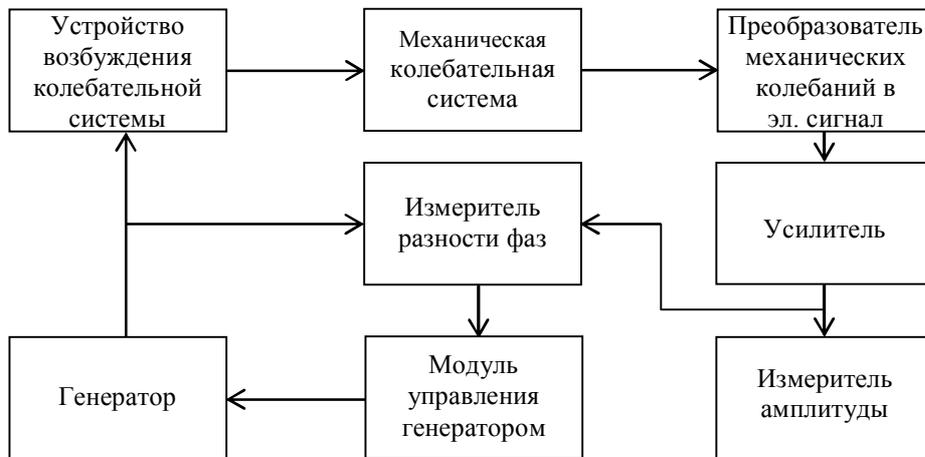


Рисунок 6 – Функциональная схема, поясняющая работу датчика на основе КС в режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз путем подстройки частоты сигнала возбуждения

На управляющий вход генератора сигнала возбуждения с цифровым управлением поступает код частоты ω , вырабатываемый модулем управления генератором, в котором сигнал с выхода измерителя разности фаз сравнивается с опорным значением разности фаз $\varphi = \varphi_0 + \varphi_T(\omega)$, записанным в памяти модуля управления генератором и учитывающим $\varphi_T(\omega)$ – фазо-частотную характеристику (ФЧХ) электронных цепей ВВД. Процесс управления заключается в последовательном изменении частоты генератора с заданным шагом $\Delta\omega$ на каждом периоде колебаний до достижения разности фаз, равной 90° .

При разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика, равной 90° , крутизна ФЧХ ВВД максимальна, а для вычисления добротности КС (при $\omega = \omega_0$) можно использовать известную формулу: $Q = y_a / y_{cm}$. Погрешность измерения добротности в этом случае будет определяться только погрешностью измерения амплитуды сигнала.

При работе датчика в предлагаемом режиме возбуждения при изменении параметров КС неизбежны отклонения разности фаз от опорного значения из-за ограниченного быстродействия системы подстройки частоты. Для определения характера переходных процессов, возникающих в КС при перестройке частоты возбуждения, экспериментально были измерены зависимости изменения разности фаз от времени для реального ВВД при перестройке генератора на искусственно увеличенный шаг при разных добротностях КС. Представленные на рисунке 7 экспериментальные зависимости можно аппроксимировать выражением:

$$\psi(t) = \arcsin\left(-2e^{-\delta t} \sin\left(\frac{\Delta\omega t - \Delta\varphi}{2}\right)\right), \quad (2)$$

где δ – коэффициент затухания колебаний КС, $\Delta\varphi$ – изменение разности фаз, вызванное изменением частоты на $\Delta\omega$, в установившемся режиме.

Указанные переходные процессы изменения фазы при перестройке частоты возбуждения в КС с изменяющимися параметрами приводят к появлению эффекта перерегулирования в виде периодических колебаний фазы (рисунок 8).

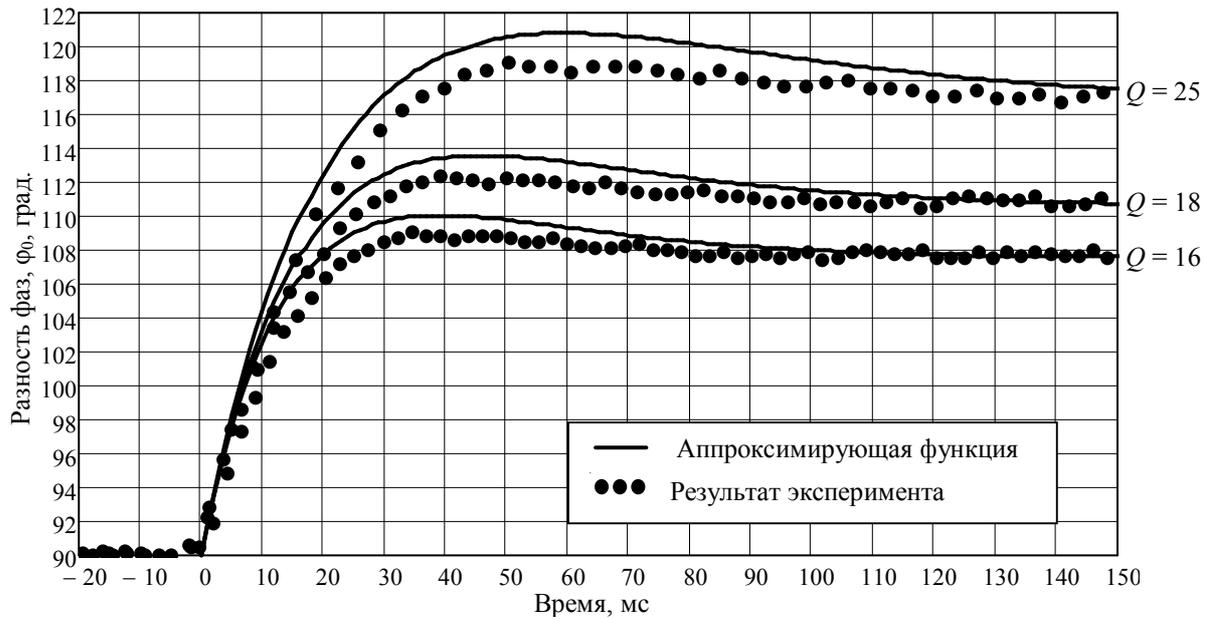


Рисунок 7 – Изменение частоты выходного сигнала генератора после перестройки с собственной частоты КС на один шаг $\Delta f = -2,75$ Гц для различных добротностей

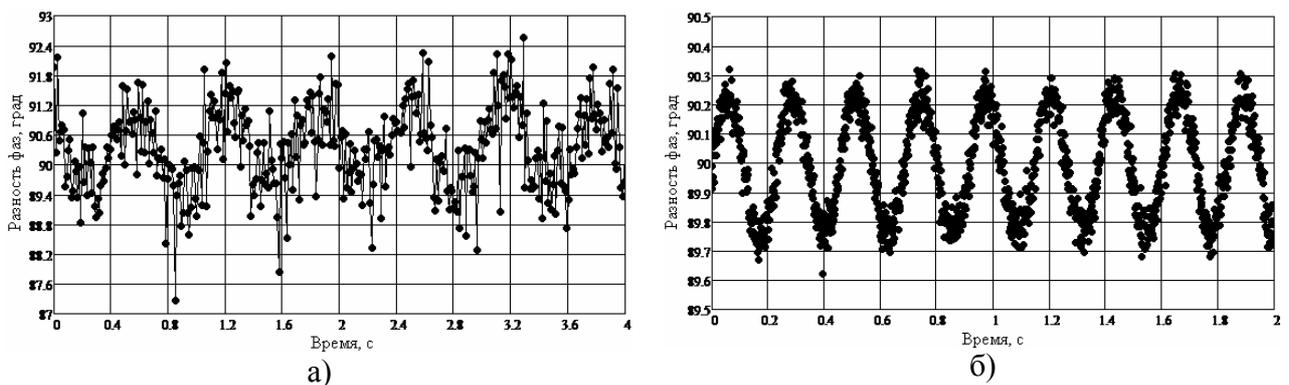


Рисунок 8 – Зависимость разности фаз сигнала ВВД в спирте от времени при линейно убывающей температуре пробы: а) для КС $Q \approx 23, f \approx 236$ Гц, $\Delta f = 0,1$ Гц; б) для КС $Q \approx 200, f \approx 600$ Гц, $\Delta f = 0,01$ Гц

На основе анализа указанных переходных процессов шаг перестройки частоты генератора $\Delta\omega$ предложено выбирать таким, чтобы изменение частоты на этот шаг приводило к изменению разности фаз $\Delta\varphi$ на величину равную фазовым шумам φ_{ψ} в измерительной системе:

$$\Delta\varphi(\Delta\omega) \approx \varphi_{\psi} . \quad (3)$$

Алгоритм управления частотой генератора сигнала возбуждения (рисунок 9) реализован в виде программного кода (подпрограммы) в модуле управления генератором и запускается в каждом периоде колебаний КС после завершения измерения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика КС. Алгоритм состоит в сравнении отклонения $\Delta\varphi$ разности фаз от 90° с уровнем фазового шума φ_{ψ} электронных цепей ВВД, записанным в память модуля управления генератором. Если это отклонение разности фаз больше уровня фазового шума, то вырабатывается сигнал в виде цифрового кода изменения частоты генератора на $\Delta\omega$, иначе программа завершает свою работу.

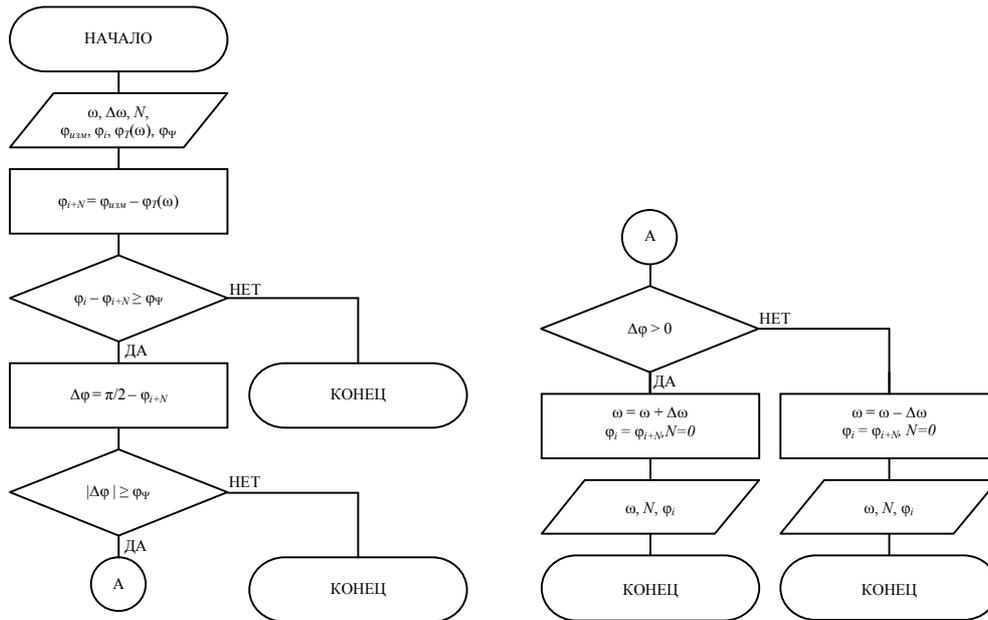


Рисунок 9 – Схема алгоритма управления частотой генератора сигнала возбуждения

В четвертой главе описан ВВД с КС камертонного типа, используемый в составе аппаратно-программного комплекса (АПК) для анализа низкотемпературных свойств жидкостей «ИРЭН 2.5». Рассмотрена структурная схема АПК и способ опроса его датчиков. Приведены оценки методической и инструментальной погрешности.

Конструкция ВВД приведена на рисунке 10. Основой ВВД является КС, в состав которой входит камертон 1 и стеклянный штوك 4 со сферическим зондом 5 на конце, прикрепленный к нижнему плечу камертона. Для измерения отклонения

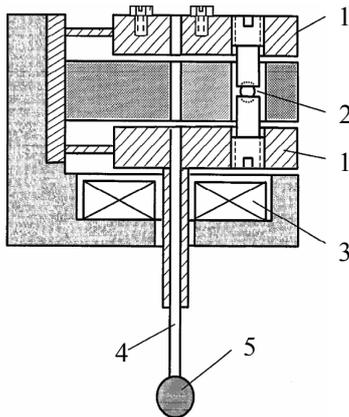


Рисунок 10 – Конструкция КС вибровискозиметрического датчика

плеч камертона от положения равновесия используется датчик положения 2 на основе оптрона с открытым оптическим каналом. Электромагнитный возбуждатель 3 создает внешнюю периодическую силу, действующую на нижнее плечо камертона, зонд 5 которого во время испытаний находится в исследуемой жидкости. Температура зонда 5 измеряется термопарой, размещенной внутри зонда и, фактически, является температурой жидкости.

Упрощенная структурная схема АПК с ВВД камертонного типа представлена на рисунке 11.

сунке 11.

Исследуемая жидкость помещается в кювету 2. Для контроля оптических свойств жидкости в кювету вмонтирован оптический датчик открытого типа. Температура жидкости в ходе испытания с помощью блока охлаждения – нагрева, изменяется по заданному (например: линейному) закону. В качестве сигнала об-

ратной связи, при регулировании температуры жидкости, используется термодатчик, установленный в кювете. Зонд ВВД 1 полностью погружается в испытываемую жидкость. Процесс измерения контролируется устройством управления, реализованном на базе микроконтроллера AT91SAM7X256.

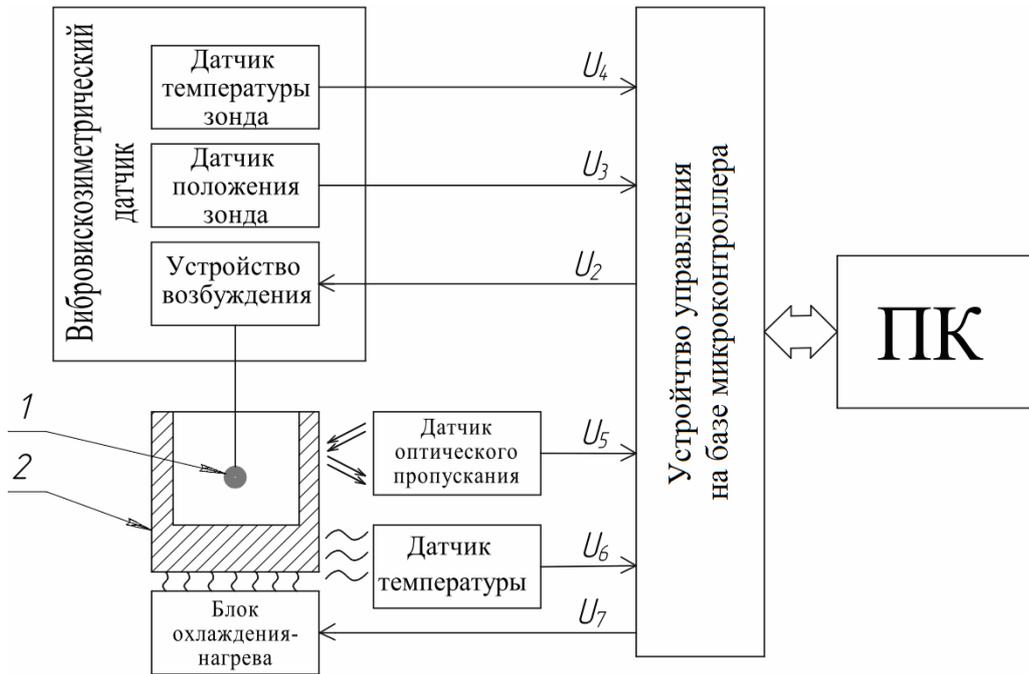


Рисунок 11 – Упрощенная структурная схема АПК

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. Сущность способа поясняет рисунок 12.

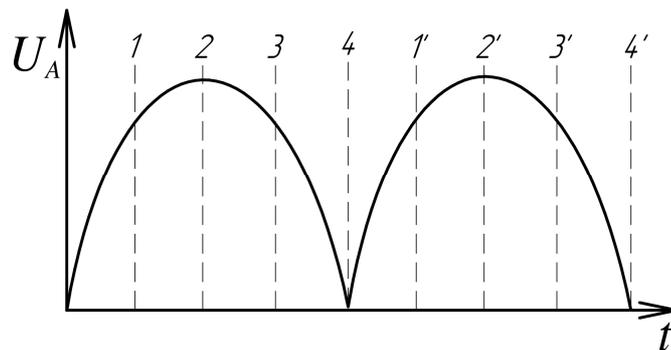


Рисунок 12 – Временная диаграмма процессов выборки сигналов датчиков

Сигнал ВВД выпрямляется двухполупериодным измерительным преобразователем. В моменты времени 2 и 2' измеряется амплитуда колебаний зонда ВВД. 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 удастся минимизировать эффект модуляции оптического излучения зондом ВВД. 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 усредняются.

В АПК реализованы три режима работы КС: автоколебательный режим, режим вынужденных колебаний и режим вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика путем подстройки частоты возбуждающего сигнала.

При выборе способа измерения амплитуды сигнала ВВД учитывались 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. Для измерения амплитуды выходного сигнала ВВД, с учетом предъявленных критериев, подходят два способа: пиковый детектор и метод синхронной выборки. Для выбора одного из двух способов было проведено их сравнение путем численного моделирования с наложением на измеряемый сигнал белого шума $P(t)$.

На рисунке 13 представлен результат расчета путем численного моделирования СКО измеренного значения амплитуды сигнала от отношения сигнал-шум.

Из рисунка видно, что случайная погрешность измерения методом синхронной выборки примерно в 3 раза больше, чем пиковым детектором. Это связано с тем, что при измерении амплитуды выходного сигнала ВВД методом синхронной выборки к наложенному шуму добавляется методическая (апертурная) погрешность, обусловленная неточной синхронизацией момента выборки АЦП с моментом максимального отклонения зонда ВВД от положения равновесия.

Результаты численного расчета отклонения среднего измеренного значения амплитуды сигнала ВВД от заданного значения при измерении амплитуды пиковым детектором и методом синхронной выборки в зависимости от отношения шум/сигнал показаны на рисунке 14.

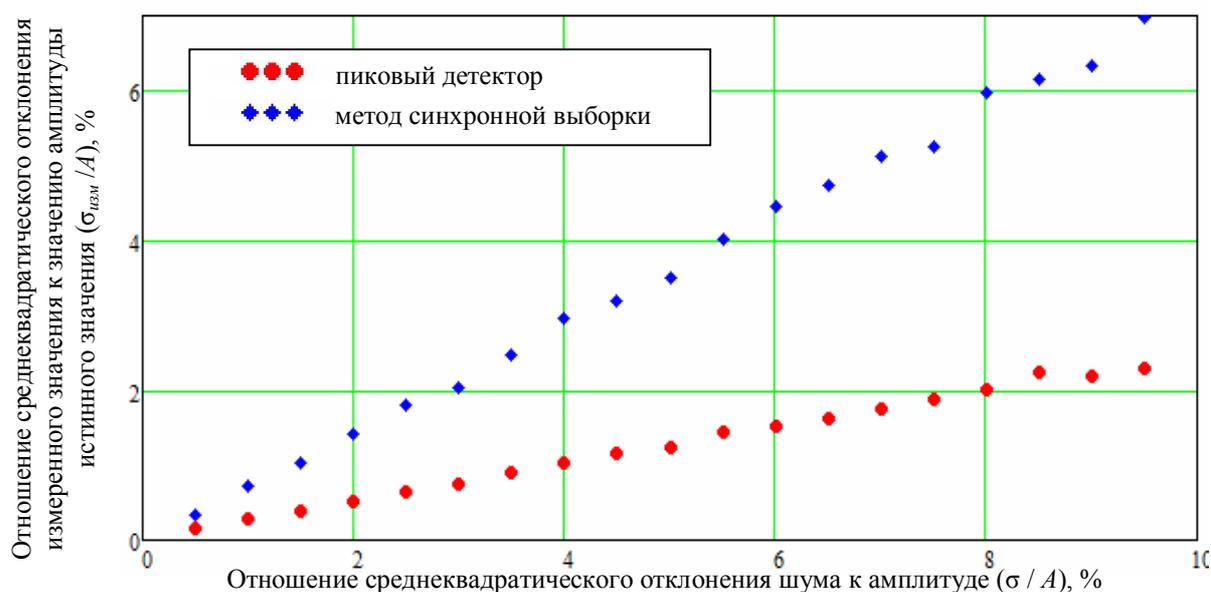


Рисунок 13 – Зависимость СКО измеренного значения амплитуды от уровня шума

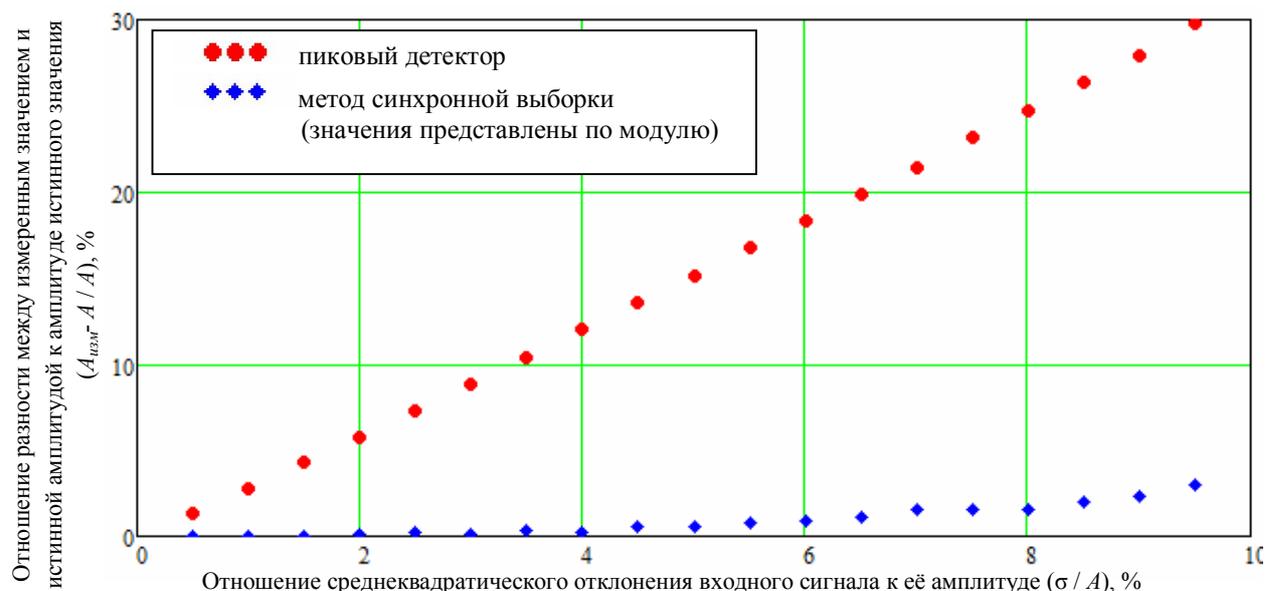


Рисунок 14 – Зависимость средней ошибки измерения амплитуды в зависимости от шумовой составляющей входного сигнала по результатам численного моделирования

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 10 график построен для модуля этой погрешности). По результатам численного моделирования сделан вывод, что при наложении на измеряемый сигнал шумовой составляющей результат измерения амплитуды сигнала ВВД методом синхронной выборки имеет меньшую суммарную погрешность, чем при измерении пиковым детектором.

Проверка зависимости амплитуды сигнала ВВД от уровня сигнала возбуждения КС показала, что эта зависимость линейна с относительной СКО аппроксимации не более 0,2%. При этом СКО многократных ($> 10^5$) измерений амплитуды сигнала ВВД в диапазоне от 0,01 до 0,9 В для каждого значения амплитуды сигнала возбуждения во всем диапазоне амплитуд было одинаковым и равным $4,3 \cdot 10^{-3}$ В. При этом среднее значение частоты выходного сигнала ВВД практически не зависит от амплитуды возбуждающего сигнала КС, а относительное СКО многократных измерений частоты уменьшалось с ростом амплитуды сигнала возбуждения ВВД от 0,03% до 0,004%.

В пятой главе представлены результаты сравнения 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.

В таблице 1 представлены результаты измерения амплитуды и частоты выходного сигнала ВВД при размещении зонда ВВД в различных средах (в воздухе, этиловом спирте и в трансформаторном масле) в стационарных условиях измерения.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований стабильности выходного сигнала ВВД, работающего в автоколебательном режиме (А) и режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз путем подстройки частоты (В).

Среда	Измеряемый параметр колебаний	Режим	Среднее значение	Относительная погрешность	Добротность колебательной системы
Воздух	Амплитуда	А	0,87 В	$5,5 \cdot 10^{-3}$	71
		В	0,87 В	$4,3 \cdot 10^{-3}$	
	Частота	А	252,3 Гц	$6,7 \cdot 10^{-4}$	
		В	252,4 Гц	$4,4 \cdot 10^{-5}$	
Этиловый спирт	Амплитуда	А	0,73 В	$5,9 \cdot 10^{-3}$	59
		В	0,72 В	$5,0 \cdot 10^{-3}$	
	Частота	А	249,6 Гц	$7,6 \cdot 10^{-4}$	
		В	249,3 Гц	$4,8 \cdot 10^{-5}$	
Трансформаторное масло марки ТТЗ-10	Амплитуда	А	–	–	17
		В	0,21 В	$12,0 \cdot 10^{-3}$	
	Частота	А	–	–	
		В	248,8 Гц	$8,0 \cdot 10^{-5}$	

Каждое значение представленное в таблице 2 является среднеарифметическим значением не менее $1,4 \cdot 10^5$ отсчетов измеренных в течении 10 минут. Из представленных результатов видно, что стабильность частоты колебаний ВВД в режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз 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 положения, влияние которых в обоих режимах идентично.

На рисунке 15 представлены результаты расчетов добротности и собственной частоты КС ВВД по АЧХ и ФЧХ колебаний.

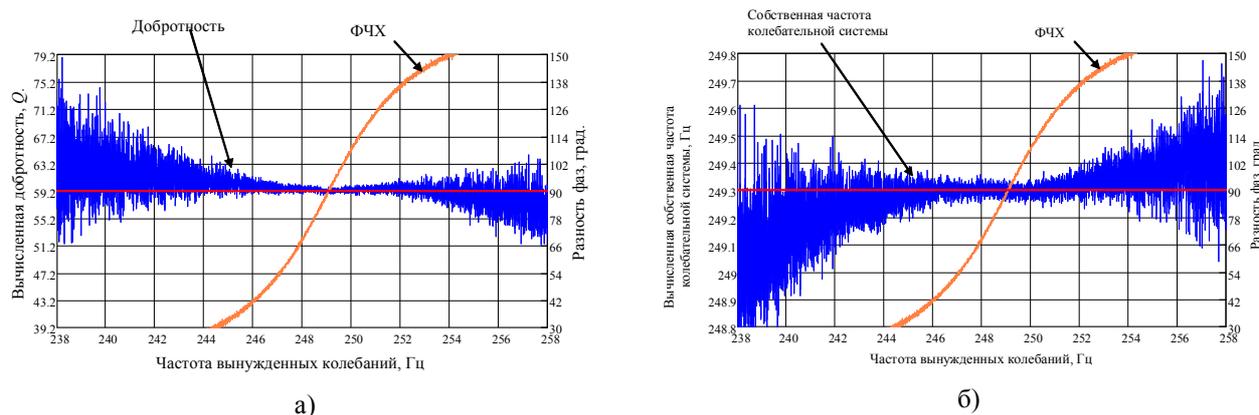


Рисунок 15 – Зависимость вычислений добротности (а) и собственной частоты (б) КС по АЧХ и ФЧХ вибровискозиметрического датчика от частоты вынужденных колебаний КС

Из графиков видно, что погрешность вычислений параметров КС минимальна при частоте возбуждающего сигнала равной собственной частоте КС (разности фаз равной 90°). Разброс расчетных параметров на графиках определяется отно-

шением сигнал/шум выходного сигнала ВВД, что подтверждено численным моделированием с наложением на полезный сигнал белого шума.

Для сравнения режимов возбуждения КС в динамике был проведен ряд испытаний. В качестве модельной жидкости использовался тридекан (степень чистоты – ч) с температурой застывания минус 5,4°С. Испытания проводились при охлаждении жидкости от +25°С до минус 10°С при скорости охлаждения 0,3°С/с.

На рисунке 16 представлены результаты экспериментальных испытаний тридекана в трех режимах возбуждения ВВД.

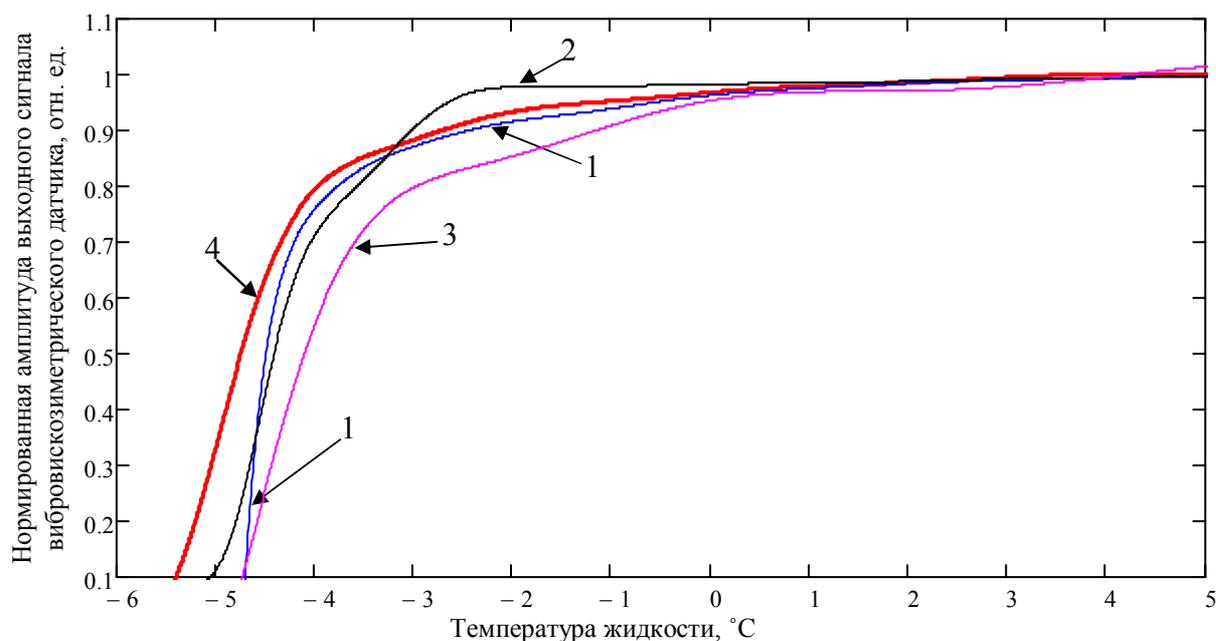


Рисунок 16 – Зависимости нормированных амплитуд выходного сигнала ВВД от температуры жидкости: 1 – автоколебательный режим; 2 – режим вынужденных колебаний (по максимуму ампл. на воздухе); 3 – режим вынужденных колебаний (по максимуму ампл. в жидкости); 4 – режим вынужденных колебаний с поддержанием разности фаз $\pi/2$ рад

В автоколебательном режиме (кривая 1) при малых значениях добротности условие автогенерации нарушается и колебания прекращаются. В режиме вынужденных колебаний результаты измерения сильно зависят от установленной частоты сигнала возбуждения (кривые 2 и 3). При работе в режиме вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз (кривая 4) диапазон температур (вблизи температуры застывания), при которых поддерживаются колебания КС ВВД, расширяется. На рисунке 17 видно, что относительная погрешность измерения амплитуды ВВД от температуры тридекана при работе в предложенном режиме возбуждения меньше, а рабочий диапазон – больше, чем в других режимах.

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

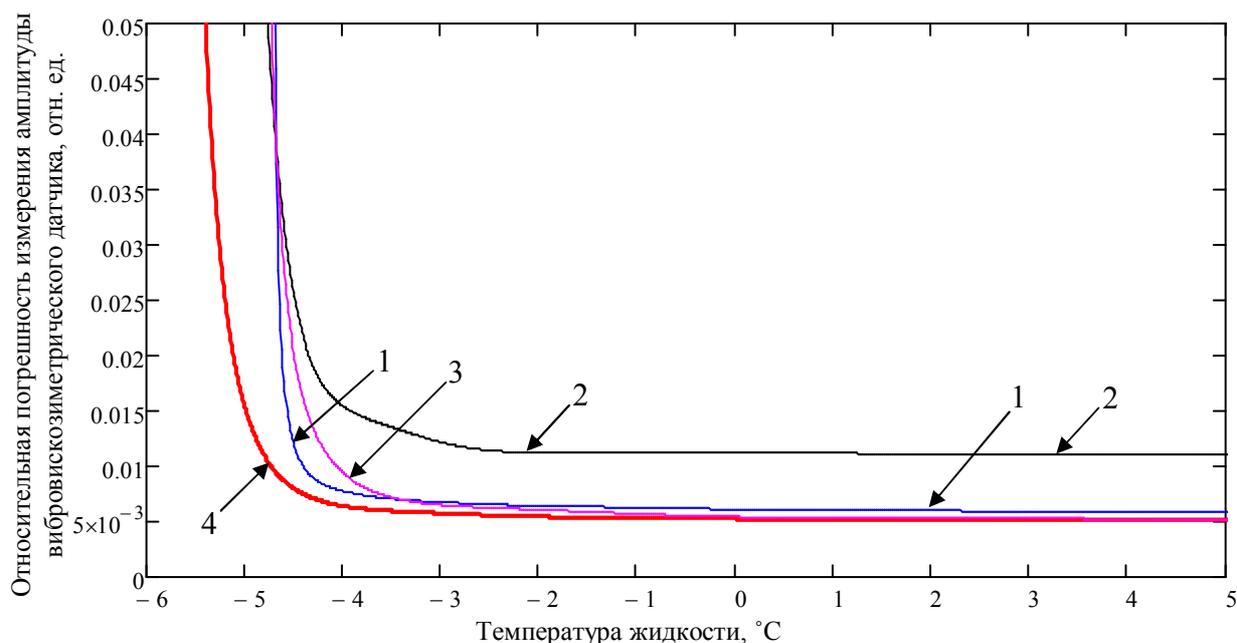


Рисунок 17 – Зависимости относительной погрешности измерения амплитуд выходного сигнала ВВД от температуры жидкости: 1 – автоколебательный режим; 2 – режим вынужденных колебаний (по максимуму ампл. на воздухе); 3 – режим вынужденных колебаний (по максимуму ампл. в жидкости); 4 – режим вынужденных колебаний с поддержанием заданного значения разности фаз.

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 способ возбуждения КС 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 со сканированием по частоте 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 с поддержанием постоянной разности фаз между сигналом возбуждения и сигналом отклика КС путем подстройки частоты сигнала возбуждения разработан и программно реализован алгоритм определения значения шага перестройки частоты генератора сигнала возбуждения из условия, при котором изменение фазы сигнала отклика, вызванное перестройкой частоты генератора, равно уровню фазовых шумов в датчике и не оказывает влияния на погрешность измерения параметров сигнала отклика КС.

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

5. Предложен способ определения добротности КС в составе ВВД по ее фазо-частотной характеристике в режиме вынужденных колебаний, при невозможности достоверного измерения амплитуды колебаний КС, путем периодической перестройки частоты сигнала возбуждения при отклонении разности фаз между сигналом отклика и сигналом возбуждения от 90° .

6. 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, а рабочий диапазон увеличился в сторону низких температур.

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

Список опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

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

2. Низаметдинов, А.М. Анализ работы вибровискозиметрического датчика в режиме с подстройкой частоты вынужденных колебаний /А.М. Низаметдинов //Автоматизация процессов управления. –2016. – №4. – С. 108–115.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Варнаков, В.В. Результаты исследований низкотемпературных свойств биодизельного топлива / В.В. Варнаков, Д.В. Варнаков, Е.А. Варнакова, А.М. Низаметдинов, А.В. Платонов, Б.А. Соломин // Международный научный журнал. – 2013. – №5. – С. 104–109.

Патенты и авторские свидетельства

9. **Патент РФ 2607048**, 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.

10. **Патент РФ 2574862**, МПК G01N11/10. Вибровискозиметрический датчик / Соломин Б.А., Конторович М.Л., Черторийский А.А., Низаметдинов А.М.; патентообладатель ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.- заявка 2013158404/28, заявл. 26.12.2013, опуб. 10.02.2016 бюл. №4.

11. **Патент на полезную модель № 139169**, 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.

12. **Патент РФ 2504757**, 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.

Основные публикации в других изданиях

13. 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.

14. 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; под ред. В.А. Сергеева // Радиоэлектронная техника: межвузов. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ. – 2016. – С. 62–70.

15. Низаметдинов, А.М. Алгоритм реализации резонансного возбуждения механической колебательной системы // 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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 междунар. научно-технич. конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2016, 3 – 6 октября 2016, Новосибирск, Ч.2. – Новосибирск. – Т.3. – С. 13–17.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. Низаметдинов, А.М. Многофункциональный вибровискозиметрический 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.

26. 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: материалы 15-й региональной научной школы–семинара, 4-7 декабря 2012, г.Ульяновск.- Ульяновск: УлГТУ. – 2012. – С. 25.

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

28. Низаметдинов, А.М. Усовершенствованная система охлаждения для аппаратно-программного комплекса ИРЭН2.4 // 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.

29. 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.

30. Соломин, Б.А. Расширение функциональных возможностей аппаратно–программного 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.

Низаметдинов Азат Маратович

**Повышение точности вибровискозиметрических датчиков на основе
электромеханических колебательных систем в нестационарных режимах работы**

Автореферат

Подписано в печать . Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. . Тираж 100 экз. Заказ .

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32.