

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра «Радиотехника, опто- и наноэлектроника»

ВКР2069378-11.04.01-14-20

К защите допустить  
Зав. кафедрой «Радиотехника», д.т.н.  
\_\_\_\_\_ А.Г. Ташлинский  
« 15 » июня 2020 г.

Беркутова Ольга Александровна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВИБРОВИСКОЗИМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ  
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРУБЧАТЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени  
магистра

**Направление 11.04.01 – «Радиотехника»**

**Магистерская программа – «Радиофизика и электроника»**

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент

 Черторийский А.А.

Ульяновск 2020

Магистерская диссертация, 83 с., 49 рис., 7 табл., 40 источн.

## ДАТЧИК, ВИБРОВИСКОЗИМЕТР, ВЯЗКОСТЬ, КОЭФФИЦИЕНТ ЖЕСТКОСТИ, КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, МОДЕЛИРОВАНИЕ

Объектом исследований в данной работе является вибровискозиметрический датчик (ВВД) на основе пьезоэлементов.

Цель работы – изучение влияния параметров колебательной системы ВВД на его метрологические характеристики.

Для достижения поставленной цели проведен теоретический обзор методов и технических средств измерения вязкости жидкостей. На основе анализа конструкции вибровискозиметрического датчика разработана физическая модель его колебательной системы. Проведено численное моделирование и экспериментальное исследование характеристик датчика. Продемонстрирована возможность управления эквивалентной жёсткостью колебательной системы с помощью введения обратной связи в цепь возбуждения колебаний.

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
1 Обзор методов и технических средств, применяемых для измерения вязкости жидкостей ..	7
1.1 Понятие вязкости .....	7
1.1.1 Динамическая вязкость .....	8
1.1.2 Кинематическая вязкость .....	10
1.1.3 Условная вязкость .....	12
1.1.4 Обзор вязкостей жидкостей, используемых при калибровке вискозиметров .....	13
1.2 Методы и технические средства измерения вязкости.	
Классификация вискозиметров .....	14
1.2.1 Ротационные вискозиметры .....	14
1.2.1.1 Вискозиметры Брукфильда .....	15
1.2.1.2 Экспресс-анализаторы вязкости RVA .....	16
1.2.2 Капиллярные вискозиметры .....	17
1.2.3 Вискозиметр с падающим шариком .....	19
1.2.3.1 Вискозиметры Anton Paar .....	21
1.2.4 Вибрационные вискозиметры .....	22
1.2.4.1 Вибрационный вискозиметр для процесса непрерывного действия L-vis 520 series .....	24
1.2.4.2 Вискозиметр вибрационный низкочастотный ВВН-8 .....	25
1.2.4.3 Вибровискозиметр камертонного типа .....	26
1.3 Способы возбуждения колебаний в вибровискозиметре .....	27
1.3.1 Механический метод возбуждения .....	28
1.3.2 Радиационный метод возбуждения .....	29
1.3.3 Магнитный и магнитострикционный метод возбуждения .....	30
1.3.4 Пьезоэлектрический метод возбуждения .....	32
1.4 Выводы .....	37
2 Моделирование и экспериментальное исследование характеристик вибровискозиметрического датчика .....	38
2.1 Конструкция датчика .....	38
2.2 Разработка физической модели датчика .....	39
2.3 Результаты моделирования .....	43
2.3.1 Анализ свободных колебаний в вибровискозиметрическом датчике .....	43
2.3.2 Анализ влияния параметров элементов вибровискозиметрического датчика на его характеристики .....	46
2.3.2.1 Анализ влияния массы зонда .....	46
2.3.2.2 Изменение длины пьезотрубок .....	49
2.3.3 Анализ влияния исследуемой жидкости на характеристики вибровискозиметрического датчика .....	51
2.3.3.1 Изменение коэффициента вязкости жидкости .....	51
2.3.3.2 Изменение присоединенной массы .....	53
2.3.4. Сравнение экспериментальных значений и значений, полученных моделированием .....	54
2.4 Выводы .....	58

3 Управление эквивалентной жесткостью колебательной системы вибровискозиметрического датчика .....	59
3.1 Принцип эквивалентности .....	60
3.2 Разработка эквивалентной электрической принципиальной схемы вибровискозиметрического датчика с управляемой жесткостью .....	62
3.3 Результаты моделирования .....	64
3.3.1 Вынужденные колебания с возбуждением от внешнего генератора .....	64
3.3.2 Собственные колебания без обратной связи .....	65
3.3.3 Собственные колебания с обратной связью .....	67
3.3.4 Изменение эквивалентной жесткости .....	69
3.4 Выводы .....	71
4 Экспериментальная проверка эффекта управления жесткостью колебательной системы ...	72
4.1 Особенности конструкции экспериментальной установки.....	72
4.2 Расчет параметров необходимых для реализации .....	73
4.3 Результаты эксперимента .....	74
4.4 Выводы .....	76
Заключение .....	77
Список использованных источников .....	79

## ВВЕДЕНИЕ

Вязкость является параметром, характеризующим интенсивность межмолекулярных взаимодействий в жидкостях. Область, посвященная измерению вязкости жидкости, называется вискозиметрия, а приборы для измерения вязкости называются вискозиметрами. Современные вискозиметры характеризуются высокой степенью автоматизации процесса измерения, а при их производстве используются самые современные технологии [1]. Вибровискозиметры являются перспективной разновидностью подобных приборов. В них для измерения вязкости используется колебательная система, взаимодействующая с исследуемой жидкостью.

Благодаря тому, что вязкость несет информацию о внутреннем строении жидкости, возникает возможность ее использования для оценки потребительских свойств различных жидкостей, используемых в химической и пищевой промышленности, для оценки эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей и топлив. Особое значение и актуальность, в связи с этим, приобретает задача повышения точности измерений и расширение функциональных возможностей вискозиметров.

Один из перспективных образцов вибровискозиметра был разработан в УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в ходе исследований свойств многокомпонентных жидкостей. Его основу составляет вибровискозиметрический датчик с колебательной системой на основе трубчатых пьезоэлементов [2]. Выпускная квалификационная работа посвящена моделированию и экспериментальному исследованию влияния параметров колебательной системы данного датчика на метрологические характеристики вибровискозиметра. С целью расширения функциональных возможностей вибровискозиметра в работе анализируется возможность электрического управления эквивалентной жесткостью колебательной системы датчика.

Работа представлена в рамках четырех глав.

В первой главе рассмотрен физический смысл понятия вязкости, а также физические величины, используемые для описания вязкостных свойств жидкости. Дан обзор способов и технических средств измерения вязкости. Рассмотрены различные способы возбуждения колебаний в вибрационных вискозиметрах.

Вторая глава посвящена описанию установки для исследования вязкостных свойств жидкостей, одной из составных частей которой является вибровискозиметрический датчик. Описана структурная схема установки, предложен вариант конструкции датчика. Приведены результаты моделирования колебательной системы: математическое описание, анализ свободных колебаний, спектр колебаний, АЧХ колебательной системы и анализ результатов при различных изменениях вязкости, массы и других параметров элементов системы.

В третьей главе рассматривается возможность управления коэффициентом жёсткости колебательной системы. В основе управления коэффициентом жесткости лежит введение сигнала обратной связи пропорционального смещению колеблющейся массы из положения равновесия. Проведено моделирование колебательной системы с управлением жёсткостью с использованием программы Multisim. Для проведения моделирования механическая колебательная система была преобразована в эквивалентную электрическую.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования по управлению коэффициентом жесткости. Эксперименты проводились с использованием разработанного макета колебательной системы с электромагнитным возбуждением. Исследовалась зависимость частоты собственных колебаний от коэффициента обратной связи. Проведен анализ полученных результатов.

# **1 Обзор методов и технических средств, применяемых для измерения вязкости жидкостей**

## **1.1 Понятие вязкости**

Вязкость жидкости можно определить, как сопротивление жидкости передвижению одного ее слоя относительно другого. Значение вязкости разных жидкостей очень сильно отличаются друг от друга. Например, эфир обладает чрезвычайно низким «внутренним трением», тогда как глицерин имеет высокую вязкость. Внутреннее трение возникает в жидкости вследствие взаимодействия молекул. В отличие от внешнего трения, возникающего в месте соприкосновения двух тел, внутреннее трение имеет место внутри движущейся среды между слоями с различными скоростями движения. Работа, затрачиваемая на это перемещение, рассеивается в виде тепла.

Вязкость жидкости измеряется по ее сопротивлению к изменению формы без изменения объема. Коэффициент вязкости (или внутреннего трения) жидкости определяется как сила, необходимая для смещения слоя жидкости, обладающего поверхностью, равной единице, вдоль такого же неподвижного слоя со скоростью, равной единице, и на расстоянии, равном единице [3].

Между слоями жидкости, движущимися друг относительно друга, возникает сила. Эта сила прямо пропорциональна скорости движения и площади соприкосновения. Получается, что трение зависит от площади соприкосновения, уменьшается с увеличением толщины слоя и увеличивается с увеличением скорости. Эти факторы были учтены Ньютоном и в 1687 году был предложен и установлен закон вязкого течения жидкости, который гласит: вязкость - свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной ее части относительно другой.

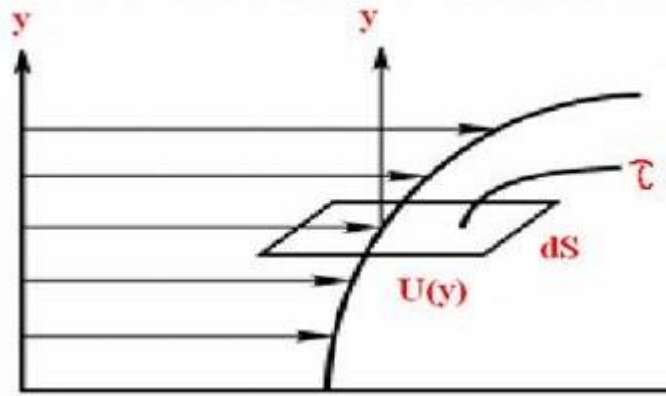


Рисунок 1.1 – Физическое объяснение вязкости

Различают динамическую и кинематическую вязкость.

### 1.1.1 Динамическая вязкость

Внутреннее трение жидкостей, появляется при движении жидкости вследствие переноса импульса в направлении, перпендикулярном к направлению движения. Для ньютоновских жидкостей справедлив общий закон внутреннего трения — закон Ньютона:

$$\tau = -\eta \frac{\partial v}{\partial n} \quad . \quad (1.1)$$

Коэффициент вязкости  $\eta$  (коэффициент динамической вязкости) может быть получен на основе определения о движениях молекул. Очевидно, что  $\eta$  тем меньше, чем меньше время «оседлости» молекул. Эти определения приводят к выражению для коэффициента вязкости, называемому уравнением Френкеля-Андраде:

$$\eta = C e^{w/kT} \quad . \quad (1.2)$$

Другая формула для коэффициент вязкости, была предложена Бачинским. Коэффициент вязкости определяется межмолекулярными силами, зависящими



от среднего расстояния между молекулами; последнее определяется молярным объёмом вещества. Проводимые эксперименты показали, что между молярным объёмом и коэффициентом вязкости существует соотношение:

$$\eta = \frac{c}{V_M - V_C} \quad , \quad (1.3)$$

где  $c$  — константа, для определенной жидкости,  $V_C$  — собственный объем, занимаемый частицами жидкости. Это эмпирическое соотношение называется формулой Бачинского [4].

Динамическая вязкость жидкостей уменьшается с повышением температуры, и растёт с увеличением давления. В метрической системе единица динамической вязкости представляется в грамм/сантиметр в секунду, называемой пуаз. Принятое обозначение пуаз – П:

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 10 \text{ П}. \quad (1.4)$$

Единицы измерения динамической вязкости паскаль-секунда и пуаз значительны по своему размеру и применяют дольные единицы – миллипаскаль-секунда мПа и сантипуаз сП:

$$1 \text{ мПа} \cdot \text{с} = 1 \text{ сП}. \quad (1.5)$$

Переводные множители для расчёта динамической вязкости приведены ниже в таблице 1.1

Таблица 1.1– Единицы измерения динамической вязкости

Единицы	Пуаз $\left[\frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}}\right]$	Па · с $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}\right]$	$\left[\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{ч}}\right]$	$\left[\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}\right]$
Пуаз $\left[\frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}}\right]$	1	$10^{-1}$	$3,6 \cdot 10^2$	$1,02 \cdot 10^{-2}$
Па · с $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}\right]$	10	1	$3,6 \cdot 10^3$	$1,02 \cdot 10^{-1}$
$\left[\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{ч}}\right]$	$2,78 \cdot 10^{-3}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	1	$2,84 \cdot 10^{-3}$
$\left[\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}\right]$	$9,81 \cdot 10^2$	9,81	$3,53 \cdot 10^4$	1

### 1.1.2 Кинематическая вязкость

В технике, приходится иметь дело с величиной, равной отношению динамической вязкости к плотности жидкости:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (1.6)$$

где  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости,  $\rho$  — плотность жидкости [6].

Данная величина получила название кинематической вязкости. Размерность кинематической вязкости представляет собой произведение скорости на длину. С увеличением значения вязкости – становится больше сгущение среды. Но если более подробно рассмотреть размерность кинематической вязкости, представляющую собой произведение скорости на длину (пространственную протяженность), то возникает противоречие – большему значению кинематической вязкости соответствуют большие значения скорости и длины, а по смыслу этого понятия должно быть наоборот.

Единица измерения кинематической вязкости в системе СИ – квадратный метр на секунду, в метрической системе – квадратный сантиметр на секунду называемый стокс. Принятое обозначение стокса – Ст.

$$1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^4 \text{ Ст.} \quad (1.7)$$

Единица измерения кинематической вязкости квадратный метр на секунду и стокс значительна по своему размеру и для практических применений используют дольные единицы – квадратный миллиметр на секунду и сантистокс (сСт) [5].

$$1 \text{ мм}^2/\text{с} = 1 \text{ сСт} \quad (1.8)$$

Переводные множители для расчёта кинематической вязкости приведены ниже в таблице 1.2.

При необходимости пересчёта параметров вязкости можно воспользоваться соотношением, соблюдая размерности физических величин, например,

$$\nu(\text{сСт}) = \frac{\mu(\text{сП})}{\rho\left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)} \cdot \quad (1.9)$$

Таблица 1.2 – Единицы измерения кинематической вязкости

Единицы	$\frac{\text{мм}^2}{\text{с}}$ (сСт)	$\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$ (Ст)	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{ч}}$
$\frac{\text{мм}^2}{\text{с}}$ , (сСт)	1	$10^{-2}$	$10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
$\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$ , (Ст)	$10^2$	1	$10^{-4}$	0,36
$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$10^6$	$10^4$	1	$3,6 \cdot 10^3$
$\frac{\text{м}^2}{\text{ч}}$	$2,78 \cdot 10^2$	2,78	$2,78 \cdot 10^{-4}$	1

### 1.1.3 Условная вязкость

Нефть и нефтепродукты часто характеризуются такой величиной, как условная вязкость, за которую принимается отношение времени истечения через калиброванное отверстие стандартного вискозиметра 200 мл нефтепродукта при определенной температуре ко времени истечения 200 мл дистиллированной воды при температуре 20°C. Условная вязкость при температуре обозначается знаком ВУ, и выражается числом условных градусов.

Условная вязкость измеряется в градусах ВУ (°ВУ) (если испытание проводится в стандартном вискозиметре по ГОСТ 6258-85), секундах Сейболта и секундах Редвуда (если испытание проводится на вискозиметрах Сейболта и Редвуда). В нефтяных дисперсных системах в определенных условиях в отличие от ньютоновских жидкостей вязкость является переменной величиной, зависящей от градиента скорости сдвига. В этих случаях нефти и нефтепродукты характеризуются эффективной или структурной вязкостью [6].

Такое понятие как индекс вязкости (ИВ), указывает на степень изменения в вязкости масла в пределах определенного диапазона температур. Высокий ИВ

означает малое изменение вязкости с температурой, а низкий ИВ означает большое изменение вязкости с температурой. Большинство минеральных основных масел имеет индекс вязкости между 0 и 110.

Чтобы определить индекс вязкости требуется определить кинематическую вязкость при 40°C и 100°C. После этого ИВ определяют из таблиц по ASTM D 2270 или ASTM D 39B (стандартные методики расчета индекса вязкости).

#### **1.1.4 Обзор вязкостей жидкостей, используемых при калибровке вискозиметров**

В таблице 1.3 представлены численные значения динамической и кинематической вязкости жидкостей, используемых при калибровке вискозиметров. Динамическая вязкость жидкостей выражена в миллипаскаль-секундах, что идентично сантипуазам. Кинематическая вязкость выражена в сантистоксах и представлена при комнатной температуре.

Таблица 1.3 – Значение вязкости некоторых жидкостей

Жидкость	Динамическая вязкость, Па·с	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Кинематическая вязкость, сСт
Этиловый спирт	1,786	0,7893	2,26
Вода	1,793	0,9982	1,796
Бензин	0,53	0,7332	0,72
Декан	0,838	0,73	1,14
Пентадекан	0,7685	2,841	0,27

## **1.2 Методы и технические средства измерения вязкости.**

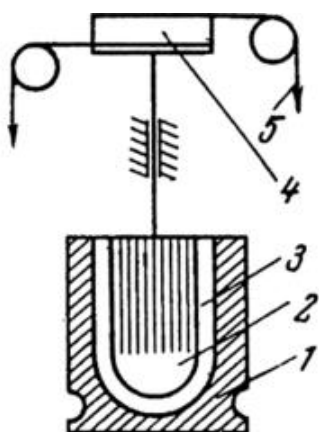
### **Классификация вискозиметров**

Современные вискозиметры являются широко представленными на рынке приборами. Основными плюсами вискозиметров являются автоматизация, повышение точности и быстрота измерений. Они используются в различных отраслях промышленности и техники. Все разнообразие вискозиметров можно классифицировать по принципу измерения вязкости, которое в них заложено.

#### **1.2.1 Ротационные вискозиметры**

Принцип работы ротационного вискозиметра заключается следующем: два тела вращения, совмещаются по осям [7], пространство между телами заполняется исследуемым веществом. К одному из тел подаётся крутящий момент и тело начинает вращаться с угловой скоростью, зависящей от вязкости вещества. Определение вязкости производится исходя из выбранной математической модели поведения для данной конфигурации тел вращения. Рисунок 1.2 описывает принцип работы ротационного вискозиметра. В данном случае пространство между телами заполняется исследуемым веществом. В процессе исследования одно тело вращается, а второе остается неподвижным. Таким образом исследуемая жидкость передает вращение от движимого тела к неподвижному, и как раз-таки скорость, с которой вращение передается от одного тела к другому, определяет вязкость вещества.

Особое применение нашли такие устройства, как поточный ротационный вискозиметр. Эти приборы используются для постоянной регистрации показателей вязкости текучих жидких сред, например, нефти. Современные вариации могут иметь внешний компьютерный контроль, встроенную систему управления с микрокомпьютером или внешнюю (особенно поточные вискозиметры) станцию управления с логгером.



1-стакан, 2-ротор, 3-продукт, 4-шкив, 5-нить с грузом

Рисунок 1.2 – Схема ротационного вискозиметра

Области применения такого оборудования, как ротационный вискозиметр, разнообразны: измерение вязкости нефтепродуктов, смазочных масел, расплавленных силикатов, металлов, лаков и прочих тягучих материалов. Кроме того, с их помощью можно измерить динамическую вязкость крахмала, шоколадной массы, красок, покрытий и чернил, битумов, лекарственных веществ, соусов и подлив, паяльных паст, продуктов личной гигиены и т. п. [8].

### 1.2.1.1 Вискозиметры Брукфильда

Вискозиметры компании Брукфильд это современное оборудование, которое имеет высокий уровень качества [9]. Данные приборы можно использовать для определения динамической вязкости по ГОСТ 1929-87. Вискозиметры Брукфильда используют стандартный принцип ротационной вискозиметрии.

Вискозиметры Брукфильда (рис. 1.3) позволяют измерять вязкость практически нетекучих веществ, таких как шпатлевки, кремы, пасты, желатины, смолы. В этих веществах вращающиеся элементы, быстро прорезают «туннели», после чего измерение становится бессмысленным. Подобная картина характерна и для большинства гелей.

Спиральный адаптер состоит из шпинделя с резьбой и внешнего цилиндра. Благодаря такой конструкции обеспечивается непрерывная прокатка образца через адаптер. Таким образом, быстро устанавливается стабильное течение образца и производится измерение вязкости. Именно измерения при стабильном течении дает ряд преимуществ, из-за того, что менее подвержено влиянию различных внешних факторов.



DV-E  
Простейшие  
цифровые модели  
а)

DVNext  
Цифровые модели с таймером и  
возможностью контроля температуры  
б)

DV2T  
DV3T  
Реометр  
в)

Рисунок 1.3 – Ротационные вискозиметры Брукфильда

### 1.2.1.2 Экспресс-анализаторы вязкости RVA

Такие экспресс-анализаторы так же основываются на принципе работы ротационных вискозиметров с возможностью регулирования температуры и скорости перемешивания.

Данные приборы (рис. 1.4) анализируют малый объем образца, используя международные методики. RVA является наиболее эффективным и доступным прибором, предназначенным получать вискозиметрические характеристики измельченного образца. Принцип анализа основан на измерении вязкости исследуемой суспензии в процессе нагревания и последующего ее охлаждения





Рисунок 1.4 – Экспресс-анализатор вязкости RVA

Применение RVA заключается в исследовании зерновых, корнеплодов - качество крахмала в пшенице, кукурузе, рисе, сорго, картофеле, тапиоке, сахарной свекле, маранте, саго и др. Пивоварение - качество ячменя для солодоращения, сухого солода и пивоваренных компонентов. Экструдированные продукты и корма - степень готовности сэндвичей, зерновых завтраков и кормов для животных. Гели, студни - желирующая способность и степень (скорость) загустевания гидроколлоидов. Молочные продукты - качество сыров (в т.ч. плавленых), молочных десертов, мороженого, йогуртов [10].

### **1.2.2 Капиллярные вискозиметры**

Принцип действия капиллярных вискозиметров основан на определении времени протекания определенного объема жидкости через узкое отверстие, например, трубку, при заданной разнице давлений. Жидкость из резервуара вытекает под действием собственного веса, в этом случае вязкость пропорциональна разнице давлений между жидкостью, вытекающей из капилляра и жидкостью на том же уровне, вытекающей из очень толстой трубки.

Капиллярный вискозиметр за счет простоты устройства имеет широкое распространение в вискозиметрии жидкостей [11].

На рисунке 1.5 представлен капиллярный вискозиметр ВПЖ-1. С помощью которого далее описывается принцип работы более подробно. Испытуемая жидкость заливается в чистый вискозиметр через трубку (1) так, чтобы уровень ее установился между отметками  $M_3$  и  $M_4$ . На концы трубок (2) и (3) надевают резиновые трубки. Вискозиметр устанавливают вертикально в жидкостный термостат, чтобы уровень воды находился на несколько сантиметров выше расширения (8). При температуре измерения выдерживают прибор не менее 15 минут, после чего засасывают (грушей) при закрытой трубке (3) жидкость выше отметки примерно до половины резервуара (8) и перекрывают кран, соединенный с трубкой (2). Если вязкость жидкости менее 500-1000 сантистоксов, открывают кран на трубке (2) и освобождают зажим на трубке (3). При более вязких жидкостях сначала открывают трубку (3), затем трубку (2). Далее измеряют время понижения уровня в трубке (2) от отметки  $M_1$  до отметки  $M_2$ .

Необходимо при этом обращать внимание на то, чтобы к моменту подхода уровня жидкости к отметке  $M_1$  в расширении (6) образовался висячий уровень, а в капилляре не было бы пузырьков воздуха. Вязкость вычисляют по формуле (1.7) по среднему времени истечения жидкости:

$$\eta = \frac{g}{980,7} \cdot t \cdot 0,002639, \quad (1.10)$$

где  $t$  – время истечения жидкости в секундах,  $\eta$  – кинематическая вязкость жидкости в сантистоксах,  $g$  – ускорение силы тяжести в месте измерения в  $\frac{cm}{c^2}$ .

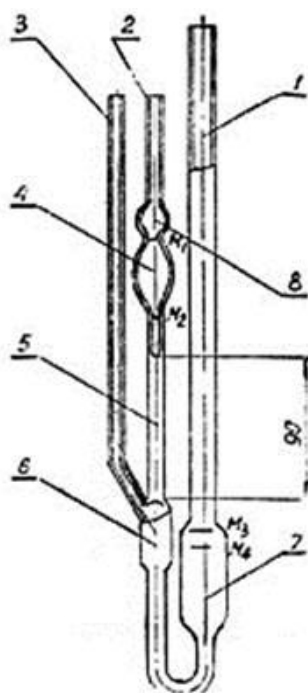


Рисунок 1.5 – Капиллярный вискозиметр ВПЖ-1

### 1.2.3 Вискозиметр с падающим шариком

Принцип работы вискозиметра с падающим шариком заключается в следующем: вязкость определяется путем подсчета времени падения цилиндрического или сферического объекта на заранее известное расстояние внутри образца. Измерение вязкости по такому принципу проводят с помощью вискозиметра Гепплера. На рисунке 1.6 показан общий вид вискозиметра с падающим шариком.

Для того чтобы измерить вязкость, исследуемую жидкость заливают в трубку, опускают шарик и термостатируют вискозиметр в течении 30 мин при определенной температуре ( $20 \pm 0,1$ ) °С. Далее шарик возвращают в исходное положение, включают секундомер, когда нижняя часть шарика коснется верхней метки. И останавливают, когда шарик достигнет нижней метки. Измерения проводят не меньше 5 – 7 раз [12].

Динамическую вязкость жидкости вычисляют по формуле:

$$\eta = K \cdot (\rho_{ш.} - \rho_{ж.}) \cdot t_{cp}. \quad (1.11)$$

где  $K$  – постоянная вискозиметра;  $\eta$  – динамическая вязкость, мПа · с;

$t_{cp}$  – среднее время движения шарика между крайними метками, с;

$\rho_{ш.}$  и  $\rho_{ж.}$  – плотности шарика и жидкости соответственно, г/см<sup>3</sup>.

Постоянная вискозиметра ( $K$ ) определяется по формуле:

$$K = \frac{\eta_0}{(\rho_{ш.} - \rho_{ож.}) \cdot t_{0cp}} \quad (1.12)$$

где  $\eta_0$  – динамическая вязкость градуированной жидкости, мПа · с;  $t_{0cp}$  –

среднее значение времени движения данного шарика в градуированной

жидкости, с;  $\rho_{ш.}$  и  $\rho_{ож.}$  – плотности шарика и градуированной жидкости

соответственно, г/см<sup>3</sup>.

Плотность шариков вычисляют по формуле:

$$\rho_{ш.} = \frac{6 \cdot m}{\pi \cdot d^3} \quad (1.13)$$

где  $m$  – масса шарика, определяемая взвешиванием, г;  $d$  – диаметр шарика, см.

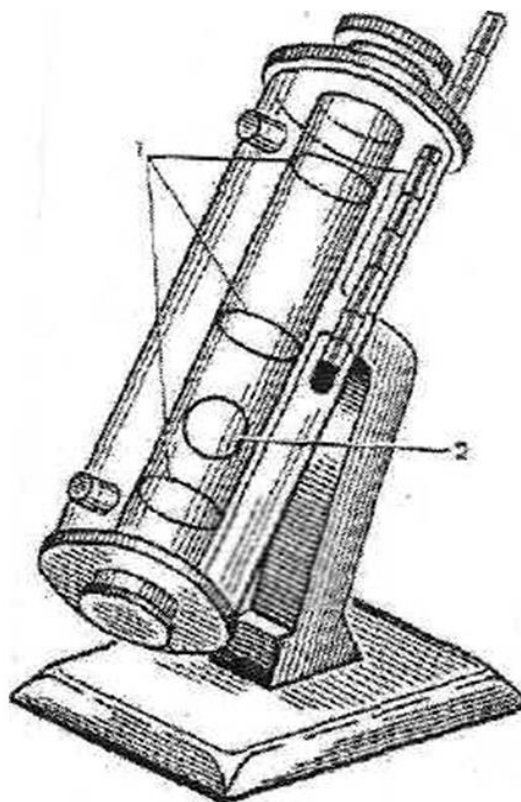


Рисунок 1.6 – Вискозиметр с падающим шариком

1 – калибровочные отметки; 2 – шарик.

### **1.2.3.1 Вискозиметры Anton Paar**

Вискозиметры Anton Paar в свое время произвели революцию в измерении вязкости. Создание автоматического микровискозиметра Lovis 2000M/ME (рис. 1.7) сделали точное измерение вязкости более быстрым и простым процессом, чем когда-либо ранее.

Lovis 2000M/ME - это вискозиметр, измеряющий время, за которое шарик катится через капилляр с измеряемой жидкостью, в соответствии с принципом Гепплера (падающий шарик). Для измерения необходимо всего лишь 400 мкл образца.



Рисунок 1.7 – Вискозиметр Lovis 2000M/ME

#### **1.2.4 Вибрационные вискозиметры**

Вибрационный метод измерения вязкости является на данный момент самым перспективным во многих отрасли. [13].

Благодаря таким преимуществам как небольшие размеры вибрационного зонда, удобство и простота использования, возможность контроля вязкости жидкостей, находящихся при высокой температуре и высоком давлении, хорошие динамические параметры и возможность автоматизации процесса измерения, данный метод используется повсеместно [14].

Основными изменяемыми параметрами вибрационного измерительного зонда являются: резонансная частота, амплитуда механических колебаний, сдвиг фаз между возбуждающей силой преобразователя и параметрами колебания приемного преобразователя зонда, а также декремент затухания механических колебаний.

При измерении вязкости вибрационным методом используют два режима возбуждения. Первый это непрерывный режим, при котором возбуждения измеряют следующие параметры зонда: частоту, амплитуду механических

колебаний и фазовые соотношения между колебаниями возбуждающего и приемного преобразователей измерительного зонда. Второй – импульсный режим возбуждения, где измеряют величину коэффициента (декремента).

Так же существуют различные варианты реализации вибрационного метода: амплитудный, частотный, фазовый. Выбор зависит от диапазона измерения вязкости. Так, например, для определения вязкости жидкостей со средней вязкостью, чаще всего используется частотно-фазовый метод. Расчетная формула в данном случае имеет вид:

$$\eta = \frac{m_0^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2}{8S^2 \cdot \omega^3 \cdot \rho}. \quad (1.14)$$

Здесь  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $m_0$  – масса вибрирующего элемента, кг;  $\omega_0$  – частота гармонической возбуждающей силы в воздухе, 1/с;  $\omega$  – частота гармонической возбуждающей силы в исследуемой жидкости, 1/с;  $S$  – площадь поверхности вибрирующего элемента, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность исследуемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Частотно-фазовый вариант вибрационного метода вискозиметрии используется для очень вязких жидкостей. В данном случае измеряется частота колебаний зонда вискозиметра, сначала не погруженного ( $\omega_0$ ) и затем погруженного ( $\omega$ ) в жидкость при сдвиге фаз:

$$\varphi = \frac{\pi}{2}. \quad (1.15)$$

Для измерения вязкости менее вязких сред, подходит амплитудно-резонансный вариант вибрационного метода вискозиметрии. В этом случае добиваются того, чтобы амплитуда колебаний была максимальной. Поэтому измеряемым параметром является амплитуда колебаний зонда вискозиметра.

Таким образом для малых значений вязкости имеем:

$$\sqrt{\eta\rho} = \frac{F_0}{w^{3/2}S\sqrt{10A}} \cdot \quad (1.16)$$

#### 1.2.4.1 Вибрационный вискозиметр для процесса непрерывного действия L-vis 520 series

Благодаря применению самых низких показателей сдвига в обрабатывающей промышленности позволяет получить лучшие в своем классе результаты корреляции с лабораторными приборами. Вибрационный вискозиметр L-vis 520 series (рис. 1.8) позволяет проводить надежные поточные измерения, особенно для образцов, поведение которых зависит от сдвига, таких как санитарная керамика, шампуни, вискоза и тесто, что приводит к более высокому качеству продукции и сокращению лабораторного времени.



Рисунок 1.8 – Вибрационный вискозиметр L-vis 520 series



Основные характеристики:

-Высокая производительность: количество лабораторных измерений можно сократить с одного раза в час до одного раза в день

-Качество выпускаемой продукции: отходы от керамики, например, могут быть уменьшены на 20%, так как непрерывные поточные измерения помогают избежать проблем, связанных с подготовкой проб, таких как влияние условий окружающей среды или ошибки считывания.

-Регулируемая скорость сдвига позволяет еще больше улучшить корреляцию между лабораторными и технологическими процессами за счет адаптации скорости сдвига таким образом, чтобы она была ближе к скорости сдвига лабораторных инструментов [15].

#### **1.2.4.2 Вискозиметр вибрационный низкочастотный ВВН-8**

Данного образца вискозиметры существуют в пяти реализациях, каждая из которых зависит от диапазона измерения. Вискозиметр является средством измерения и относится по эксплуатационной предназначенности к изделиям третьего порядка по ГОСТ 12997.

В основу принципа работы вискозиметра (рис. 1.9) положен вибрационный метод измерения вязкости, который заключается в том, что в измерительном преобразователе с использованием электромагнитной системы поддерживается постоянная амплитуда колебаний чувствительного элемента, который погружен в анализируемую жидкость. При этом так же измеряется значение переменного тока, который протекает в цепи возбуждения электромагнитной системы.

В комплектацию вискозиметра входит следующее: измерительный преобразователь ПИ-72 (предназначен для преобразования электрических колебаний цепи возбуждения в механические колебания); чувствительный элемент, погруженный в анализируемую жидкость; обратный преобразователь механических колебаний вибратора в электрический сигнал; электронный блок

БЭ-63, обеспечивающий возбуждение резонансных колебаний постоянной амплитуды; вибратор колебательной системы ПИ-72 [16].



Рисунок 1.9 - Вискозиметр вибрационный низкочастотный ВВН-8

### 1.2.4.3 Вибровискозиметр камертонного типа

Предшествующий разрабатываемой экспериментальной установки вискозиметр - вибрационный вискозиметр камертонного типа, разработанный в УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, представленный на рисунке 1.10 [17]. Измерение вязкости исследуемой жидкости происходит следующим образом: с помощью миниатюрного сферического зонда 1, закрепленного на стеклянном капилляре 2, который предназначен для выполнения возвратно-поступательных движений, колебания передаются зонду от нижнего плеча камертона 3, возбуждаемого с помощью электромагнита 5. Благодаря присутствию верхнего плеча камертона 4, колеблющегося в противофазе с нижним плечом, обеспечивается высокая добротность колебательной системы, но лишь в достаточно узком частотном диапазоне, что ограничивает чувствительность датчика при измерении жидкостей с большой вязкостью.

Часть энергии при движении зонда в используемой жидкости расходуется на вязкостное трение, которое пропорционально вязкости жидкости. Таким

образом уменьшается амплитуда колебаний зонда, которая несет информацию о вязкости используемой жидкости [18]. Существенным недостатком данной разработки являлась недостаточная чувствительность.

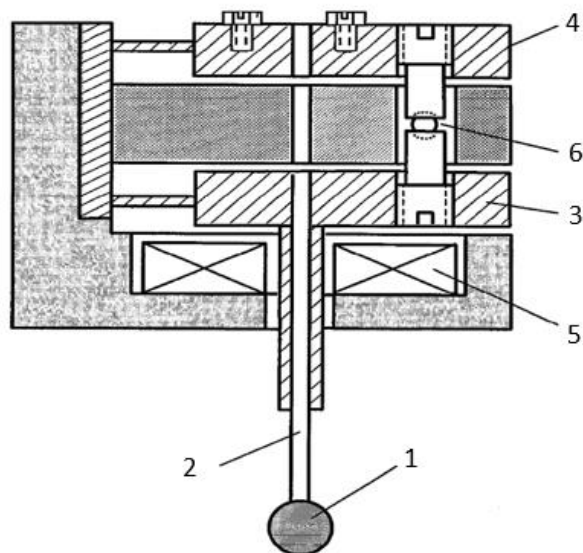


Рисунок 1.10 – Конструкция вибровискозиметрического датчика

### 1.3 Способы возбуждения колебаний в вибровискозиметре

Датчики на основе колебательных систем (КС) имеют широкое применение в различных областях техники. Конструкции и чувствительные элементы колебательных систем в таких датчиках весьма многообразны. Больше развитие в последнее время получили струнные датчики, пьезоэлектрические датчики, кантилеверы, а также камертонные датчики [19].

Во множестве технических приложениях датчики на основе КС применяются для контроля сред с меняющимися параметрами. Требование работы, при котором параметры КС изменяются за время порядка или меньше времени установления равновесных колебаний принято называть нестационарным режимом. Применение датчиков на основе КС в этих режимах работы наталкивается на ряд технических сложностей.

Применяют следующие методы возбуждения колебаний: механические, радиационные, лазерные, электромагнитные, магнитострикционные и пьезоэлектрические. В данном пункте будут рассмотрены некоторые из них.

### 1.3.1 Механический метод возбуждения

Механические возбудители колебаний знакомы уже давно и применяются в современной технике. Общий принцип действия механических возбудителей заключается в следующем: тело малых размеров (шарик) однократно или периодически ударяет по поверхности объекта исследования. Упругие деформации, которые появляются при ударе распространяются от места удара в виде упругих волн с широким спектром частот.

Механические (звук, вибрация), электромагнитные (свет, радиоволны, тепловые), смешанного типа (комбинации вышеперечисленных колебаний) [20].

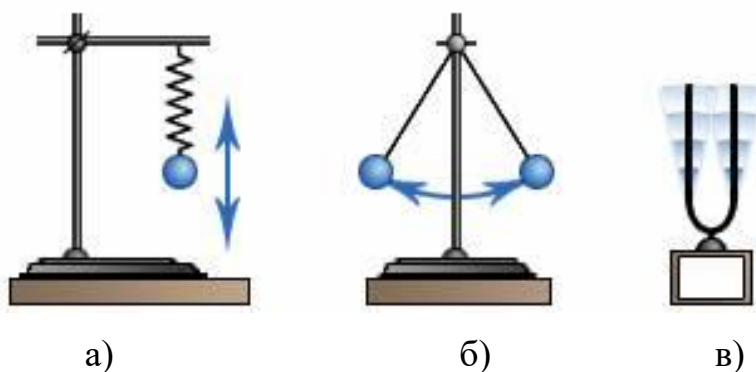


Рисунок 1.11– Варианты систем механического способа возбуждения ( а- пружинный маятник, б-физический маятник, в-датчик камертонного типа)

Для возбуждения ультразвуковых колебаний при измерениях в активной области исследовательского реактора успешно использовали шарики, которые сбрасываются на поверхность образца с определённой высоты. У этого метода имеется ряд достоинств. К примеру, простота, возможность возбуждения

широкого спектра частот колебаний большой амплитуды, малое время контакта возбудителя колебаний (шарика) с исследуемым образцом [21].

### **1.3.2 Радиационный метод возбуждения**

Такой метод основывается на локальном в пространстве и времени влиянии ионизирующих излучений на вещество. Возможны два основных механизма возбуждения. Первый - термоупругий, являющийся результатом локального выделения в веществе энергии, после чего следует разогрев, который сопровождается быстрым расширением вещества. Второй это динамический метод возбуждения, основанный на передаче механического импульса тормозящейся частицы веществу.

Природа рентгеновского излучения - электронное взаимодействие атомов. Рентгеновское излучение или х-лучи возникают в результате потери атомом внутреннего электрона (т.е. электрона на одном из внутренних электронных уровней). Данные способы возбуждения основаны на излучении, и в качестве источника рентгеновского излучения используют рентгеновские трубки. На рисунке 1.12, представлена схема рентгеновской трубки, где: 1 – катод, 2 - фокусирующие пластины, 3 - нить накала, 4 – анод, 5 - пучок электронов, 6 - поток рентгеновского излучения [22].

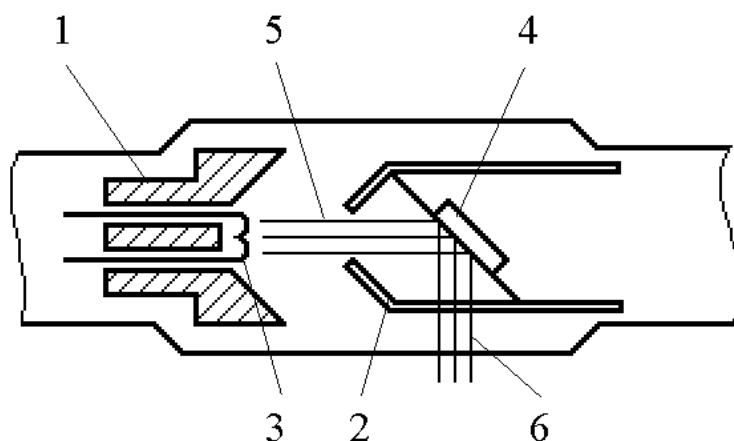


Рисунок 1.12 – Схема рентгеновской трубки

### 1.3.3 Магнитный и магнитоэлектрический метод возбуждения

Магнитный метод возбуждения вынужденных колебаний КС условно принято разделять на два способа: электромагнитный и магнитоэлектрический [23,24]. При первом способе возбуждения с помощью электромагнитной катушки (соленоида) формируется переменное магнитное поле, взаимодействующее с объектом (рисунок 1.13).

Переменный ток, пропускаемый через соленоид без постоянного тока подмагничивания, будет создавать в КС колебания на удвоенной частоте. А форма возбуждающей силы соответствует форме выпрямленного переменного тока.

При магнитоэлектрическом способе возбуждения таким же образом с помощью соленоида создается переменное магнитное поле. Единственное отличие заключается в том, что переменное магнитное поле взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита [25].

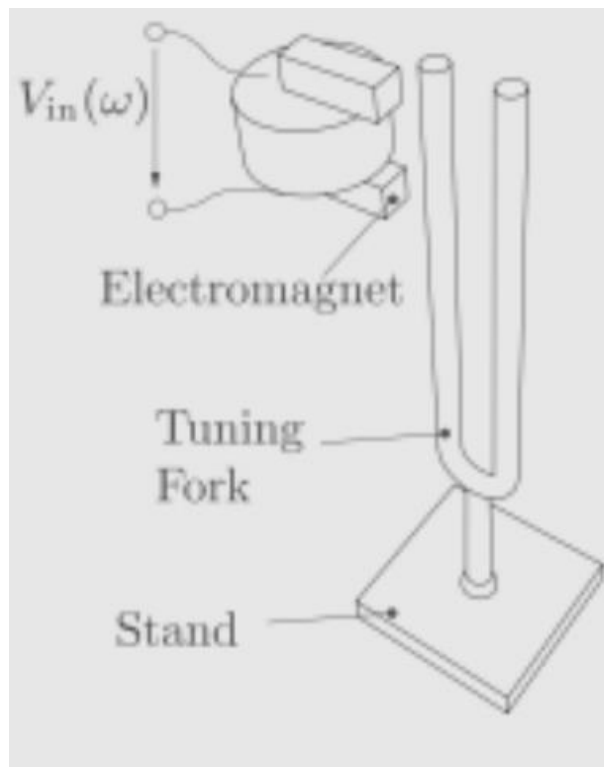


Рисунок 1.13 – Иллюстрация электромагнитного способа возбуждения колебательной системы

Магнитострикционный метод возбуждения колебаний заключается в том, что под действием магнитного поля на тело из ферромагнитного материала, геометрические размеры тела изменяются, в результате тело деформируется. Но если же ферромагнитный стержень сжимать или растягивать, то его намагниченность будет изменяться [26].

Магнитострикционный эффект обычно применяют для возбуждения ультразвуковых волн. Верхняя частота возбуждаемых колебаний ограничивается свойствами материала и составляет десятки мегагерц [24,25].

Таким образом, магнитострикция означает изменение формы и размеров тела при намагничивании. Если к намагниченному стержню подвести переменный электрический ток, то стержень начнет вибрировать.

Изменяя подводимое напряжение, меняется и частота колебаний стержня. Так получают колебания ультразвуковой частоты. В качестве стержня используют железо, никель, кобальт и их сплавы. В описанном методе используют магнитострикционный преобразователь, типичная конструкция которого представлена на рисунке 1.14, где: 1-лента магнитострикционного материала, свернутой в тело цилиндрической формы; 2-сквозное окно, 3-обмотка возбуждения; 4-сегменты цилиндра 1. Число сквозных окон 2 может быть больше одного. Торцы 5 цилиндра 1 являются излучающей поверхностью [26].

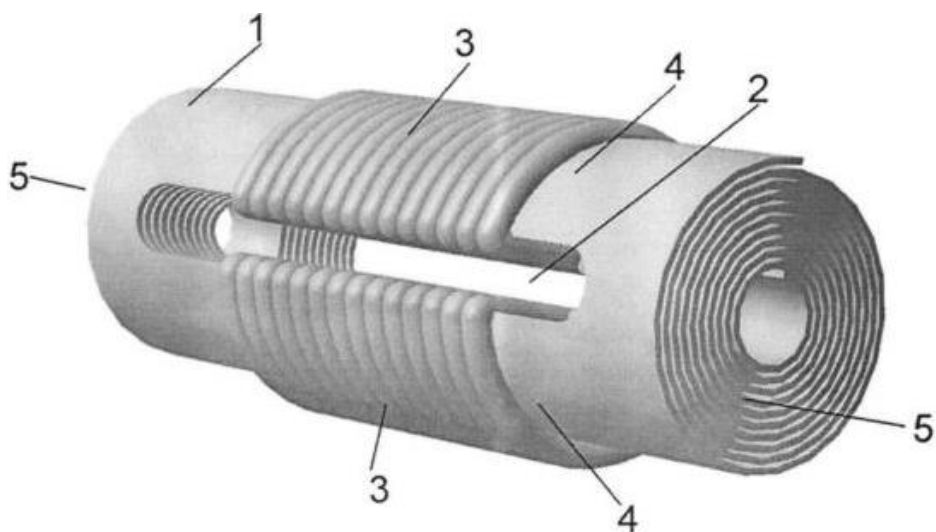


Рисунок 1.14 – Схема магнитострикционного преобразователя

Так же кроме стержня можно применять трубу; пакет, из тонких пластин, склеенных между собой. Этот способ в основном используется для механической обработки детали и для контроля резины и бетона.

### 1.3.4 Пьезоэлектрический метод возбуждения

Данный возбуждающий метод основан на использовании обратного пьезоэффекта, который заключается в том, что кристаллические вещества (пьезоэлементы) деформируются под действием приложенного к ним электрического напряжения [27]. Пьезоэлемент – это электромеханический



преобразователь, который изготавливается из пьезоэлектрических материалов. Пьезоэлементы могут быть разной формы и определенной ориентации относительно кристаллографических осей. Благодаря им механическая энергия преобразуется в электрическую (прямой пьезоэффект), а электрическая в механическую (обратный пьезоэффект).

Существует, общепринята в практике, условная классификация типовых пьезоэлементов в зависимости от их конфигурации. К примеру, пластина (plate), диск (disc), кольцо (ring) и т.д. Такое разнообразие форм и размеров обеспечивается благодаря технологии изготовления, как и у любых других керамических изделий (посуда, изоляторы и др.) [28]. На рисунке 1.15 показан вариант реализации, который используется в анализируемом в работе вибровискозиметрическом датчике [29].

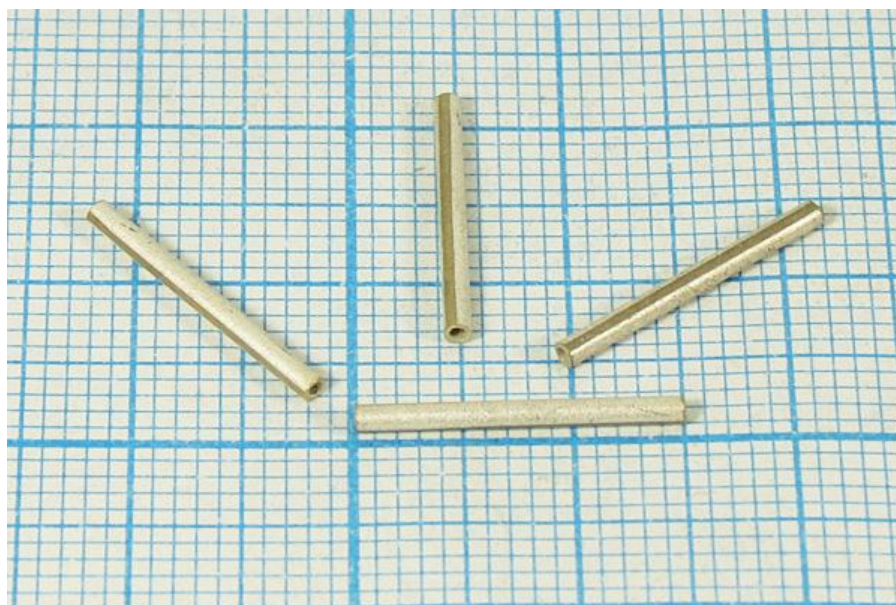


Рисунок 1.15 – Пьезокерамический элемент в форме трубки

Именно изменение полярности приложенного напряжения на противоположную меняет деформацию сжатия на деформацию растяжения. Известно, что если некоторые кристаллы (кварц, турмалин, сегнетову соль) подвергать деформации, то на определенных поверхностях кристалла выделяются равные и противоположные по знаку электрические заряды,

пропорциональные упругим механическим деформациям [30]. Наоборот, если к тем же поверхностям кристалла приложить переменное электрическое напряжение, то кристалл будет деформироваться в соответствии с изменением напряжения. На рисунке 1.16 показаны направления и ориентация осей пьезоэлектрического материала. Оси 1-3 эквиваленты соответственно осям X, Y, Z. Оси 4,5,6-это оси вращения. Направление оси 3 характеризует направление поляризации. Это направление устанавливается во время производства посредством высокого постоянного напряжения, которое создается между электродами [31].

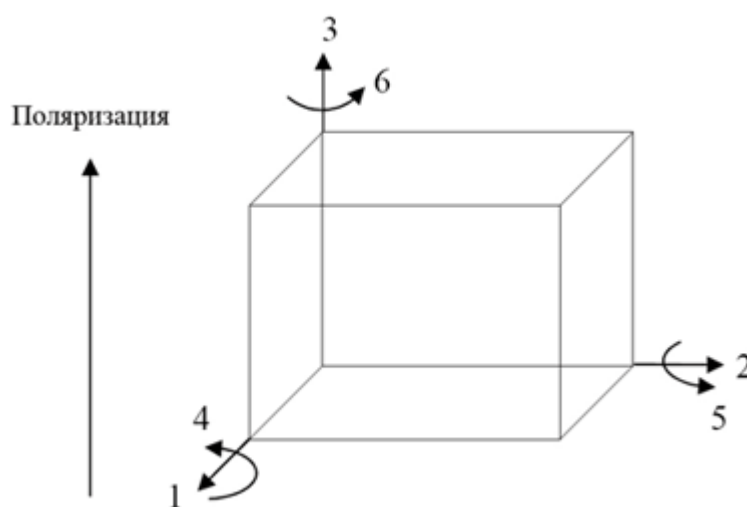


Рисунок 1.16 – Направление и ориентация осей пьезоэлектрического материала

Первое явление (появление заряда при деформации) называется прямым пьезоэффектом, а второе — обратным. На рисунке 1.17 показана схема вибрационного стенда, в котором возбудитель состоит из пьезокерамических колец. Кольца соединены последовательно с использованием клея, их электрическое соединение выполнено по параллельной схеме. Кольца поляризованы в осевом направлении [32]. От звукового генератора через усилитель напряжения на кольца подается переменное напряжение. При этом амплитуда перемещения цилиндра вдоль оси будет соответствовать сумме

амплитуд перемещения всех колец. Верхняя металлическая пластина является столом для крепления испытуемого прибора. Число пьезокерамических колец достигает нескольких десятков, но при этом требуется весьма тщательная центровка испытуемого прибора, чтобы избежать возможного появления вибрации в поперечном направлении [33].

Прямой и обратный пьезоэффект линейны и описываются линейными зависимостями, которые связывают электрическую поляризацию  $P$  с механическим напряжением  $\sigma$ :

$$P = d\sigma. \quad (1.17)$$

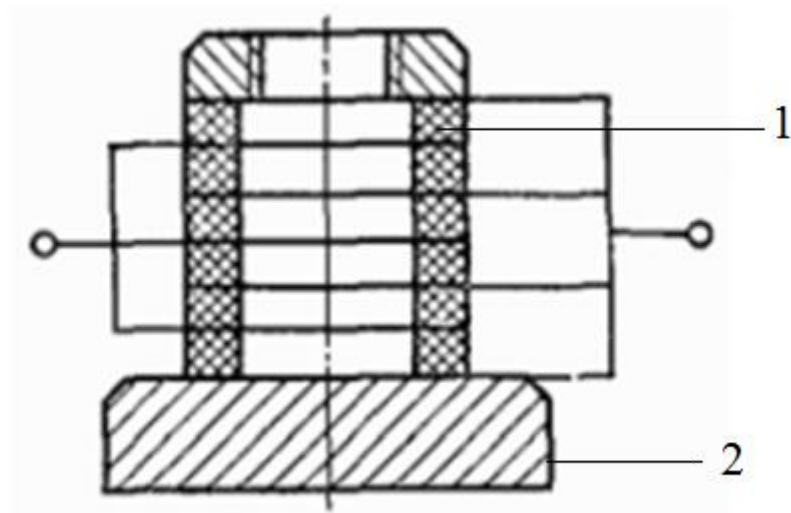
Данная зависимость это уравнением прямого пьезоэффекта. Коэффициент пропорциональности  $d$  характеризуется как пьезоэлектрический модуль (пьезомодулем), и он служит мерой пьезоэффекта [34]. Обратный пьезоэффект описывается зависимостью:

$$r = dE. \quad (1.18)$$

где  $r$  - деформация;  $E$  - напряженность электрического поля.

Большие значения пьезоэлектрического модуля приводят к большим механическим смещениям. Для определения напряжения на электродах существует формула:

$$U = \frac{q}{C}. \quad (1.19)$$



1-пьезоэлементы, 2-основание

Рисунок 1.17 – Схема вибростенда с пьезоэлектрическим возбуждением  
вибрации

Здесь, в свою очередь:

$$q = Fg. \quad (1.20)$$

Из этой формулы видно, что в отличие от заряда, напряжение зависит от размеров пьезоэлемента. Пьезоэлектрическая константа давления  $g_{ij}$  – отношение полученного напряжения к приложенному давлению

$$U = g \cdot d \cdot p. \quad (1.21)$$

Здесь  $U$  – полученное напряжение,  $d$  - толщина,  $p$  – приложенное давление.

Таким образом, изменение индексов у пьезоэлектрической константы давления, характеризует определённые процессы. К примеру, индекс “15” показывает, что приложенное напряжение является сдвиговым и результирующее электрическое поле перпендикулярно к оси поляризации.

Высокое значение  $g_{ij}$  ведет к большим выходным напряжениям, что является желательным для сенсоров [34].

#### **1.4 Выводы**

Таким образом, в первой главе был рассмотрен физический смысл понятия вязкости; физические величины, используемые для описания вязкостных свойств жидкости. Проведен комплексный анализ существующих методов возбуждения колебательных систем и классификации вискозиметрических датчиков, который показал наиболее подходящие по точности и условиям параметры. Были проанализированы плюсы и минусы каждого из методов, а также подтверждено, что вибровискозиметрические датчики имеют более высокий класс точности в сравнение с другими.

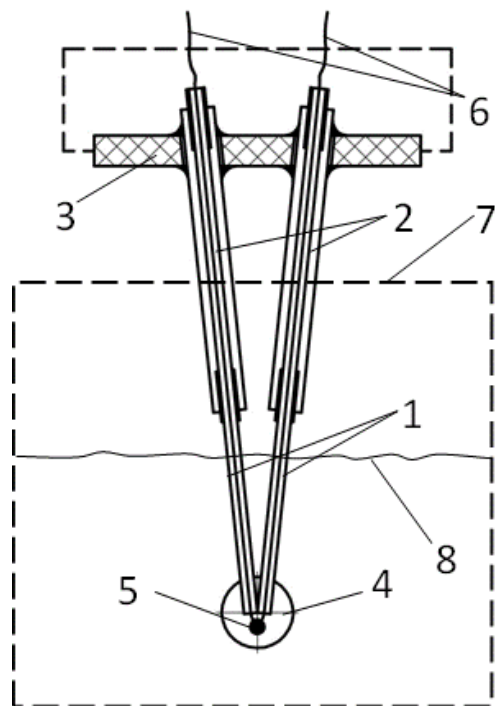
## **2 Моделирование и экспериментальное исследование характеристик вибровискозиметрического датчика**

Рассматривается колебательная система, составляющая основу вибровискозиметрического датчика. Датчик работает в составе измерительной системы, структурная схема которой представлена в п. 2.3.4. Целью данной главы является анализ конструкции датчика, разработка модели и, соответственно, моделирование процессов, происходящих в колебательной системе датчика.

### **2.1 Конструкция датчика**

Объектом исследований являлся вибровискозиметрический датчик (ВВД) с колебательной системой на основе пьезотрубок, разработанный в УФИРЭ им. В.А. Котельникова в ходе работ по исследованию свойств многокомпонентных жидкостей [2]. Конструкция датчика в упрощенном варианте представлена на рисунке 2.1. Колебания зонда, который закреплён на капиллярах, возбуждаются с помощью одной из пьезотрубок-актюатора, к которой прикладывается переменное напряжение с частотой, соответствующей собственной частоте колебательной системы. Колебания зонда происходят перпендикулярно плоскости, проходящей вдоль осей пьезотрубок. Вторая пьезотрубка играет роль детектора положения зонда. Сигнал (электрический заряд), генерируемый пьезотрубкой-датчиком, прямо пропорционален величине ее деформации, вызванной колебаниями зонда. Это позволяет использовать данный сигнал для получения информации о текущих значениях амплитуды и фазы колебаний зонда.

В связи со сложной конструкцией системы, состоящей из нескольких колебательных звеньев, было решено проверить характер колебаний данной системы численным методом. Для анализа данного процесса было решено провести математическое моделирование системы в среде Mathcad.



1 – стеклянные капилляры, 2 – пьезотрубки, 3 – жесткое основание, 4 – измерительный сферический зонд, 5 – измерительный спай термопарного датчика температуры, 6 – выходы термопары, 7 – кювета с исследуемой жидкостью, 8 – уровень жидкости

Рисунок 2.1 – Конструкция датчика

## 2.2 Разработка физической модели датчика

Первой задачей являлось создание физической модели ВВД. На рисунке 2.2 представлена наиболее оптимизированная модель, где:  $m_1$  - масса зонда,  $m_{01}$  - масса пьезотрубки-актюатора,  $m_{02}$  - масса пьезотрубки-детектора,  $k_{01}$  - жесткость пьезотрубки-актюатора,  $k_{02}$  - жесткость пьезотрубки-детектора,  $k_{11}$  и  $k_{12}$  - жесткость капилляров,  $x_1$  - перемещение зонда,  $x_{01}$  - перемещение пьезотрубки-актюатора относительно зонда,  $x_{02}$  - перемещение пьезотрубки-детектора относительно зонда,  $F_1(t)$  - внешняя возбуждающая сила,  $F_{\text{вязк}}$  - сила вязкого трения в исследуемой жидкости.

Ключевой особенностью данной модели является то, что внешнее воздействие прикладывается не к самому сферическому зонду, а к основанию пьезотрубки-актюатора.

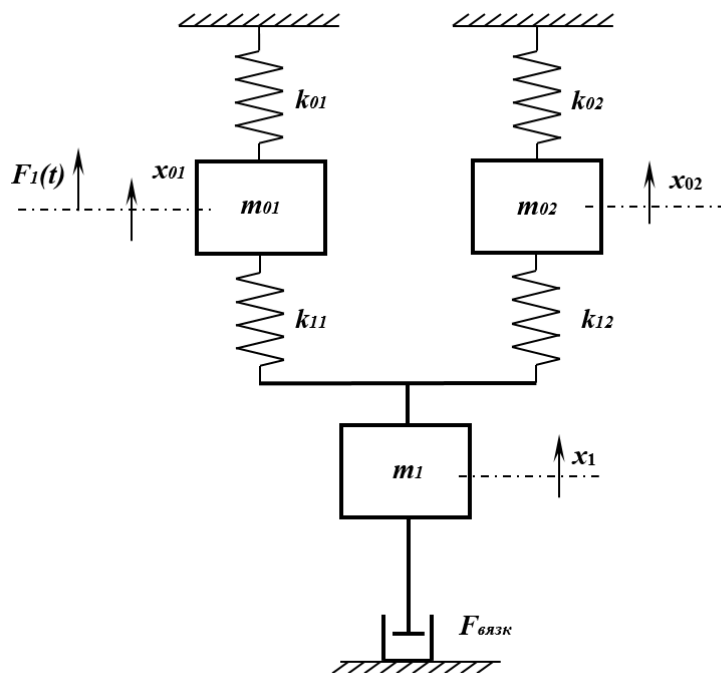


Рисунок 2.2 – Физическая модель датчика

На основе полученной физической модели была составлена система дифференциальных уравнений колебательной системы. При составлении использовалось уравнение равнодействующих сил:

$$\bar{F} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \dots + \bar{F}_N = \sum_{i=1}^N \bar{F}_i \quad (2.1)$$

В данном случае колебательная система состоит из трех элементов, связанных между собой упругими связями. Первое дифференциальное уравнение описывает поведение пьезотрубки-актюатора: на актюатор действует возбуждающая электрическая сила  $F_1(t)$ , противодействует ей сила вязкого трения, перемещение данного элемента, а так же сила относительно зонда. Второе описывает поведение зонда: указывающее на его перемещение, перемещение трубок относительно зонда и силу трения. Третье описывает поведение пьезотрубки-детектора, в котором указано его перемещение и так же сила относительно зонда. Система дифференциальных уравнений колебательной системы выглядит следующим образом:



$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k_1 \cdot (x_1 - x_3) + n_{\text{вязк}} \frac{dx_1}{dt} = F_1(t) \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} + k_1 \cdot (x_3 - x_1) + n_{\text{мп}} \frac{dx_3}{dt} + k_2 \cdot (x_3 - x_2) + k_3 \cdot x_3 = 0 \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k_2 \cdot (x_2 - x_3) = 0 \end{array} \right. \quad (2.2)$$

где  $m_1$  – масса зонда;  $m_2$  – масса пьезотрубки- детектора;  $m_3$  – масса пьезотрубки-актюатора;  $k_1$  – жесткость зонда;  $k_2$  – жесткость пьезотрубки- детектора;  $k_3$  – жесткость пьезотрубки-актюатора;  $x_1$  – перемещение зонда;  $x_2$  – перемещение пьезотрубки-актюатора относительно зонда;  $x_3$  – перемещение пьезотрубки-детектора относительно зонда;  $F_1(t)$  – внешняя возбуждающая сила.

Сила вязкого трения в исследуемой жидкости определялись следующим выражением:

$$F_{\text{вязк}} = -n_{\text{вязк}} \frac{dx_1}{dt} \quad (2.3)$$

Сила трения определялась данным выражением:

$$F_{\text{мп}} = -n_{\text{мп}} \frac{dx_3}{dt} \quad (2.4)$$

Масса элементов рассчитывалась следующим образом:

$$m = \rho \cdot V \quad (2.5)$$

$$V = \pi r^2 h \quad (2.6)$$

$$m = \pi r^2 h \rho \quad (2.7)$$

Коэффициент жесткости рассчитывался по данной формуле:

$$k = \frac{F}{l} = \frac{m \cdot g}{l} \quad (2.8)$$

При расчете массы и коэффициента жесткости использовались численные значения параметров элементов реальной колебательной системы вибровискозиметрического датчика и справочные данные, приведенные в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Параметры элементов колебательной системы

Расчёт параметров элементов колебательной системы:

	Длина, м	Масса, кг	Диаметр, м		Жесткость, Н/м	Материал
			Внутренний	Внешний		
Капилляр	0,0285	$0,0404 \times 10^{-3}$	0,00028	0,00045	$1.3 \times 10^4$	Боросиликатное стекло
Пьезотрубка	0,015	0,0075	0,0008	0,00133	$4.9 \times 10^4$	Пьезокерамика
Зонд	-	0,0034	-	0,004	$8.33 \times 10^4$	Серебро

1) Масса капилляра

$$m = \pi r^2 h \rho$$

$$m = 0,0404 \times 10^{-3} (\text{кг})$$

2) Коэффициент жесткости капилляра

$$k = \frac{F}{l} = \frac{m \cdot g}{l}$$

$$k_1 = 1.3 \cdot 10^4 (\text{Н/м})$$

3) Коэффициент жесткости пьезотрубки

$$k_2 = 4.9 \cdot 10^4 (\text{Н/м})$$

4) Коэффициент жесткости зонда

$$k_3 = 8.33 \cdot 10^4 (\text{Н/м})$$

## **2.3 Результаты моделирования**

### **2.3.1 Анализ свободных колебаний в вибровискозиметрическом датчике**

Для исследования характеристик датчика было решено использовать метод свободных колебаний. Он заключается в следующем: в модели в качестве начальных, используются такие условия, при которых зонд выводится из положения равновесия и отпускается, после чего начинаются свободные колебания в системе. Для анализа временных характеристик было решено использовать Фурье преобразование и исследовать полученные спектры.

На первом этапе производился анализ свободных колебаний различных элементов системы. Для этого в качестве начальных условий использовалось отклонение одного из элементов из положения равновесия.

Можно наблюдать затухающий характер колебаний зонда на рисунке 2.3, где: М1-колебания зонда, М01-колебания пьезотрубки-актюатора, М02-колебания пьезотрубки-детектора.

Колебания носят сложный характер, в связи с этим было решено исследовать спектр колебаний. Для выявления собственных частот колебательной системы было решено проанализировать спектр свободных колебаний.

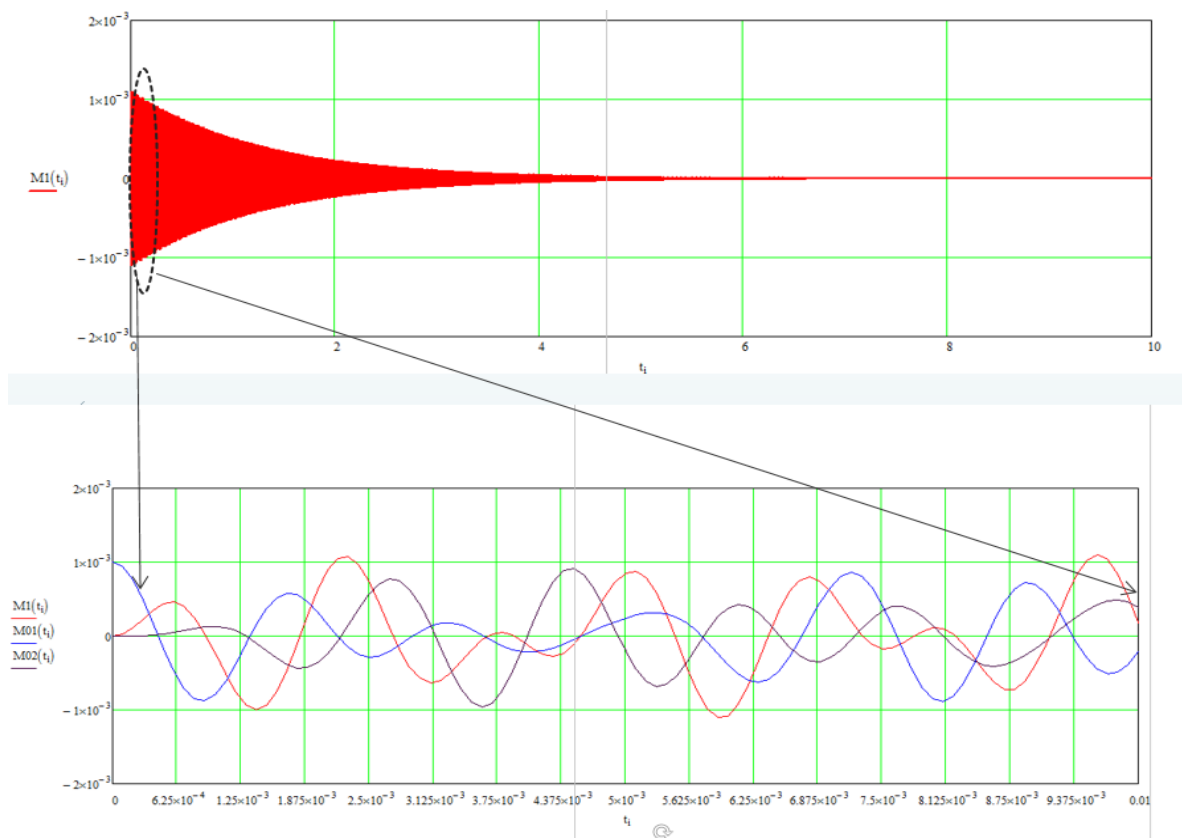


Рисунок 2.3 – Свободные колебания элементов системы

Это связано с тем, что реализация сканирования по частоте внешней возбуждающей силы требует длительного времени расчета, особенно когда не известны области частот, где нужно искать. Для получения спектра колебаний было использовано быстрое преобразование Фурье. Пики в спектре характеризуют собственные частоты колебаний каждого элемента колебательной системы.

Дальнейший анализ полученных спектров показал, какой именно пик относится к определенному элементу колебательной системы. Путем поочередного изменения массы каждого колебательного элемента, выяснилось, что первый пик в диапазоне значений 315-330 моделирует поведение самого зонда (рисунок 2.6). Второй пик при значениях 430-450 описывает действие пьезотрубки-актюатора (рисунок 2.7), и наконец, третий пик при 520-540 относится к пьезотрубки-датчику. Красная линия характеризует колебательную

систему без изменений, синий пунктир-колебательная система с измененными параметрами.

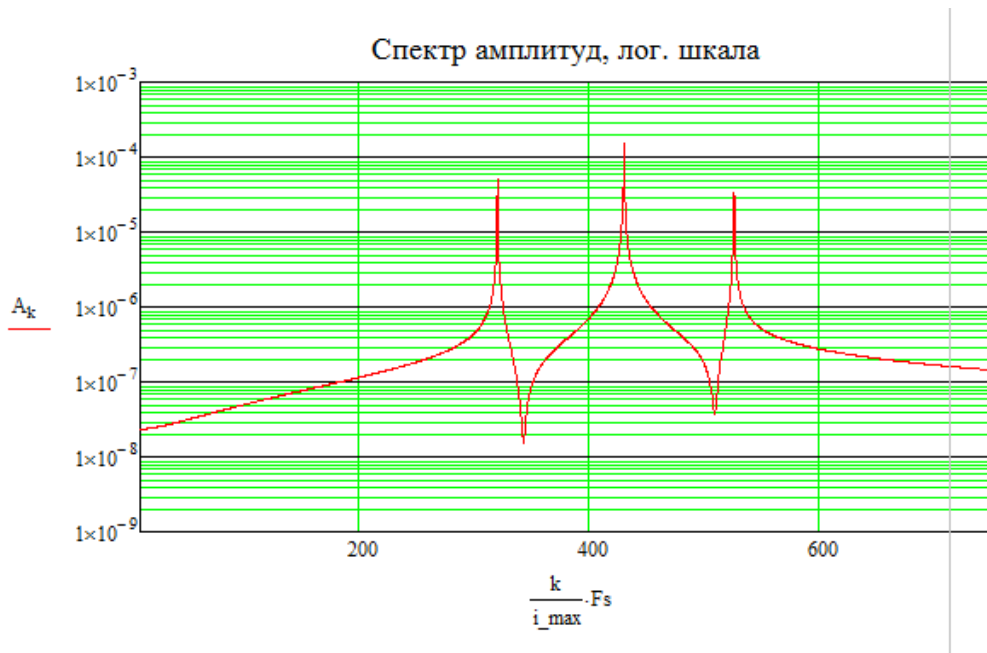


Рисунок 2.4 – Спектр амплитуд (логарифмическая шкала)

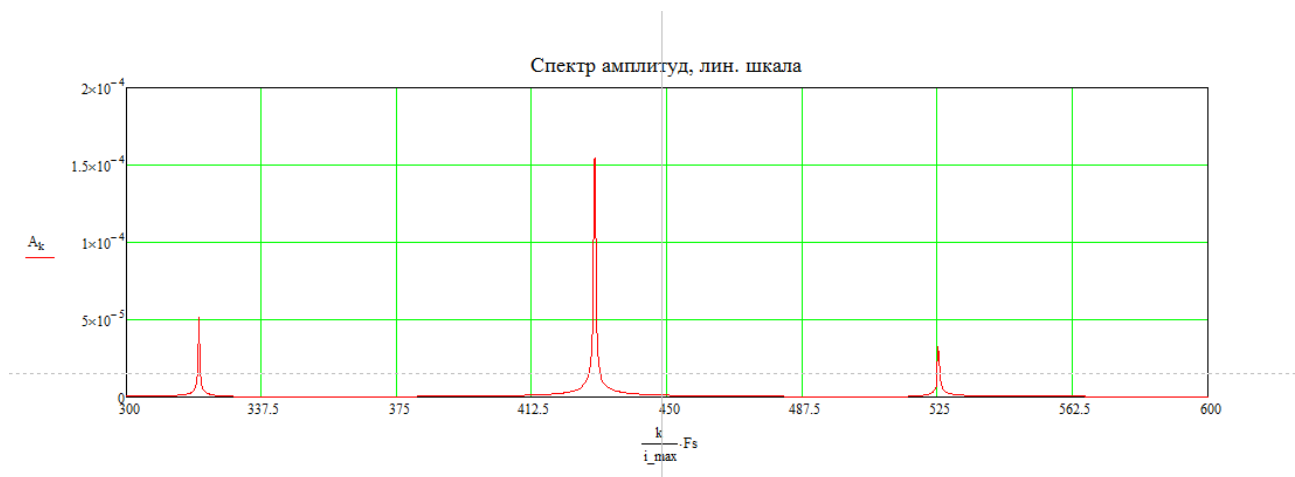


Рисунок 2.5 – Спектр амплитуд (линейная шкала)

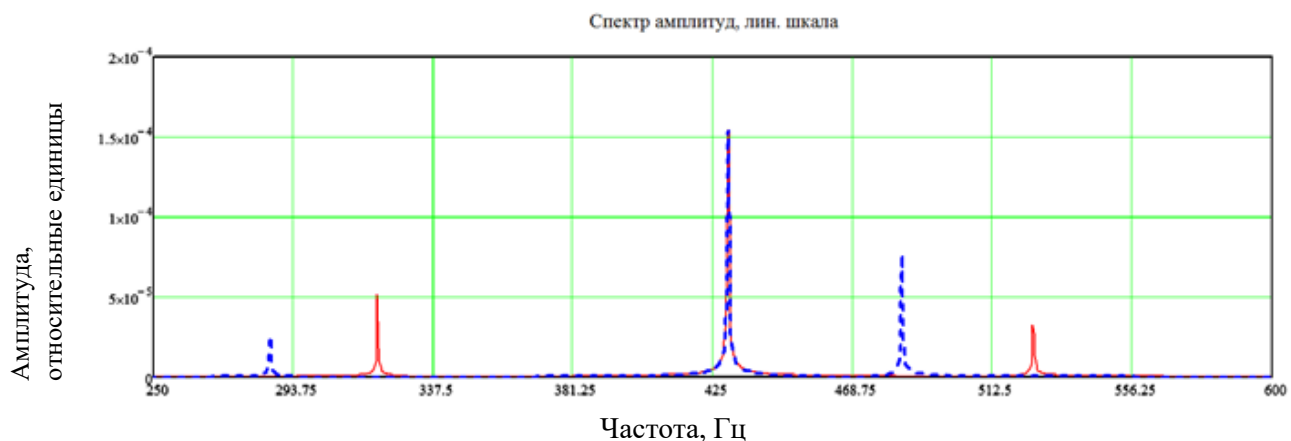


Рисунок 2.6 – Спектр амплитуд (изменение массы зонда)

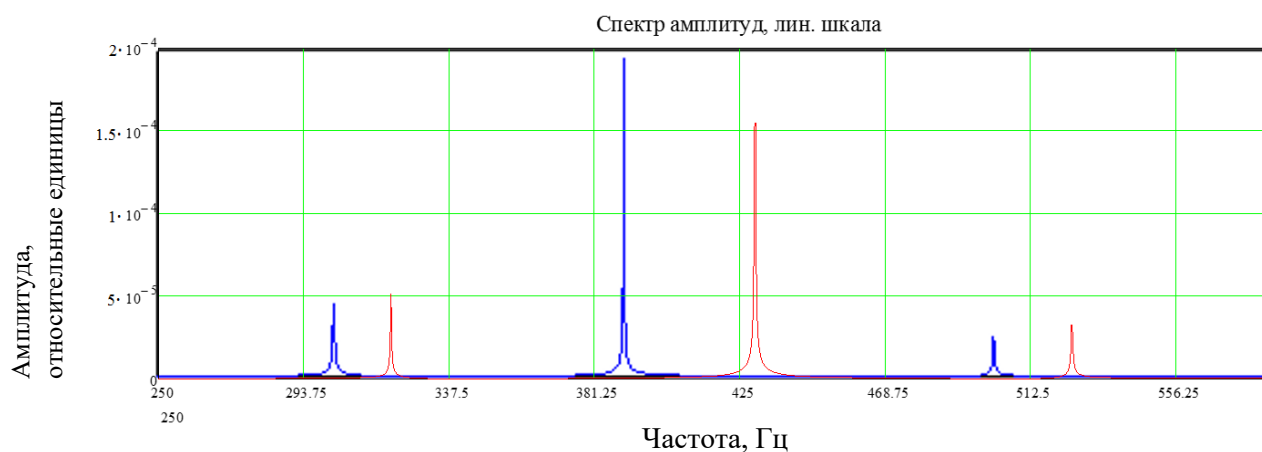


Рисунок 2.7 – Спектр амплитуд (изменение массы пьезотрубки-актюатора)

### 2.3.2 Анализ влияния параметров элементов

#### вибровискозиметрического датчика на его характеристики

##### 2.3.2.1 Анализ влияния массы зонда

На данном этапе исследований проводилась проверка влияния массы зонда на характеристики ВВД. Для этого масса зонда в модели менялась с шагом  $0,2 \cdot 10^{-3}$  (кг). Было произведено 10 измерений, начальная (красная линия) и конечная (синий пунктир) картины представлены на рисунке 2.8. В результате обработки спектров была получена зависимость частоты от массы зонда,

показанная на рисунке 2.9, а так же зависимость амплитуды от массы зонда на рисунке 2.10.

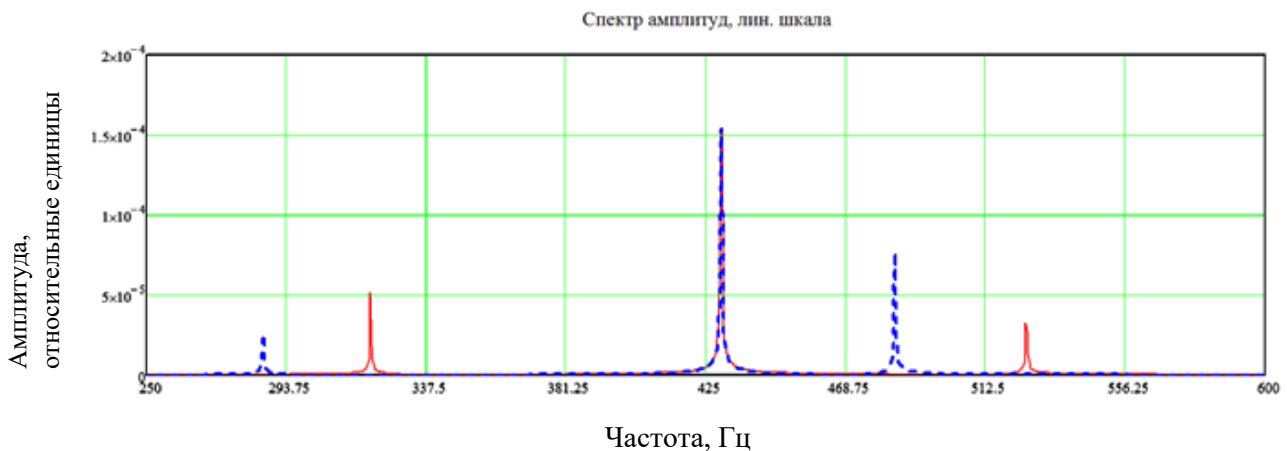


Рисунок 2.8– Спектр амплитуд при изменении массы зонда

С помощью полученных спектров была построена зависимость. Анализируя полученную зависимость, можно сделать вывод о том, что с увеличением массы зонда частота собственных колебаний уменьшается. Для анализа результатов было решено сравнить полученную зависимость (синяя линия) с теоретической (красная линия). При этом использовалось выражение для собственной частоты колебательной системы с одной степенью свободы. Для данной системы подбирался коэффициент жесткости таким образом, чтобы при массе зонда 3,4 г собственная частота совпадала со значением 320,74 Гц, полученным при моделировании.

Характер зависимостей одинаковый, однако, имеются расхождения в изменении крутизны. Возможно, данные изменения связаны с тем, что реальная система имела три степени свободы, а теоретическая зависимость была построена для системы с одной степенью свободы. Таким образом, меньший наклон вызван влиянием других элементов колебательной системы.

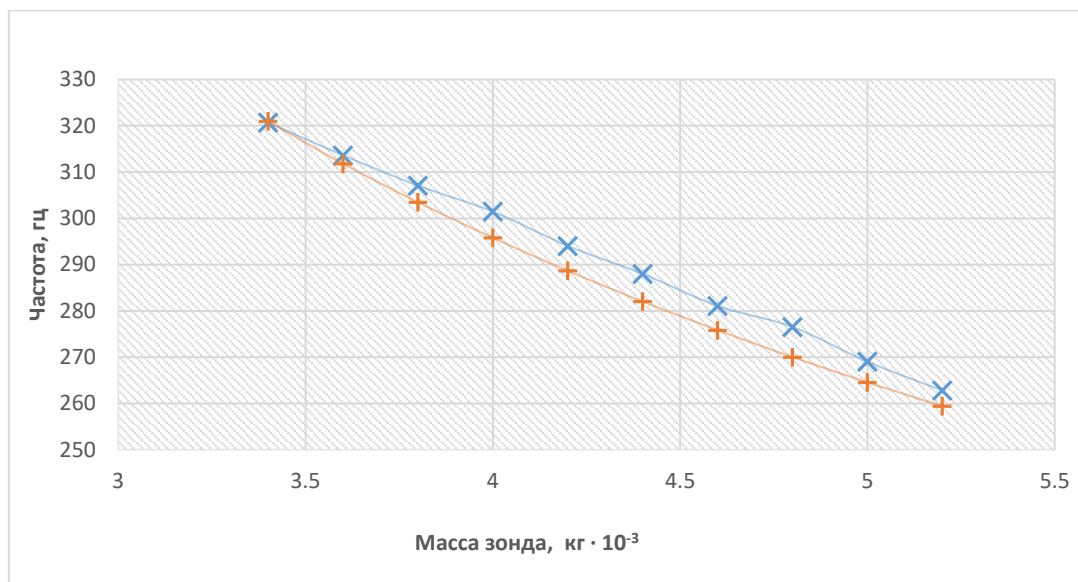


Рисунок 2.9 – Зависимость частоты от массы зонда

При выявлении зависимости амплитуды от массы зонда возникают некоторые особенности. Предыдущая зависимость частоты от массы зонда была выявлена из спектра колебаний. Для определения амплитуды это не подходит. Так как для получения спектра в преобразовании Фурье используется определенный временной участок, в пределах которого колебания затухают незначительно (если значительно, то получается некоторая средняя амплитуда за данный интервал времени). Поэтому было решено провести измерения в режиме моделирования вынужденных колебаний.

Проанализировав полученную зависимость, видно, что с увеличением массы зонда увеличивается амплитуда. Таким образом, можно сделать вывод о том, что увеличение амплитуды колебаний под действием вынуждающей силы связано с большим количеством запасенной энергии. Максимальная амплитуда может быть достигнута при определенных условиях: малое значение коэффициента затухания колебаний, совпадение частот вынуждающей силы и собственных колебаний тела.



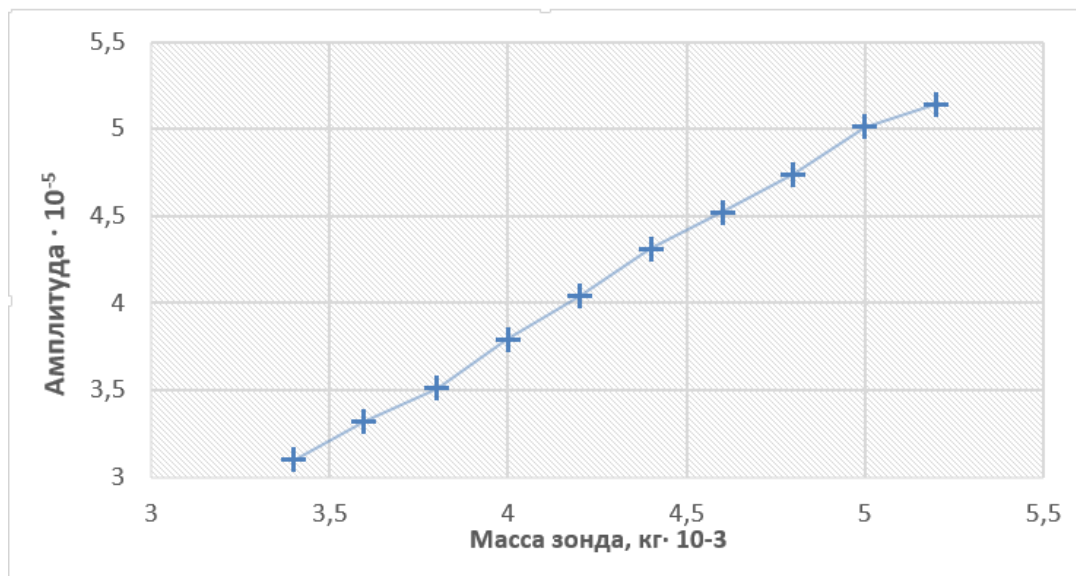


Рисунок 2.10 – Зависимость амплитуды от массы зонда

### 2.3.2.2 Изменение длины пьезотрубок

Изменение длины пьезотрубки приводит как к изменению ее массы, так и к изменению коэффициента жесткости. Для каждого значения длины трубки были рассчитаны соответствующие параметры, и использованы в процессе моделирования. Длина пьезотрубок менялась с шагом  $0,2 \cdot 10^{-3}$  (м). Было произведено 10 измерений, начальная (красная линия) и конечная (синий пунктир) картины представлены на рисунке 2.11. Результаты моделирования представлены в виде зависимости на рисунке 2.12.

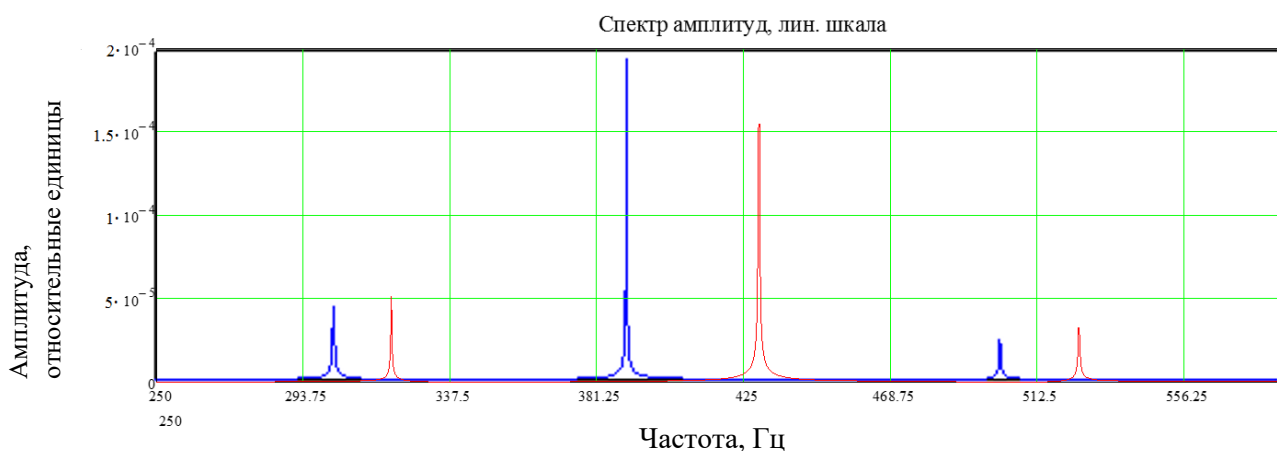


Рисунок 2.11 – Спектр амплитуд (линейная шкала) при изменении длины пьезотрубки

С помощью полученных спектров была построена зависимость частоты от длины пьезотрубки. Для анализа результатов так же было решено сравнить полученную зависимость (синяя линия) с теоретической (красная линия). При этом использовалось выражение для собственной частоты колебательной системы с одной степенью свободы. Для данной системы подбирался коэффициент жесткости и масса пьезотрубки таким образом, чтобы соответствовать изменяемой длине пьезотрубки, а также чтобы собственная частота совпадала со значением 426,2 Гц, полученным при моделировании.

Характер зависимостей одинаковый, однако имеются расхождения в изменении наклона. Возможно, данные изменения связаны с тем, что реальная система имела три степени свободы, а теоретическая зависимость была построена для системы с одной степенью свободы. Таким образом меньший наклон вызван влиянием других элементов колебательной системы.

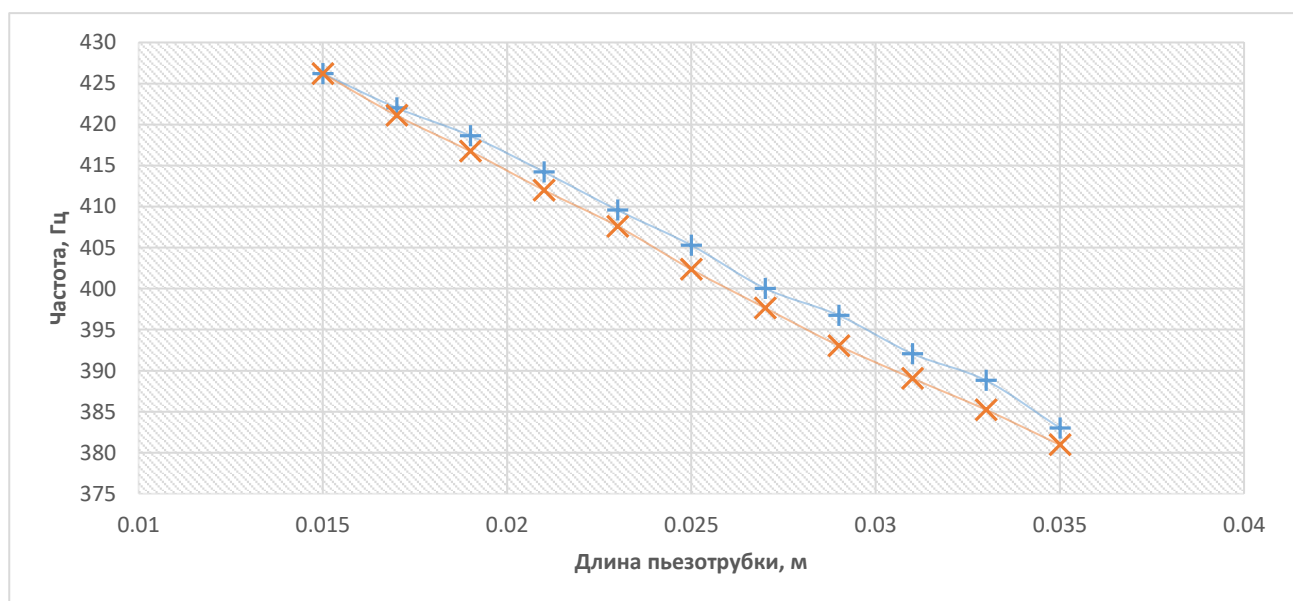


Рисунок 2.12 – Зависимость частоты от длины пьезотрубки

При выявлении зависимости амплитуды от длины пьезотрубки так же возникают некоторые особенности. Измерения проводятся в режиме моделирования вынужденных колебаний.

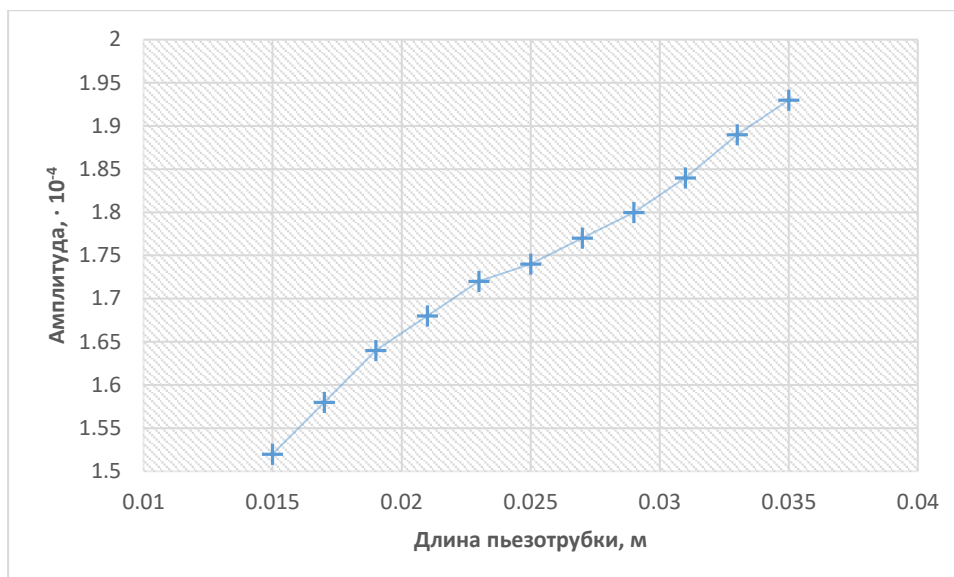


Рисунок 2.13 – Зависимость амплитуды от длины пьезотрубки

Проанализировав полученную зависимость, видно, что с увеличением длины пьезотрубки-актюатора увеличивается амплитуда. Таким образом, можно сделать вывод о том, что увеличение амплитуды колебаний под действием вынуждающей силы связано с большим количеством запасенной энергии. Максимальная амплитуда может быть достигнута при определенных условиях: малое значение коэффициента затухания колебаний, совпадение частот вынуждающей силы и собственных колебаний тела.

### 2.3.3 Анализ влияния исследуемой жидкости на характеристики вибровискозиметрического датчика

#### 2.3.3.1 Изменение коэффициента вязкости жидкости

С использованием полученной информации о значениях собственных частот колебаний было проведено исследование амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) колебательной системы путем сканирования по частоте внешней возбуждающей силы (режим вынужденных колебаний). Амплитудно-частотная характеристика-зависимость амплитуды выходного сигнала системы от частоты гармонического сигнала, поступающего на ее вход. На графике АЧХ в декартовых координатах по оси абсцисс откладывается частота, а по оси

ординат — отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала системы.

Обычно для оси частоты используется логарифмический масштаб, из-за того что диапазон частот может изменяться в достаточно больших пределах (от единиц до миллионов герц или рад/с). В том случае, когда логарифмический масштаб используется и на оси ординат, АЧХ принято называть логарифмической амплитудно-частотной характеристикой [35].

Представлены АЧХ колебательной системы зонда. АЧХ получены при различных значениях вязкости жидкости, в которую был погружен зонд. На основе данных можно четко выявить зависимость амплитуды колебаний и добротности от вязкости. Добротность — свойство колебательной системы, определяющее полосу резонанса и показывающее, во сколько раз запасы энергии в системе превышают потери энергии за один период колебаний. Таким образом получается, что чем выше добротность колебательной системы, тем меньше потери энергии за каждый период и тем медленнее затухают колебания. Очевидно, что чем больше вязкость жидкости, тем меньше становится добротность.

В ходе исследования изменялся коэффициент вязкости. Было произведено 11 измерений, начальная и конечная картины представлены на рисунках 2.14, 2.15

АЧХ зонда при различных значениях вязкости  $C_v$ :

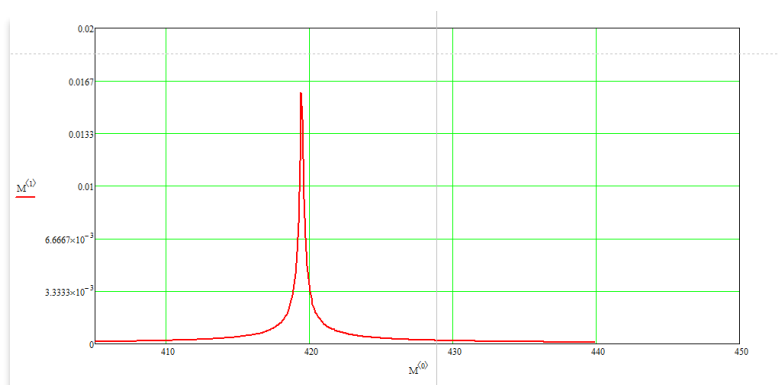


Рисунок 2.14 – Коэффициент вязкого трения 0,01

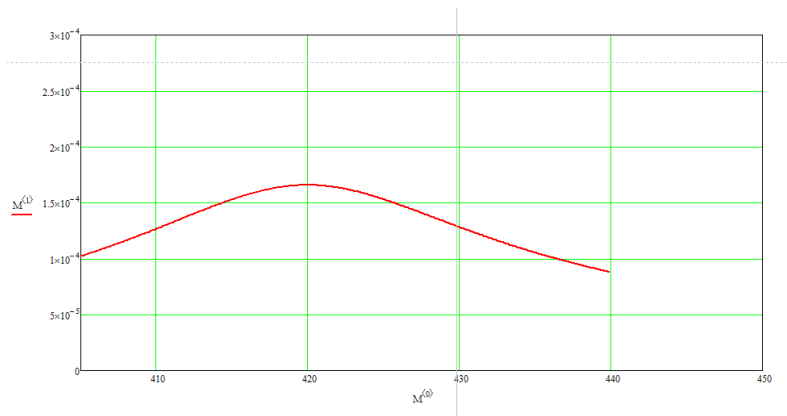


Рисунок 2.15 – Коэффициент вязкого трения 1

С помощью полученных значений была построена зависимость добротности от коэффициента вязкости.

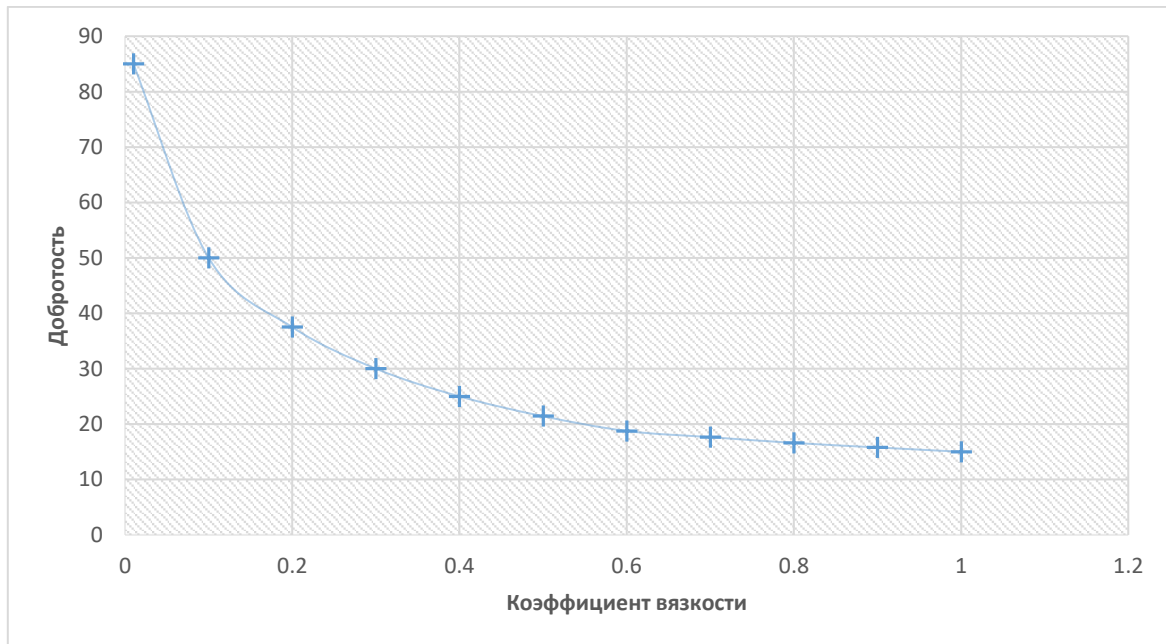


Рисунок 2.16 – Зависимость добротности от коэффициента вязкости

Анализируя полученную зависимость, можно увидеть, что с увеличением коэффициента вязкости уменьшается добротность колебательной системы.

### 2.3.3.2 Изменение присоединенной массы

Присоединенная масса - фиктивная масса, которая присоединяется к массе движущегося в жидкости тела для количественной характеристики инерции

окружающей его жидкой среды. При неустановившемся поступательном движении тела (в отличие от установившегося движения) возникает сопротивление жидкости, пропорциональное ускорению движения тела и обусловленное увлечением среды, окружающей тело. Физический смысл заключается в том, что если присоединить к телу, которое движется в жидкости, дополнительную массу (равную массе жидкости, увлекаемой телом), то закон движения в жидкости будет таким же, как в пустоте [36]. Изменение присоединенной массы теоретически должно изменять частоту колебаний зонда. Очевидно, что полученные результаты будут совпадать с результатами, полученными при моделировании изменения массы зонда. Единственное отличие будет заключать в том, что в реальных условиях диапазон изменения массы намного меньше.

#### **2.3.4. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными**

Ранее в УФИРЭ им. Котельникова экспериментально был проведен ряд измерений на вибровискозиметрическом датчике с использованием некоторых жидкостей.

Вибровискозиметрический датчик предполагает работу в составе измерительной установки. Для его работы требуются элементы, которые обеспечивают возбуждение колебаний, а также элементы, обеспечивающие измерение параметров колебаний, таких как амплитуда, частота, разность фаз между сигналом возбуждения и сигналом, соответствующим отклонению зонда от положения равновесия [2]. Структурная схема измерительной установки показана на рисунке 2.17.

Сигнал возбуждения колебаний, формируемый синтезатором частоты, поступает на усилитель, который обеспечивает работу на емкостную нагрузку пьезотрубки-актюатора вибровискозиметрического датчика. Начинаются колебания зонда вибровискозиметрического датчика. Пьезотрубка-датчик

преобразует колебания зонда в электрический сигнал. В связи с тем, что формируемый пьезотрубкой сигнал имеет малую амплитуду, для усиления данного сигнала используется дифференциальный усилитель. Это обеспечивает хорошее подавление синфазных помех, что важно, так как пьезоэлементы имеют высокое выходное сопротивление.

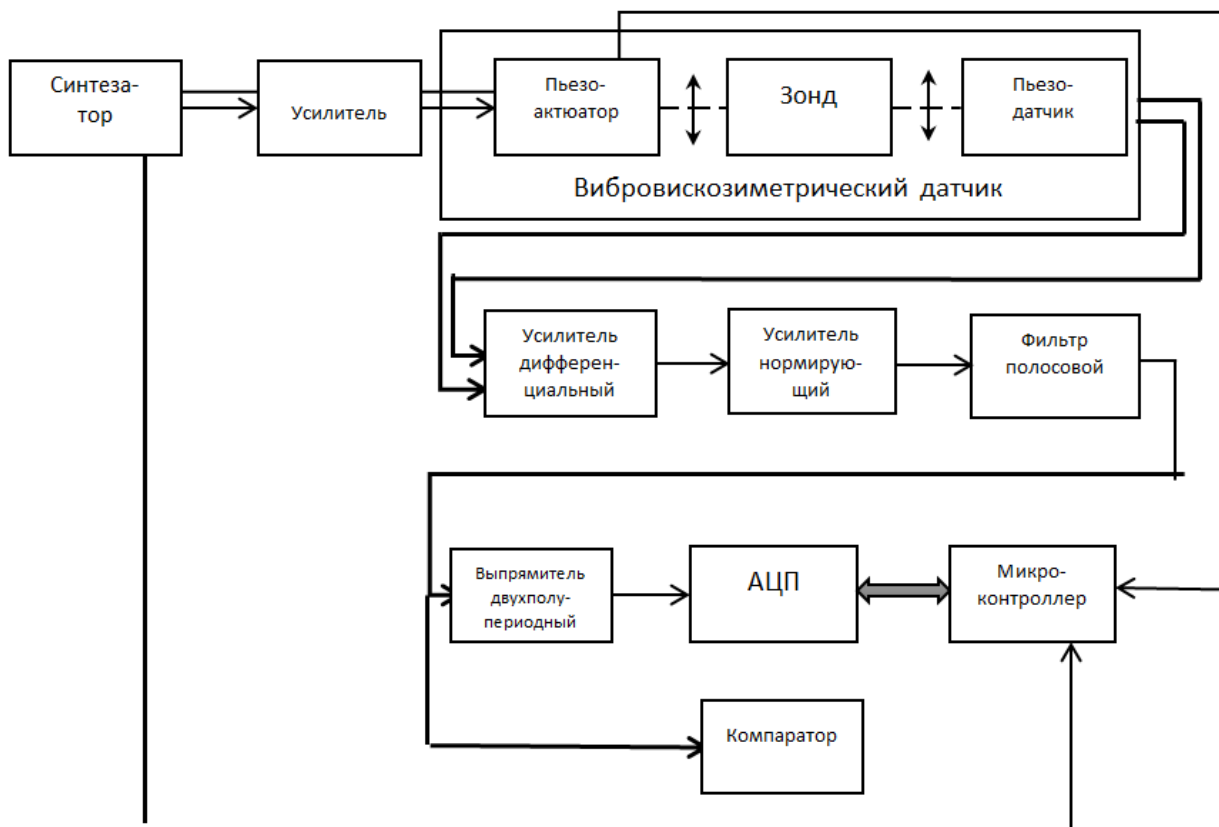


Рисунок 2.17 – Схема измерительной установки

С выхода дифференциального усилителя сигнал поступает на усилитель нормирующий, который предназначен для согласования амплитуды выходного сигнала с динамическим диапазоном аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Далее следует полосой фильтр — фильтр, который пропускает составляющие, находящиеся в полосе частот, соответствующей частотному диапазону вибровискозиметрического датчика.

Выделенный полосовым фильтром сигнал поступает на двухполупериодный выпрямитель, преобразующий переменное напряжение в две полуволны положительной полярности. Для измерения амплитуды данных полуволн используется АЦП, который осуществляет выборки сигнала в момент достижения сигналом максимума.

С выхода АЦП цифровой код поступает на микроконтроллер для последующей обработки.

В связи с тем, что помимо амплитуды сигнала, нас также интересует и разность фаз между сигналом возбуждения и сигналом с выхода датчика, в схему введен компаратор. Данный элемент формирует прямоугольный импульс в момент перехода через ноль сигнала с выхода датчика. Разность фаз определяется по временной задержке между синхроимпульсом с выхода синтезатора частоты (соответствует моменту перехода через ноль сигнала возбуждения) и сигналом с выхода компаратора.

Было решено сравнить результаты экспериментальных данных и данные моделирования, для того чтобы проверить соответствие полученных значений. Для этого в созданную модель вносились необходимые параметры вязкости для каждой жидкости и снимались характеристики. Основными параметрами для сравнения являются амплитуда и частота. Полученные результаты представлены в таблице 2.2

Таблица 2.2 – Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

	Амплитуда		Частота	
	Эксперимент	Моделирование	Эксперимент	Моделирование
Вода	0,468	0,409	286	298,8
Воздух	1	1	300,3	301,44
Бензин	0,640	0,701	291,6	290,76
Декан	0,512	0,498	294,4	296,8
Пентадекан	0,364	0,287	289,3	285,9
Этанол	0,434	0,4588	288,8	278,8



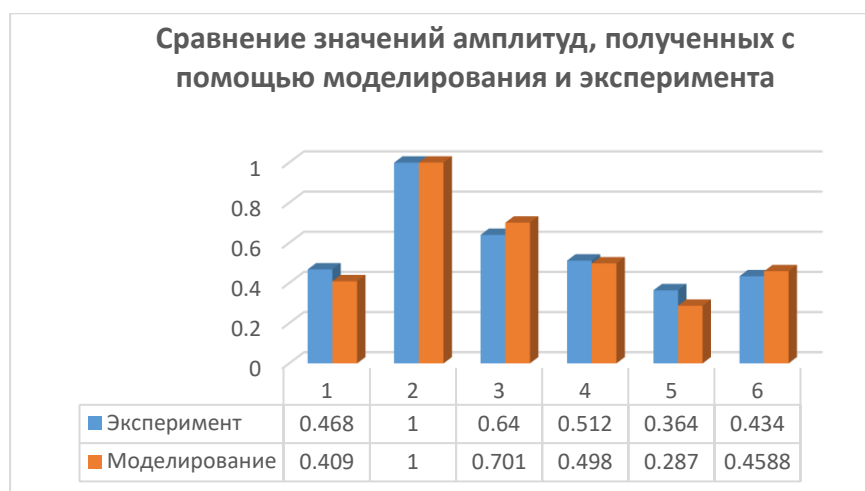


Рисунок 2.18 – Сравнение амплитуд



Рисунок 2.19 – Сравнение частот

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о том, что экспериментальные данные и данные, полученные в процессе моделирования, в большей степени соответствуют, но также наблюдаются расхождения у некоторых жидкостей. Большее расхождение по значениям амплитуды наблюдается у пентадекана. Можно предположить, что это связано с тем, что пентадекан чувствителен к изменениям температуры и давления. А при моделировании не учитывались реальные условия проведения эксперимента. По значениям частот большее отклонение выявлено у воды. Это так же возможно

связать с влиянием внешних факторов при эксперименте. Расхождение результатов представлено в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Расхождение результатов

	Амплитуда	Частота
	Расхождение результатов, %	
Вода	12,7	4,47
Воздух	0	0,37
Бензин	9,53	0,28
Декан	2,73	0,81
Пентадекан	21,15	1,17
Этанол	5,71	3,46

## 2.4 Выводы

В ходе моделирования колебательной системы подтвержден сложный характер колебательных процессов в вибровискозиметрическом датчике на основе трубчатых пьезоактюаторов. С использованием метода свободных колебаний и спектра свободных колебаний были выявлены характерные пики, соответствующие отдельным компонентам колебательной системы. Результатами исследования так же являются выявленные зависимости: зависимость частоты от массы зонда, зависимость частоты от длины пьезотрубки, зависимость добротности от коэффициента вязкости. А также зависимости амплитуды от изменения массы зонда и от изменения длины пьезотрубок. Так же проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, в результате которого были выявлены и объяснены определенные расхождения.

### 3 Управление эквивалентной жесткостью колебательной системы вибровязкозиметрического датчика

Пренебрежение упругих свойств жидкости, окружающей зонд, может стать причиной наличия существенных погрешностей при анализе экспериментальных данных. Это связано с тем, что для низкочастотных вибровязкозиметров отсутствуют общепринятые методы и средства экспериментального определения коэффициента жесткости колебательной системы, взаимодействующей с жидкостью.

В УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН был предложен способ управления эквивалентной жёсткости [2]. Он заключается в том, что с сигналом возбуждения колебательной системы суммируется сигнал обратной связи, прямо-пропорциональный смещению колеблющейся массы из положения равновесия.

Таким образом, если добавить в дифференциальное уравнение (3.1) силу, которая пропорциональна мгновенному положению смещения, то в уравнении (3.2) появляется дополнительное слагаемое, где  $\gamma$  – весовой коэффициент, показывающий, какая доля напряжения с выхода датчика положения добавляется в сигнал возбуждения,  $\alpha, \beta$  – коэффициенты преобразования.

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k_1 \cdot (x_1 - x_3) + n_{\text{вязк}} \frac{dx_1}{dt} = F_1(t) \quad (3.1)$$

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + (k_1 - \alpha \cdot \beta \cdot \gamma) \cdot (x_1 - x_3) + n_{\text{вязк}} \frac{dx_1}{dt} = F_1(t) \quad (3.2)$$

Таким образом, анализ выражения показывает, что такое изменение возбуждающей силы эквивалентно изменению коэффициента жесткости колебательного элемента [37].

Принцип управления коэффициентом жесткости поясняет данная схема, представленная на рисунке 3.1. С колебательной системы сигнал поступает на датчик положения, который дает информацию о том, где в данный момент находится зонд, далее сигнал с датчика положения через ключ, подается на сумматор (устройство, которое складывает два сигнала). Если ключ разомкнут сигнал подается один в чистом виде.

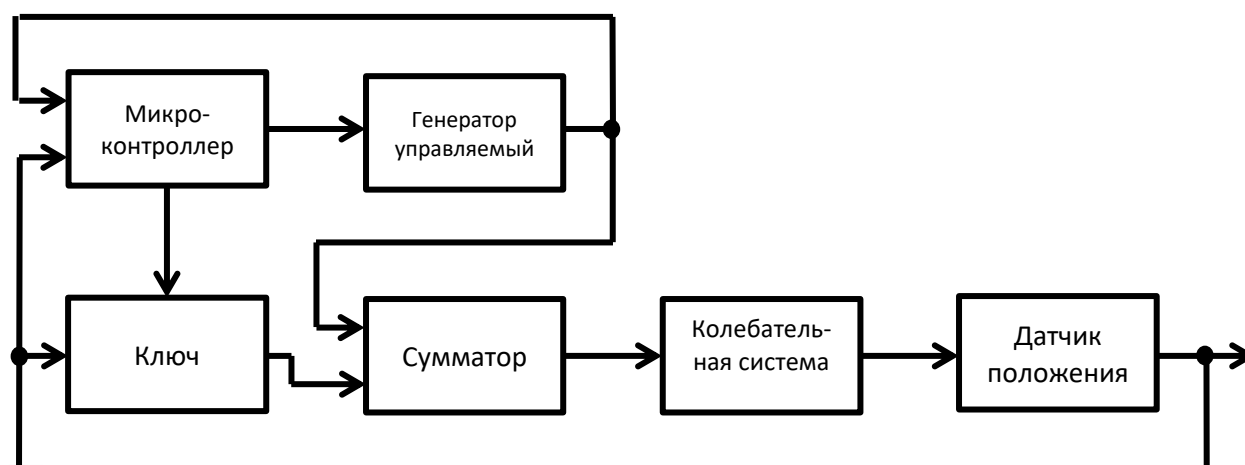


Рисунок 3.1 – Структурная схема с использованием принципа управления жесткости

Однако данное исследование было теоретическим, поэтому было решено провести моделирование поведения системы под действием обратной связи. Проверку эффекта от введения электрической обратной связи предполагается провести при помощи программы схемотехнического моделирования Multisim. Для этого используется аналогия между электрическими и механическими величинами.

### 3.1 Принцип эквивалентности

При анализе колебательных систем применялся принцип электромеханической аналогии, который заключается в том, что элементы механической колебательной системы рассматриваются как аналоги элементов

некоторой электрической схемы, которую называют эквивалентной данной механической КС [38-40]. Анализ эквивалентной схемы, в таком случае производится по законам анализа электрических цепей. Колебательные процессы в них описываются уравнениями для электрических цепей.

Таким образом подобие уравнений, показывает физическое соотношение процессов в механической системе и эквивалентной ей электрической цепи. Такие параметры, как например, инерция массы-препятствует мгновенному изменению скорости при воздействии (прекращении) силы, и равно как индуктивность препятствует мгновенному изменению тока при включении (выключении) источника э. д. с. В случаях механических систем с произвольным числом степеней свободы эквивалентная схема будет иметь столько же замкнутых электрических контуров, сколько и степеней свободы КС.

Таблица 3.1 – Эквивалентность элементов систем

Механическая система	Электрическая система
F(сила)	$\xi$ (э.д.с.)
V(скорость)	I(сила тока)
S(перемещение)	q(заряд)
m(масса)	L(индуктивность)
k(коэффициент жесткости)	$\frac{1}{C}$ (обратная емкость)
$\mu$ (коэффициент трения)	R(активное сопротивление)

Вывод формул:

$$1) W = \frac{kx^2}{2} - \text{Пружина}$$

$$W = \frac{Li^2}{2} - \text{Катушка}$$

Жесткость пружины k-величина обратная емкости  $\frac{1}{C}$

$$2) W = \frac{Li^2}{2}$$

$$F = -L \frac{di}{dt}$$

$$L = \frac{t}{xS^2} \cdot \frac{t}{s} \cdot xt = \frac{t^3}{S^3} - \text{размерность массы}$$

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} = m \frac{d^2S}{dt^2}$$

$$F = L \frac{dI}{dt} = L \frac{d^2q}{dt^2}$$

3) Единицы измерения:

$$\left[\frac{1}{C}\right] = \frac{1}{\Phi}; \quad [\Phi] = \frac{\text{Кл}}{\text{В}}; \quad [\Phi] = \frac{\text{А}^2 \cdot \text{с}^4}{\text{кг} \cdot \text{м}^2};$$

$$\left[\frac{1}{C}\right] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{А}^2 \cdot \text{с}^4};$$

$$[k] = \frac{\text{Н}}{\text{м}} = \frac{\text{кг}}{\text{с}^2};$$

$$\frac{\text{м}^2}{\text{А}^2 \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{м}^2}{\text{Кл}^2} = \text{кг} \cdot \text{Гн}$$

### 3.2 Разработка эквивалентной электрической принципиальной схемы вибровискозиметрического датчика с управляемой жесткостью

Был предложен вариант управления жесткостью, и в среде моделирования Multisim он реализуется данным способом. В первую очередь интересовало проверить, на самом ли деле система будет так реагировать на обратную связь. Макет для исследования управления жесткостью представлен в главе 4, именно данные его колебательной системы используются в схеме управления жесткостью.

Схема, которая используется при моделировании, включает в себя источник сигнала возбуждения, который предназначен для выведения системы из положения равновесия. Это осуществляется с помощью источника постоянного напряжения V1, который заряжает конденсатор колебательного контура C1.

Сигнал возбуждения формируется с помощью мощного операционного усилителя U2. На его вход подается сигнал с инвертирующего сумматора U1, который реализован так же на операционном усилителе. На один вход сумматора подается сигнал с источника, на второй вход подается сигнал с повторителя напряжения сигнала обратной связи U4.

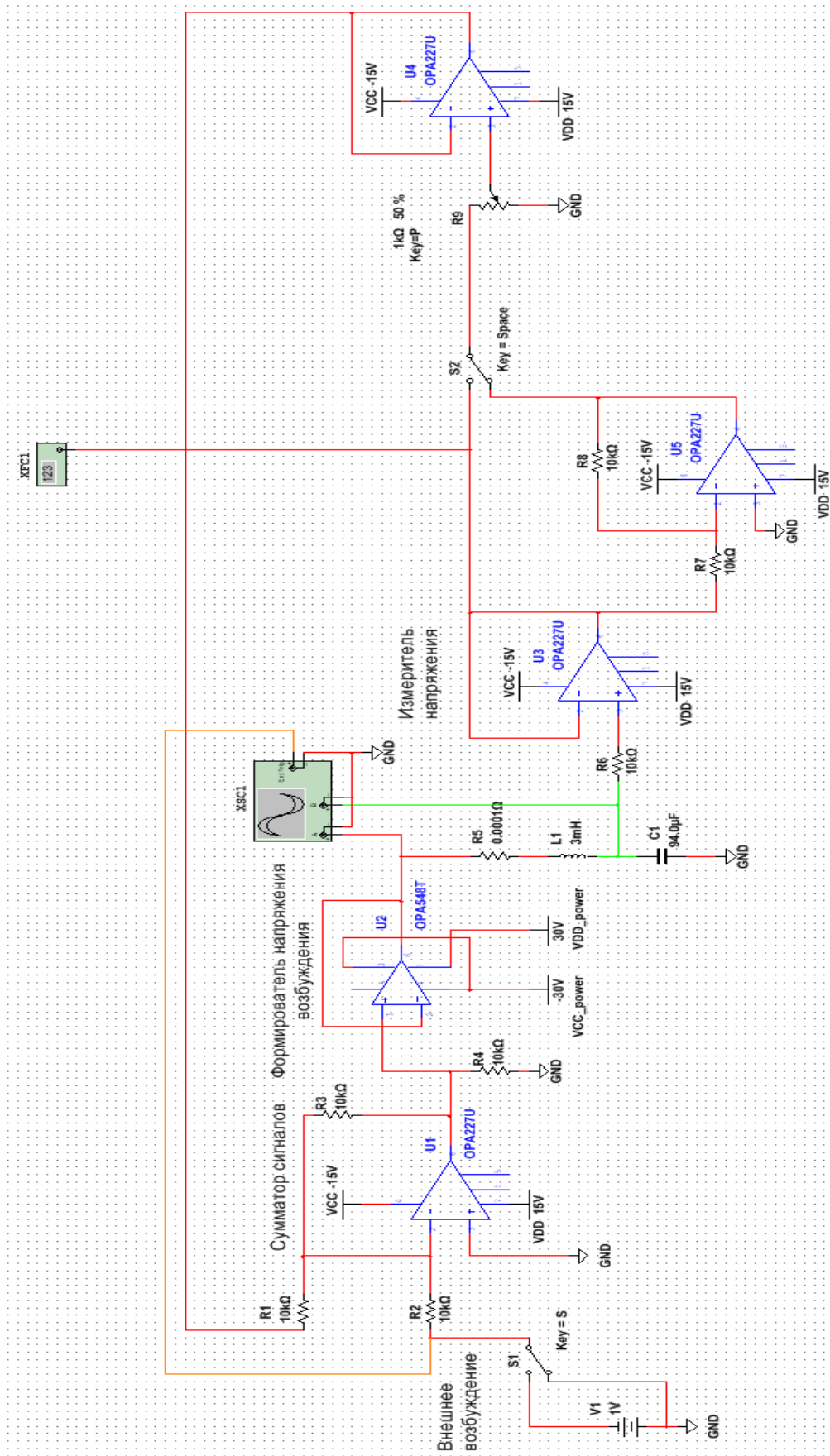


Рисунок 3.2 - Схема для моделирования процесса управления жесткостью колебательной системы вибровискозиметрического датчика

Он используется для того чтобы иметь высокое входное напряжение и в результате не нагружать потенциометр R9, который используется для регулирования сигнала обратной связи.

Полярность сигнала обратной связи меняется при помощи ключа S2. Для наблюдения формы сигнала используется осциллограф XSC1, для измерения частоты используется частотомер XFC1.

### 3.3 Результаты моделирования

#### 3.3.1 Вынужденные колебания с возбуждением от внешнего генератора

На рисунке 3.3 представлены первые результаты моделирования. Колебательная система в виде последовательного колебательного контура, где емкость, индуктивность и сопротивление, соответствуют вносимым потерям в контуре (0,1 ом). На данной эквивалентной схеме проверяются основные характеристики.

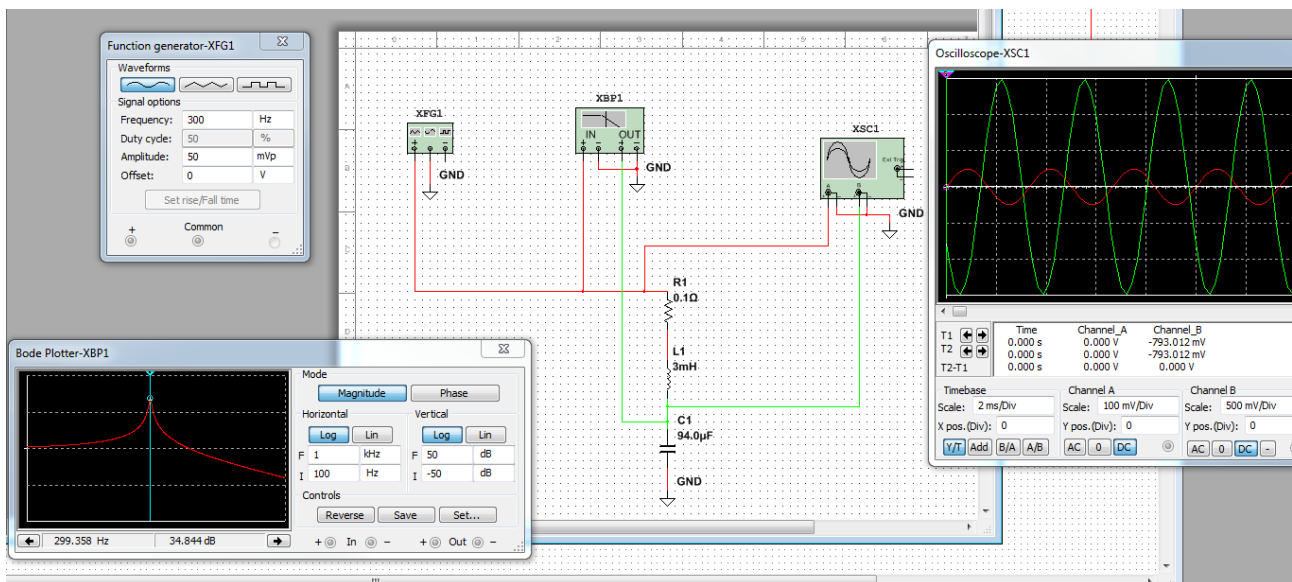


Рисунок 3.3 - Вынужденные колебания с возбуждением от внешнего генератора

Через внешний генератор задаются параметры. Красный сигнал тот, который подается на контур, зеленый - сигнал, который снимается с конденсатора (по эквивалентности систем получается, что перемещение



соответствует заряду на конденсаторе, а заряд пропорционален напряжению, то есть снимая напряжение с конденсатора тем самым измеряем перемещение)

Перемещение отстает на 90 градусов - что подтверждает наличие резонанса. То есть максимум внешней силы. Максимум отклонения соответствует тому моменту, когда напряжение равно нулю и отстает на четверть периода. Так же можно наблюдать АЧХ, на которой подтверждается наличие резонанса при значении 300 Гц. Итак, подобранный эквивалентный колебательный контур, действительно дает правильные значения резонансной частоты.

### **3.3.2 Собственные колебания без обратной связи**

На рисунке 3.4 представлены результаты без подстройки частоты, в режиме собственных колебаний. Зеленым цветом обозначен сигнал с выхода конденсатора колебательного контура, который соответствует отклонению колебательной системы от положения равновесия. Красным цветом обозначен сигнал возбуждения, тот, что подается на контур.

Выведение из положения равновесия с помощью внешнего, источника, то есть, когда мы замыкается ключ, прикладывается напряжение 5В к колебательному контуру, далее ключ переводится в нижнее положение и контур начинает входить в положение равновесия. Емкость начинает разряжаться через индуктивность и колебания начинают совершаться на собственных частотах – без обратной связи. Когда используется сигнал без обратной связи, в сигнале возбуждения отсутствует переменная составляющая, она появляется лишь в момент выведения из положения равновесия. Общая картина колебательного процесса без обратной связи, представлена на рисунке 3.5. Можно пронаблюдать затухающий характер колебаний.

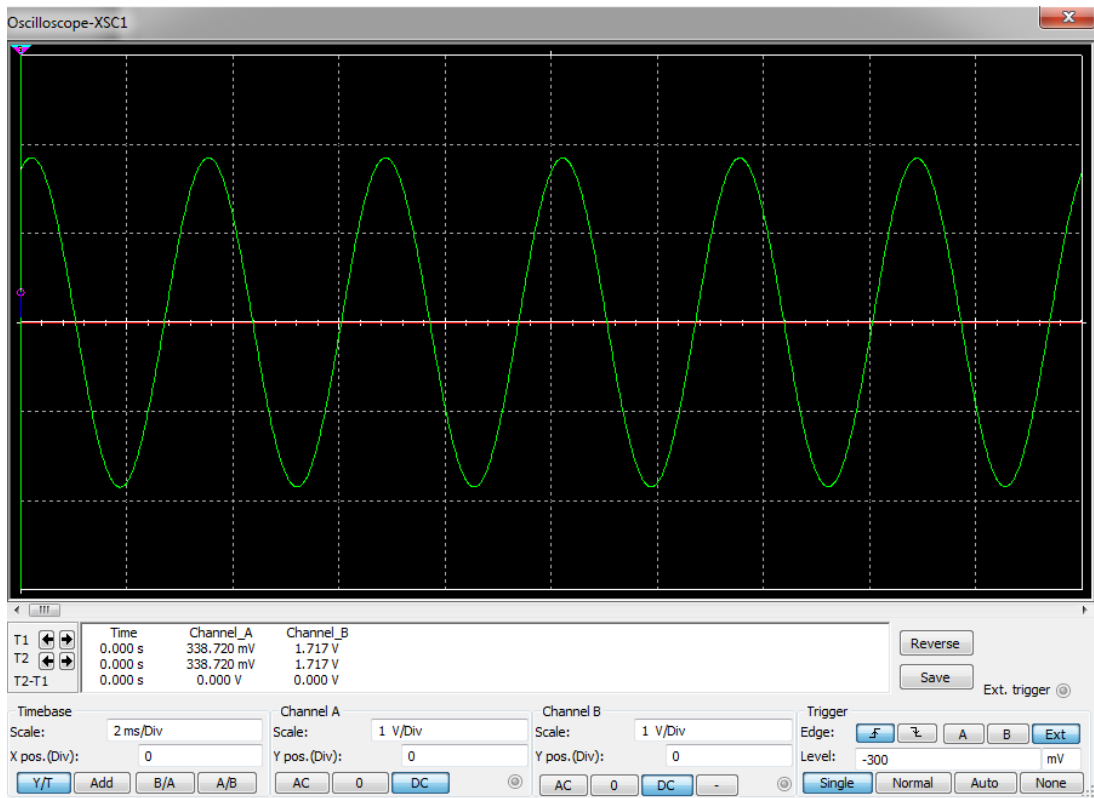


Рисунок 3.4 - Собственные колебания без обратной связи

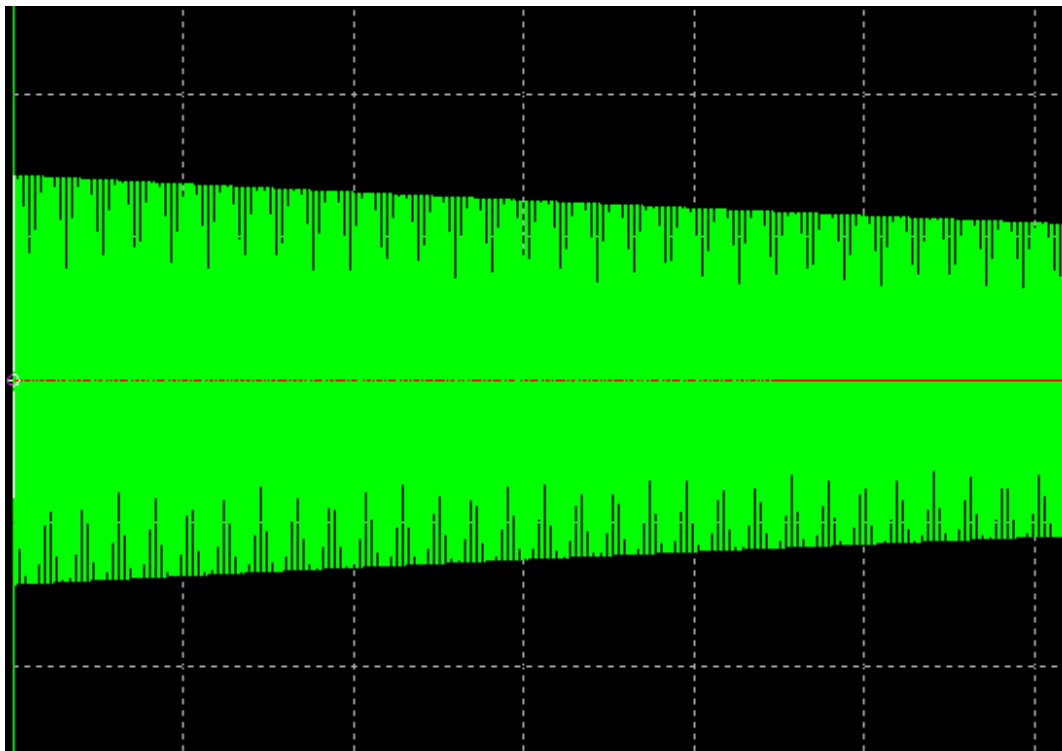


Рисунок 3.5 – Общий вид колебательного процесса без обратной связи

### 3.3.3 Собственные колебания с обратной связью

Результаты при моделировании на схеме с обратной связью, представлены на рисунке 3.6. Можно пронаблюдать, что колебания накладываются-сигнал на контуре складывается с сигналом отклонения. Этот случай эквивалентен тому что жесткость уменьшается.

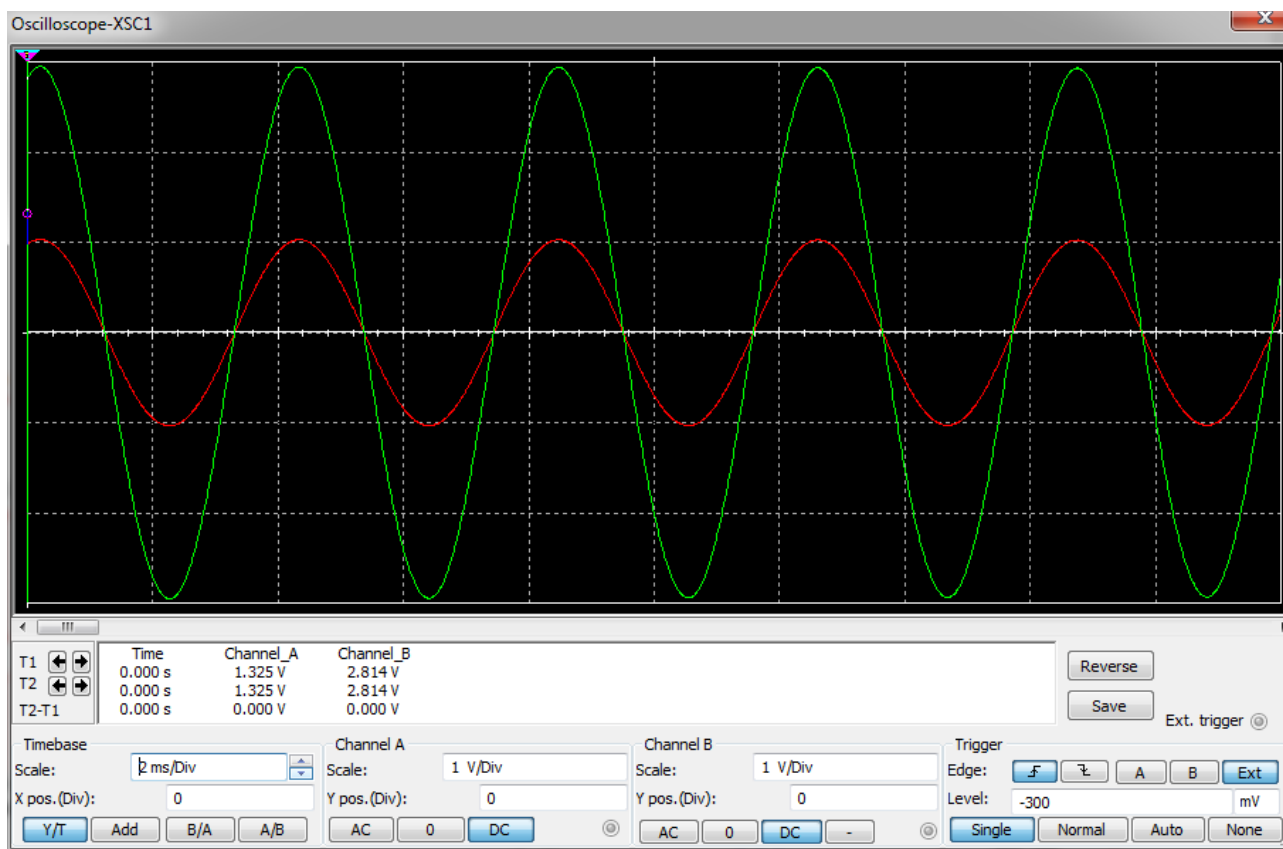


Рисунок 3.6 - Собственные колебания с обратной связью при уменьшении коэффициента жесткости

Выходной сигнал пропорционален напряжению на конденсаторе, это напряжение подается на сумматор. Для сигнала обратной связи меняя резистор, можем ослаблять количество сигнала обратной связи, который подается на контур. Собственная частота становится больше при обратной связи, то есть когда вносится обратная связь тем самым увеличивается жесткость системы, значит увеличивается и частота. В результате моделирования были подтверждены установленные задачи. На рисунке 3.7 показан общий вид колебательного процесса, где видно, что колебания затухают быстрее.

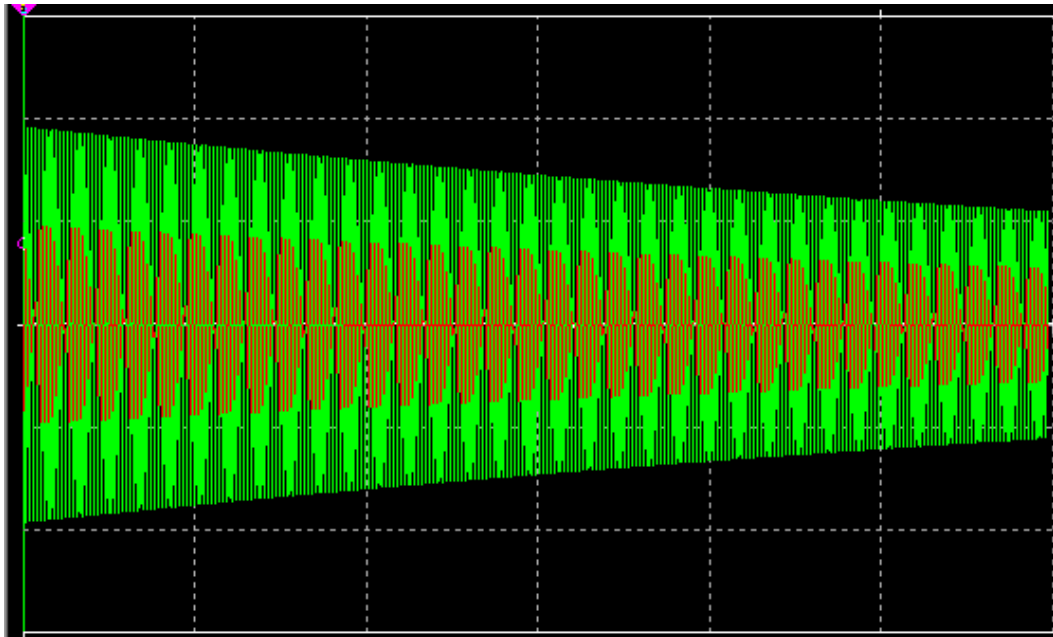


Рисунок 3.7 - Общий вид колебательного процесса с обратной связью при уменьшении коэффициента жесткости

Второй случай показан на рисунке 3.8, когда переключается ключ и берется сигнал с инвертирующего входа. В этом случае видно, что сигналы находятся в противофазе и при этом увеличивается жесткость.

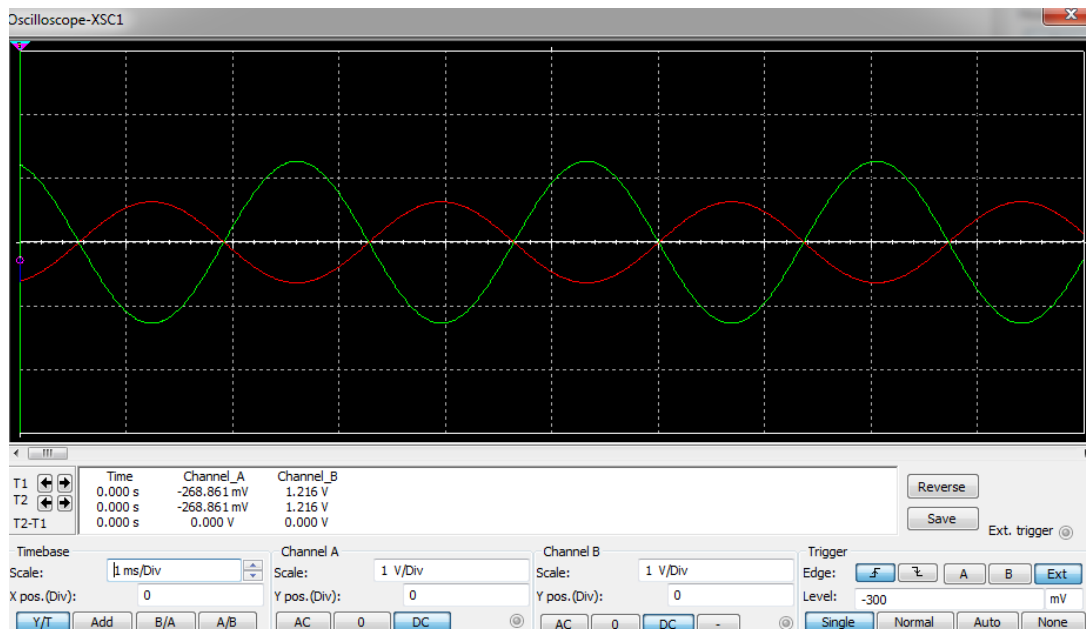


Рисунок 3.8 - Собственные колебания с обратной связью при увеличении коэффициента жесткости

Так же общая картина колебательного процесса показана на рисунке 3.9.

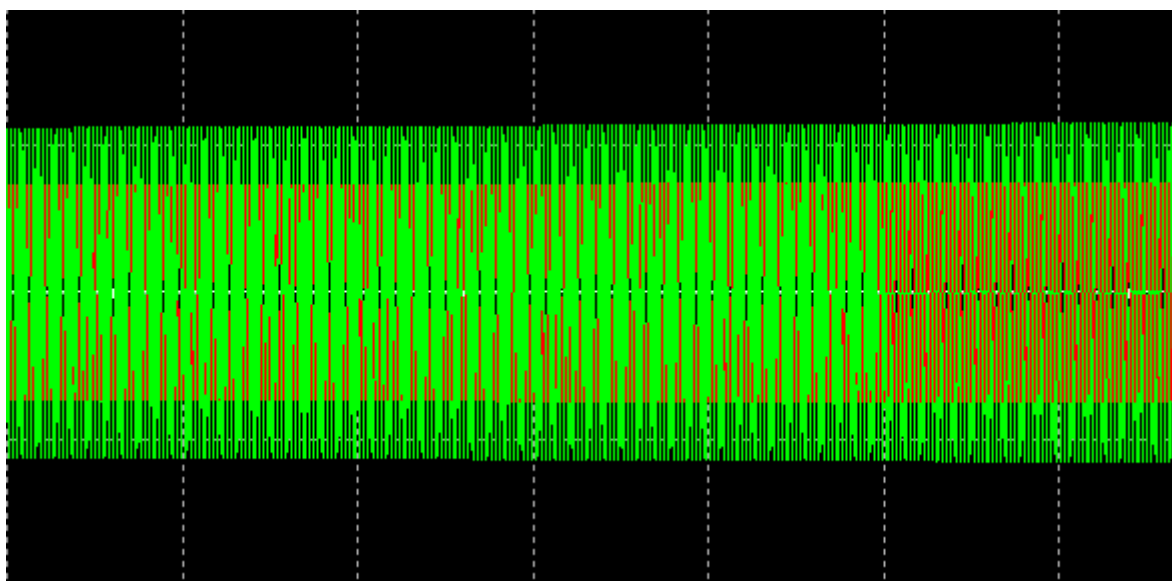


Рисунок 3.9 - Общий вид колебательного процесса с обратной связью

Таким образом, можно сделать вывод о том, что колебания сохраняются, но меняются в зависимости от того как вводится обратная связь.

### **3.3.4 Изменение эквивалентной жесткости**

Целью проверки правомерности применения обратной связи для управления эквивалентной жесткостью системы вызвана следующими соображениями:

Решением дифференциального уравнения является гармоническая функция. При гармонических колебаниях, как известно, вторая производная от смещения (ускорение) так же является гармонической функцией, совпадающей со смещением по частоте, но со сдвигом по фазе на 180 градусов. Таким образом, можно говорить, что введение обратной связи не только изменяет эквивалентную жесткость системы, но и изменяет ее эквивалентную массу.

Для того чтобы выяснить механизм влияния обратной связи на колебательную систему предложено сравнить изменение собственной частоты колебаний в случае изменения коэффициента жесткости с изменениями частоты

при моделировании, когда вводится обратная связь, эквивалентная по величине изменению коэффициента жесткости.

Таким образом следующей поставленной задачей является сравнение теоретического изменения частоты, которое вызвано изменением жесткости колебательной системы, с результатами компьютерного моделирования изменения эквивалентной жесткости. Результаты сравнения представлены на рисунке 3.10.

Можно пронаблюдать и сравнить механизмы влияния обратной связи на колебательную систему при теоретическом изменении частоты (красная линия), которое вызвано изменением жесткости колебательной системы, и при компьютерном моделировании изменения эквивалентной жесткости (синяя линия).

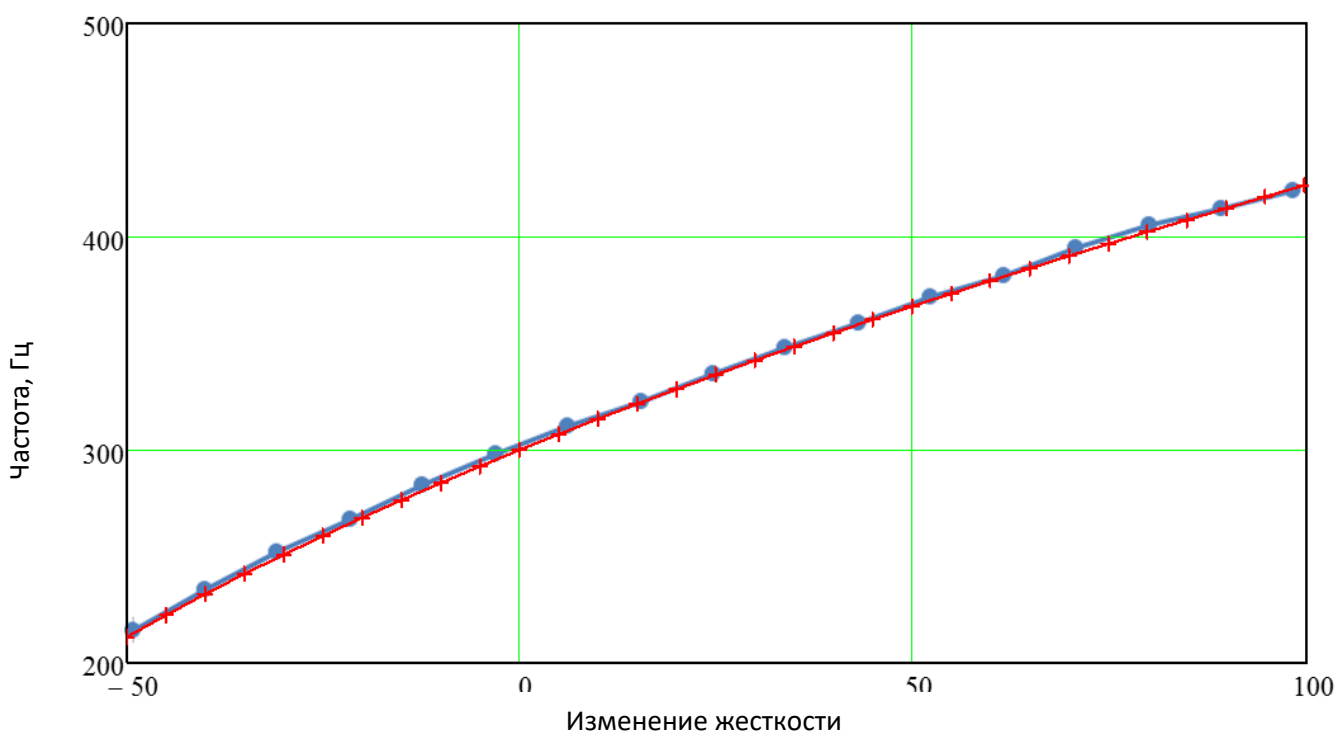


Рисунок 3.10 – Сравнение теоретического изменения частоты и частоты, полученной при компьютерном моделировании

Выявлен одинаковый характер зависимостей, что подтверждает следующее: теоретическое изменения частоты, которое вызвано изменением

жесткости колебательной системы, соответствует результатам компьютерного моделирования изменения эквивалентной жесткости. Для построения зависимости использовались следующие формулы для частоты, с учетом потерь в колебательном контуре:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} , \quad (3.3)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} . \quad (3.4)$$

### 3.4 Выводы

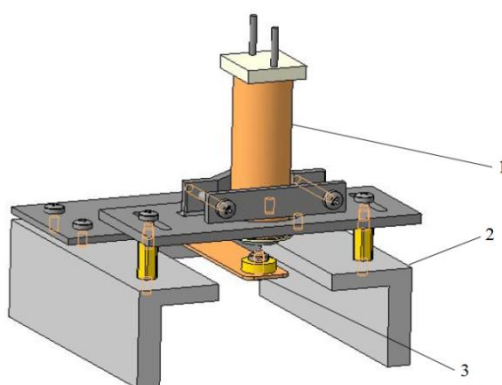
В ходе проведенного моделирования было подтверждено, что частота собственных колебаний зависит от коэффициента обратной связи. Была выявлена АЧХ, на которой подтверждается наличие резонанса при значении 300 Гц. Изменение полярности обратной связи приводит либо к увеличению частоты, либо к ее уменьшению, что эквивалентно либо увеличению, либо уменьшению коэффициента жесткости. Исследовалась зависимость частоты собственных колебаний от коэффициента обратной связи. Рассмотрены механизмы влияния обратной связи на колебательную систему при теоретическом изменении частоты, которое вызвано изменением жесткости колебательной системы, и при компьютерном моделировании изменения эквивалентной жесткости. Проведен анализ полученных результатов.

## 4 Экспериментальная проверка эффекта управления жесткостью колебательной системы

Для проверки был собран макет, представляющий собой колебательную систему, состоящую из балки, на конце которой закреплен груз. Внешнее возбуждающее воздействие осуществлялось с помощью магнитного поля. Датчик работал совместно с электрической схемой подобной схеме, использованной при моделировании в Multisim. Единственным отличием является то, что сигнал о положении датчика снимался не с конденсатора колебательного контура, а с пьезоэлемента который был закреплен на установке.

### 4.1 Особенности конструкции экспериментальной установки

В ходе исследований был разработан вариант вибровискозиметрического датчика (ВВД) на основе способа возбуждения колебаний с помощью магнитного поля. Экспериментальная установка представлена на рисунке 4.1. Колебания зонда, закрепленного на основании, возбуждаются с помощью электромагнита. Пьезотрубка закреплялась у основания балки, одним концом трубка жестко закреплялась на основании, другим концом касается колеблющейся части балки.



1 – электромагнит, 2 – основание, 3 – балка с грузом

Рисунок 4.1 – Экспериментальная установка



## 4.2 Расчет параметров необходимых для реализации

Для описания параметров колебательной системы, необходима физическая модель. На рисунке 4.2 представлен упрощенный вариант.

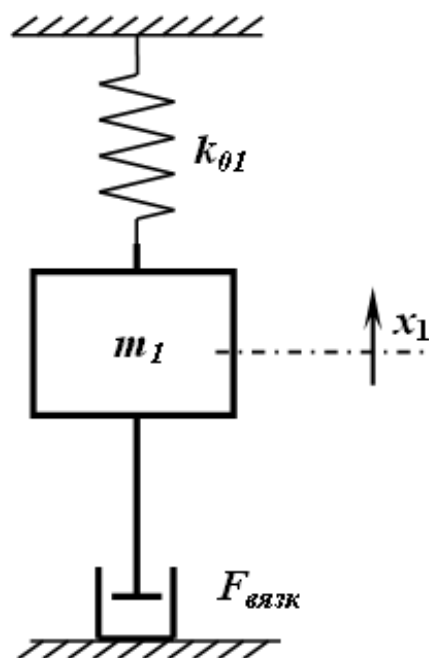


Рисунок 4.2 – Физическая модель

Здесь  $m_1$  - масса сферического зонда,  $k_{01}$  - коэффициент жесткости,  $x_1$  - перемещение зонда,  $F_{вязк}$  - сила вязкого трения в исследуемой жидкости,  $w = \sqrt{\frac{k}{m}}$  - частота собственных колебаний,  $k_{01} = k_0 + \Delta k$  - коэффициент жесткости колебательной системы, взаимодействующей с исследуемой жидкостью ( $\Delta k$  - это изменение коэффициента жёсткости, связанное с упругими свойствами жидкости, контактирующей с зондом).

$$F_{вязк} = -n_{вязк} \frac{dx_1}{dt} \quad (4.1)$$

Масса зонда была рассчитана следующим образом:

$$m = \rho \cdot V \quad (4.2)$$

$$V = \pi r^2 h \quad (4.3)$$

$$m = \pi r^2 h \rho \quad (4.4)$$

Коэффициент жесткости рассчитан по данной формуле

$$k = \frac{F}{\delta} , \quad (4.5)$$

где F-сила, приложенная к телу,  $\delta$ -деформация, вызванная силой F вдоль направления действия силы.

При расчете массы, коэффициента жесткости использовались численные значения параметров элементов колебательной системы и справочные данные.

Расчёт параметров элементов колебательной системы:

Масса зонда

$$m = 3.04 \times 10^{-3} (\text{кг})$$

Коэффициент жесткости

$$k_1 = 1.06 \cdot 10^4 (\text{Н/м})$$

### 4.3 Результаты эксперимента

В качестве результата представлена зависимость резонансной частоты колебательной системы макета вибродатчика от коэффициента передачи сигнала, пропорционального смещению массы колебательной системы от положения равновесия. Данный сигнал поступает на сумматор и складывается с сигналом возбуждения от внешнего генератора. Поиск резонансной частоты

осуществляется ручной перестройки генератора, изменение коэффициента передачи достигается изменением коэффициента передачи дифференциального усилителя, на вход которого поступает напряжение с пьезотрубки, работающей в качестве датчика положения.

График экспериментально полученной зависимости резонансной частоты колебательной системы от коэффициента усиления сигнала, пропорционального величине смещения колеблющейся массы от положения равновесия. Отрицательное значение коэффициента усиления означает, что сигнал обратной связи инвертировался.

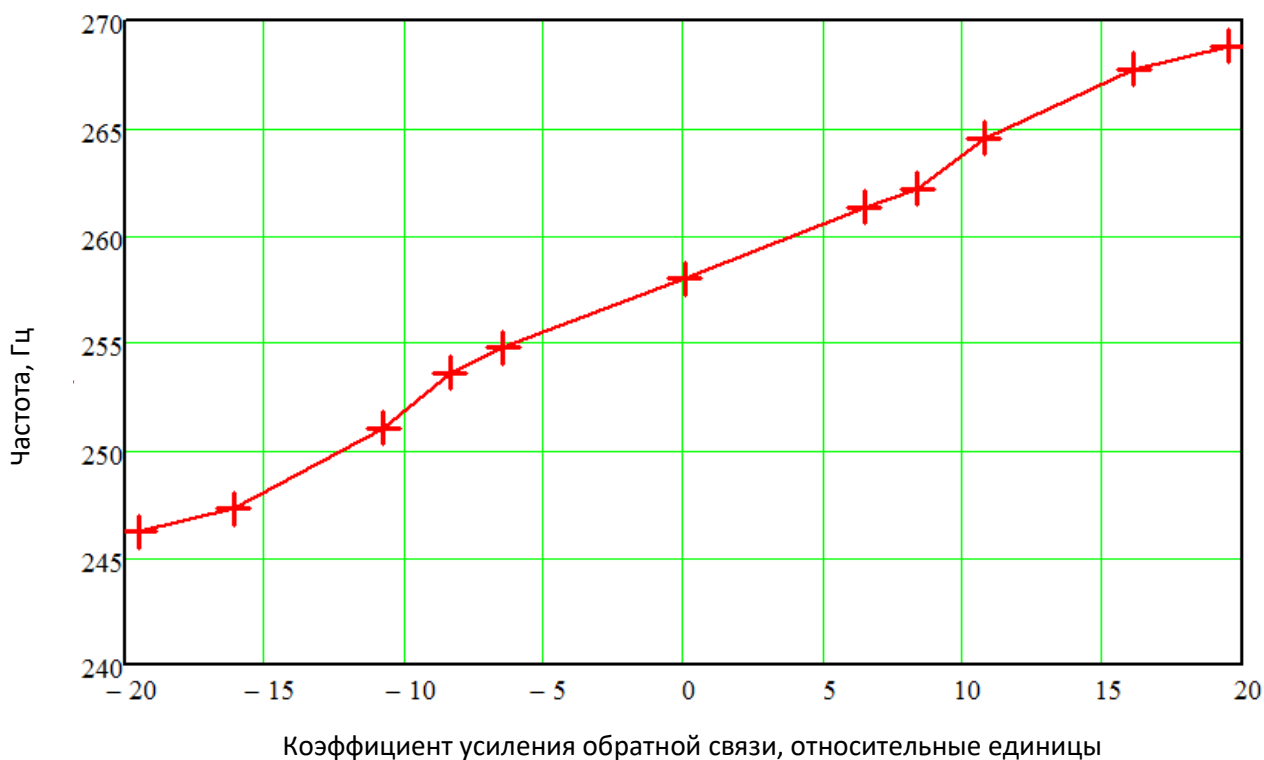


Рисунок 4.3 – Экспериментальная зависимость резонансной частоты от коэффициента усиления сигнала обратной связи

Таким образом, экспериментально было подтверждено влияние введения обратной связи на эквивалентную жесткость колебательной системы. Изменение коэффициента передачи обратной связи достигается изменением коэффициента передачи дифференциального усилителя. Так же подтверждена возможность управления эквивалентной жесткостью колебательной системы. Мы видим, что

при увеличении сигнала обратной связи происходит увеличение частоты, что эквивалентно увеличению жесткости.

#### **4.4 Выводы**

Для проведения эксперимента был собран макет, на котором были реализованы эксперименты по управлению эквивалентной жесткостью. Эксперименты подтвердили возможность управления коэффициентом жесткости, о чем свидетельствует зависимость частоты собственных колебаний в зависимости от коэффициента обратной связи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы проведен обзор научной литературы по методам и техническим средствам, применяемым для измерения вязкости жидкостей. Проведен комплексный анализ существующих методов возбуждения колебательных систем и классификации вискозиметрических датчиков, который показал наиболее подходящие по точности и условиям параметры.

Во второй главе проведено моделирование колебательной системы ВВД на основе пьезотрубок. Подтвержден сложный характер колебательных процессов в вибровискозиметрическом датчике. С использованием метода свободных колебаний и спектра свободных колебаний были выявлены характерные пики, соответствующие отдельным компонентам колебательной системы. Результатами исследования так же являются выявленные зависимости от изменения параметров колебательной системы.

В третьей главе описывается моделирование управления коэффициентом жесткости. В ходе проведенного моделирования было подтверждено, что частота собственных колебаний зависит от коэффициента обратной связи. Была выявлена АЧХ, на которой подтверждается наличие резонанса при значении 300 Гц. Изменение полярности обратной связи приводит либо к увеличению частоты, либо к ее уменьшению, что эквивалентно либо увеличению, либо уменьшению коэффициента жесткости. Исследовалась зависимость частоты собственных колебаний от коэффициента обратной связи.

В четвертой главе экспериментально управление коэффициентом жесткости было подтверждено, выявлена зависимость резонансной частоты от коэффициента усиления сигнала обратной связи.

По результатам проведенных исследований были сделаны доклады, а также принималось участие в научно-технических конференциях, школах-семинарах, научно-теоретической конференции. Были опубликованы тезисы и получен Диплом 2-ей степени за лучший доклад на 22-ой Всероссийской

молодежной научной школе-семинаре “АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИЧЕСКОЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ” (Ульяновск, 2019).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Соломин Б.А. Миниатюрный высокочувствительный и быстродействующий вибровискозиметрический датчик/ Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов, А.А. Черторийский, М.Л. Конторович // Конструирование и производство датчиков, приборов и систем – 2015 – С. 3–8.
2. 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.
3. Вязкость и ее свойства. [Электронный ресурс]. — <http://chevroletcars.ru/info/v-kakih-edinicah-izmerjaetsja-vjazkost-zhidkosti/>
4. Динамическая вязкость. [Электронный ресурс]. — [https://studopedia.ru/16\\_72651\\_dinamicheskij-koeffitsient-vyazkosti.html](https://studopedia.ru/16_72651_dinamicheskij-koeffitsient-vyazkosti.html)
5. Физические величины. Вязкость жидкости. [Электронный ресурс]. — [https://www.areopag-spb.ru/svedeniya\\_o\\_vyazkosti](https://www.areopag-spb.ru/svedeniya_o_vyazkosti)
6. Вязкость нефти и нефтепродуктов: методы и средства определения. [Электронный ресурс]. — <https://asunefit.ru/benzin/vyazkost-nefti-i-nefteproduktov-metody-i-sredstva-opredeleniya.html>
7. Ротационные вискозиметры. [Электронный ресурс]. — <https://lab-test.ru/oborudovanie/nauchnoe-i-kontrolno-analiticheskoe-oborudovanie/reologiya/viskozimetry-rotatsionnye2015-03-31-07-38-25258741829>
8. Ротационный вискозиметр. [Электронный ресурс]. — <https://promplace.ru/rotacionnij-viskozimetr-933.htm>
9. Измерение вязкости по Брукфильду. [Электронный ресурс]. — <https://viscometer.ru/?ktg5>

10. RVA - Экспресс-анализаторы вязкости. [Электронный ресурс]. — [http://www.soctrade.com/laboratornoe\\_oborudovanie/rva-ekspress-analizatory-vyazkosti.phtml](http://www.soctrade.com/laboratornoe_oborudovanie/rva-ekspress-analizatory-vyazkosti.phtml)
11. Г.Ф. Афанасьева. Вискозиметры стеклянные капиллярные образцовые. Методы и средства поверки/методические указания// - 1984 – С. 20-21.
12. Вискозиметр с падающим шариком. [Электронный ресурс]. — <https://helpiks.org/6-69595.html>
13. Вибрационные вискозиметры. [Электронный ресурс]. — [https://studopedia.ru/6\\_28853\\_vibratsionnie-viskozimetri.html](https://studopedia.ru/6_28853_vibratsionnie-viskozimetri.html)
14. Вибрационный метод вискозиметрии. [Электронный ресурс]. — <https://lektsii.org/10-42794.html>
15. Вибрационный вискозиметр для процесса непрерывного действия L-vis 520 series. [Электронный ресурс]. — <https://www.directindustry.com.ru/prod/anton-paar/product-16352-445765.html>
16. Вискозиметр вибрационный низкочастотный ВВН – 8. [Электронный ресурс]. — <https://oavt.nt-rt.ru/>
17. Патент РФ № 2419781, МПК G01N25/02. Вибровискозиметрический датчик / Соломин Б.А., Конторович М.Л., Подгорнов А.А. ; патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.- заявка 2008137896, заявл. 22.09.2008, публ.27.05.2011, бюл.№ 15.
18. Низаметдинов, А.М. Измерение добротности и собственной частоты колебательной системы вибровискозиметрического датчика / Низаметдинов А.М. // Датчики и системы. – 2016. – №10. – С. 15–20.
19. Способ и устройство внешнего резонансного возбуждения механической колебательной системы вибровискозиметра [Электронный ресурс]. — <https://edrid.ru/en/rid/217.015.a2ee.html>



20. Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет. Занимательная физика/ Колебания и волны. Звук. Ультразвук// - 2015 – С. 25
21. Акустические измерения в ядерной энергетике - способы возбуждения и регистрации упругих волн. [Электронный ресурс]. — <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/akusticheskie-izmereniya-v-yadernoy-energetike-5.html>
22. Гомельский. Физика / теоретический раздел / лекции 2 семестр / Лекция 17// - 2016.
23. Бержанский В.Н., Полулях С.Н., Преображенский В.Л., Руденко В.В. Автоматизированный импульсный ультразвуковой спектрометр с индукционным возбуждением для исследования магнитных материалов // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского, серия «Физика». – 2005. – Т.17-18 (56-57), № 1. – С. 114-119.
24. Белов, К.П. Редкоземельные магнетики и их применение /К.П. Белов. – М.: Наука. 1980. – 240 с.
25. Катаев, Г.И. Физика магнитных материалов и новые редкоземельные магнетики / Г. И. Катаев, Р. З. Левитин. – М.: Общество "Знание" РСФСР, 1976. – 41 с.
26. Магнитострикционный способ. [Электронный ресурс]. — [https://studopedia.ru/7\\_99696\\_magnitostriktsionniy-sposob.html](https://studopedia.ru/7_99696_magnitostriktsionniy-sposob.html)
27. Воронежский государственный технический университет. Курськ/ Пьезокерамика// - 2015 – С. 31.
28. А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев, П.В. Карев  
Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 134 с.

29. Ультразвуковые пьезоэлементы. [Электронный ресурс]. — <http://www.quartz1.com/price/model.php?akt=773.17>
30. Пьезоэлектрический метод [Электронный ресурс]. — [https://studopedia.ru/8\\_52585\\_pezoelektricheskiy-metod.html](https://studopedia.ru/8_52585_pezoelektricheskiy-metod.html)
31. Пьезоэлемент. [Электронный ресурс]. — <https://engineering-solutions.ru/ultrasound/piezomaterials/>
32. 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. 15.25
33. 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.
34. Пьезоэлектрический эффект. [Электронный ресурс]. — [https://www.oaopiezo.com/theory\\_3.html](https://www.oaopiezo.com/theory_3.html)
35. Амплитудно-частотная характеристика. [Электронный ресурс]. — <https://radiolubitel.net/index.php/elektronika/265-amplitudno-chastotnaya-kharakteristika-achkh>
36. Ламб Г., Гидродинамика, пер. с англ., М.- Л., 1947; Риман И. С., Крепс Р. Л., Присоединенные массы тел различной формы, М., 1947; Седов Л. И., Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики, 3 изд., М., 1980.
37. Соломин, Б.А. Повышение точности измерения присоединенной массы Жидкости в низкочастотных вибровискозиметрах/ Б.А. Соломин, А.М. Низаметдинов, А.А.Черторийский, М.Л. Конторович// Радиоэлектронная техника. -2018.-№1.-С.105-111.
38. 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.

39. Иориш Ю.И. Виброметрия / Иориш Ю.И. – М.: Государственное  
научнотехническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 756  
с.
40. Соловьев, А. Н. Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей / А. Н.  
Соловьев, А. Б. Каплун. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1970