

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Проектирование интеллектуальных сенсорных систем измерения вязкости материалов

Учебно-методическое пособие по дисциплине
“Сенсоры и сенсорные системы”
для студентов специальностей
1-55 01 01 “Интеллектуальные приборы, машины и производства”,
1-55 01 02 “Интегральные сенсорные системы”

Учебное электронное издание

Минск ◊ БНТУ ◊ 2010

Авторы:

В. М. Колешко

В.Я. Сунка

Е.В. Польшкова

Е.В. Крупская

Рецензенты:

Б.С. Колосницын, профессор, к.т.н.

Н.Н. Мурашко, доцент, к.т.н.

Электронное учебно-методическое пособие содержит материал для изучения студентами кафедры “Интеллектуальные системы” дисциплины “Сенсоры и сенсорные системы”, который позволяет студентам понять основные идеи рассматриваемых методов измерения вязкости различных материалов. Изложены физические основы измерения вязкости жидкостей вибрационными методами, проанализированы их преимущества и недостатки. Рассмотрены конструктивно-технологические параметры основных видов вибрационных измерительных зондов (тела правильной геометрической формы) с распределенными и сосредоточенными параметрами, совершающих изгибные, поступательные, крутильные и вращательные механические колебания. Выполнено моделирование величины коэффициента демпфирования измерительных зондов контролируемой жидкостью. Приведены описания разработанных интеллектуальных сенсорных систем измерения вязкости различными методами. В состав измерительных систем введены микроконтроллеры для управления информационно-измерительным процессом, формирования сигналов самодиагностики и цифровых сигналов для беспроводных сетей передачи информации. Проведен анализ погрешностей измерения вязкости предложенными методами и устройствами, описаны эффективные пути уменьшения погрешностей. Разработанный материал раскрывает творческий потенциал студентов в направлении изучения и моделирования интегральных сенсорных и интеллектуальных микропроцессорных систем.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. (017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37

E-mail: isev@tut.by

Регистрационный № БНТУ/МСФ82 – 4.2010

© БНТУ, 2010

© Колешко В. М., Сунка В.Я., Польшкова Е.В.,
Крупская Е.В., 2010

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВИБРАЦИОННОЙ ВИСКОЗИМЕТРИИ.....	6
2 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ И ВИБРАЦИОННЫЕ ИСС НА ИХ ОСНОВЕ.....	15
2.1 Амплитудный (автоколебательный) метод.....	22
2.1.1 Методические рекомендации к проектированию ИСС измерения вязкости при использовании изгибных колебаний стержневых зондов	33
2.2 Частотно-фазовый метод	36
2.2.1 Методические рекомендации к проектированию ИСС измерения вязкости при вращательных (крутильных) колебаний цилиндрических стержневых зондов.....	39
2.3 Фазовый вибрационный метод.....	42
2.3.1 Методические рекомендации к проектированию ИСС измерения больших значений вязкости с использованием зондов с сосредоточенными параметрами.....	52
3 ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ВИСКОЗИМЕТРОВ ..	56
4 КОНСТРУКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРАЦИОННЫХ ИСС ВИСКОЗИМЕТРИИ.....	60
5 ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ ВИБРАЦИОННЫХ ИСС ВИСКОЗИМЕТРОВ...	63
6 ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ.....	64
7 МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	66
7.1 Программирование МК семейства MCS-51.....	73
7.2 Основы структуры программ для МК MCS-51	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	77
ЛИТЕРАТУРА	80

ВВЕДЕНИЕ

Вязкость является одним из основных параметров контроля качества продукции в технологии производства жидких сред в химической, нефтехимической, фармацевтической, перерабатывающей, сельскохозяйственной, металлургической (контроль расплавов при производстве металлов и пластических масс) и других отраслях.

Приборы для измерения вязкости, называются вискозиметрами (от латинского «viscos», т. е. вязкость), и они делятся на две основные группы: лабораторные – капиллярные, с падающим шариком, ротационные и промышленные – преимущественно вибрационные.

Из-за отсутствия надежных автоматических сенсорных систем измерения вязкости при проведении различных технологических процессов промышленности (в т. ч. в трубопроводах) приходится производить измерение вязкости с помощью косвенных методов измерения или же выполнять взятие проб жидкости и ее дальнейшие исследования с помощью лабораторных вискозиметров. Остро ощущается необходимость в создании широкого класса Интеллектуальных сенсорных систем (ИСС) измерения вязкости жидкостей, в т. ч. и неньютоновских (материалы синтеза в химической промышленности и т. д.). При этом, к хорошо известным требованиям повышения точности и надежности, ужесточения эксплуатационных режимов, существенного уменьшения габаритов и повышения экономичности, добавляются, в соответствии с мировыми стандартами серии IEEE 1451, специфические требования по интерфейсу ИСС измерения как в составе общей микропроцессорной системы автоматического контроля и управления, так и при передаче информации по беспроводным каналам связи в соответствии с требованиями мировых стандартов IEEE 802.11; 802.15 и 802.16.

Создание надежных, информативных, обладающих высокими метрологическими свойствами промышленных ИСС измерения динамической вязкости жидкостей в широком диапазоне значений (10^{-4} – 10^6) Па·с возможно на базе

вибрационных методов. Эти методы основаны на измерении механического сопротивления, которое жидкая среда оказывает колеблющемуся в ней механическому вибратору (измерительному зонду). Измерительный зонд совершает колебания с амплитудой в несколько микрометров. Вибрационный зонд конструктивно выполняют в виде тела правильной геометрической формы: шара, круглого стержня, пластины, камертона и т.д. Возбуждение механических колебаний производится за счет внешней силы, создаваемой пьезоэлектрическими, электромеханическими, электромагнитными, оптическими и другими преобразователями. Возможно использование продольных, изгибных, крутильных, вращательных и других видов механических колебаний вибрационного измерительного зонда.

ГЛАВА 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВИБРАЦИОННОЙ ВИСКОЗИМЕТРИИ

Вязкостью называют свойство жидкостей и газов, характеризующее их сопротивляемость деформации сдвига. Сдвиговое течение параллельных слоев жидкостей записывается формулой Ньютона

$$\eta = (F/S)/(dV/dl), \quad (1.1)$$

где η – динамическая вязкость;

F/S – напряжение сдвига;

dV/dl – скорость сдвига;

F – сила;

S – площадь;

V – скорость;

l – расстояние.

Если величина вязкости не зависит от интенсивности механических деформаций, то жидкость называют ньютоновской, а все остальные жидкости называют неньютоновскими. Практически же большинство известных жидкостей имеют промежуточные свойства и их нельзя четко отнести к ньютоновским или же к неньютоновским.

За единицу динамической вязкости η в системе СИ принимают вязкость жидкости, в которой напряжение сдвига, создаваемое силой $F = 1$ Н между двумя слоями площадью $S = 1$ м², вызывает градиент скорости $dV = 1$ м/с при расстоянии между слоями $l = 1$ м. Эта единица динамической вязкости в системе СИ – Па·с, а в системе СГС – Пуаз (Пуаз = 0,1 Па·с). На практике, кроме динамической вязкости, для измерения вязкости используют и кинематическую вязкость, равную отношению динамической вязкости η к плотности жидкости $\rho_{ж}$. Единица измерения кинематической вязкости в системе СИ – м/с². В таблице 1.1 приведены значения вязкости для некоторых используемых материалов.

Таблица 1.1 – Значения динамической вязкости газов и жидкостей ($\eta = x \cdot 10^{-3}$ Па·с) при атмосферном давлении и различных значениях температуры, где x – численное значение по таблице

Материал	Температура, °С								
	-123	-23	0	20-27	50	70	127	200	327
Газы									
He	0,012	0,017		0,020			0,024	0,028	
O ₂	0,011	0,018		0,021			0,026		
N ₂	0,010	0,013		0,018			0,022		
воздух	0,010	0,016		0,019			0,023	0,027	
Жидкости									
Спирт этиловый		3,00	1,77	1,22	0,84				
Ацетон		0,007		0,008			0,01	0,013	
Этилен		0,009		0,01			0,013	0,016	
Вода				1,05					
Силикон			2010	991	540	332	200		
Si-органическая				6080	2200	766	415		
Пропанол		20,0	5,0	2,29	1,3	0,65			
Глицерин			12100	1480	180	59			
Керосин			2,2	1,94			0,54	0,26	
Моторное масло легкое				113					
Моторное масло тяжелое				660					
Масло сливочное				90					
Эфир этиловый				0,24					
Жидкие металлы									
Pb									2,6
Sn									1,7
Йодистая ртуть				1,59					0,02

Из анализа значений динамической вязкости (таблица 1.1) можно заключить, что при увеличении температуры динамическая вязкость жидкостей уменьшается, а в газах – повышается.

Среди промышленных вискозиметров широкое распространение получили вибрационные вискозиметры ввиду их целого ряда положительных преимуществ перед лабораторными вискозиметрами.

Измерение вязкости вибрационными вискозиметрами основано на классической теории вязкого сопротивления, возникающего в слоях жидкости при проскальзывании их относительно друг друга с определенным коэффициентом вязкости. Если зонд совершает механические колебания с круговой частотой $\omega = 2\pi f$ в вязкой жидкости, то в тонком пограничном слое раздела твердое тело (зонд) – жидкость образуется поперечная сдвиговая волна. Особенность этой волны – ее быстрое затухание при движении вглубь жидкости. Глубина проникновения поперечной сдвиговой волны равна

$$\delta = 2\eta / \rho_{ж} \omega . \quad (1.2)$$

Например, если вязкость изменяется от 10^{-3} до 10 Па·с при $\omega = 1000 \text{ с}^{-1}$ и $\rho_{ж} = 880 \text{ кг/м}^3$, то величина $\delta = (10^{-4} \div 0,5)$ см (рисунок 1.1). Как правило, геометрические размеры зонда значительно больше величины δ и можно считать, что характер движения вязкой жидкости вблизи вибрационного зонда аналогичен колебаниям неограниченной плоской поверхности.

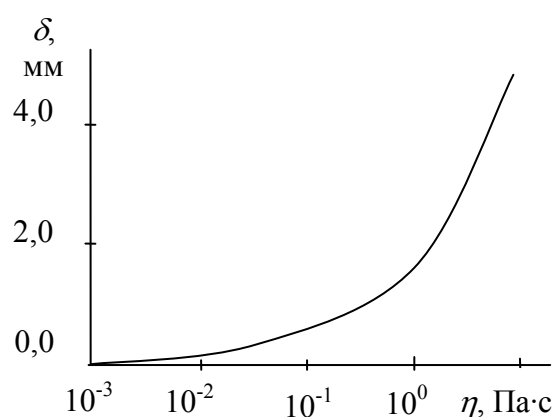


Рисунок 1.1 – Зависимость глубины поперечной волны от вязкости жидкости

При колебаниях зонда (например, шара) вязкая среда оказывает механическое сопротивление движению, которое всегда будет комплексной величиной $Z_M = Re_z + iIm_z$. Активная составляющая R_a комплексного сопротивления (импеданса) Z_M обусловлена: излучением звуковой энергии в окружающую жидкость R_{a2} и потерями на вязкое трение R_{a1} .

Для выяснения поведения излучателей при произвольном соотношении между размерами и длиной волны воспользуемся излучателем нулевого порядка (пульсирующий шар) или монополюсом. Импеданс, создаваемый вибрационным шаром на расстоянии r от его центра, можно записать в виде

$$Z_M = -\frac{ip_{жс}c_{жс}kr}{1+(kr)^2} + \frac{p_{жс}c_{жс}(kr)^2}{1+(kr)^2}, \quad (1.3)$$

где $p_{жс}c_{жс}$ – волновое сопротивление жидкости ($c_{жс}$ – скорость звука);

r – радиус вибронда;

$k = \omega/c_{жс}$ – волновое число.

Активная часть и абсолютная величина реактивной части полного импеданса рассчитанные по формуле (1.3) представлены на рисунке 1.2. При $kr \ll 1$ величина активной составляющей $Re_z \approx p_{жс}c_{жс}(kr)^2$, что при заданном радиусе шара и данной амплитуде скорости колебаний полная мощность излучения будет пропорциональна квадрату частоты. Если же задана амплитуда колебаний шара при условии, что $kr \ll 1$ удельная и полная мощность излучения оказываются пропорциональными четвертой степени частоты. Этим объясняется малая эффективность излучения виброндами, размеры которых малы по сравнению с длиной волны. Например, торец стержневого вибронда всегда передает малое количество звуковой энергии в жидкость. Если $kr=1$ удельное сопротивление излучения $Re_z = (p_{жс}c_{жс})/2$, а значение достигает максимума равного $(p_{жс}c_{жс})/2$. При дальнейшем увеличении величины kr сопротивление излучения Re_z непрерывно увеличивается асимптотически стремясь к значению $p_{жс}c_{жс}$. Реактивная компонента $|Im_z|$ асимптотически стремится к нулевому значению при больших значениях kr (рисунок 1.2).

Реактивная часть импеданса виброшара малой диаметра может быть представлена выражением

$$\text{Im}_Z = -ip_{жс}r\omega , \quad (1.4)$$

т.е. соответствует импедансу массы жидкости, распределенной по всей поверхности шара. Суммарная масса присоединенной жидкости шара в этих условиях составляет величину $4\pi r^3 \rho_{жс}$, т.е. равна массе жидкости в тройном объеме шара. Наличие такой присоединенной массы жидкости объясняет понижение собственной резонансной частоты нагруженного этой жидкостью виброшара по сравнению с резонансной частотой ненагруженного шара (колебания в воздухе).

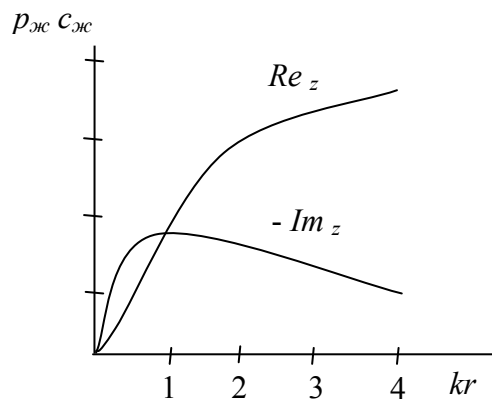


Рисунок 1.2 – Зависимость активной и реактивной (с обратным знаком) составляющих импеданса от параметра $kr = \omega/c_{ж}$ для шарового виброзонда

При размерах вибрационного измерительного зонда значительно меньших длины волны, создаваемой зондом, составляющей излучения сопротивления R_{a2} можно пренебречь. Составляющая активного вязкого сопротивления R_{a1} формируется в тонком пограничном слое и его величина пропорциональна значению $(\eta\rho_{жс}\omega)^{0,5}$.

Реактивная составляющая R_p комплексного механического сопротивления Z_M также определяется двумя составляющими. Первая составляющая R_{p1} обусловлена тем, что зонд перемещает с собой некоторый объем вязкой жидко-

сти, называемой присоединенной массой. Данная составляющая пропорциональна частоте колебаний зонда и величине присоединенной массы, а от вязкости не зависит. Вторая составляющая R_{p2} величины сопротивления R_p обусловлена перемещением массы вязкой жидкости пограничного слоя. Величина реактивного сопротивления R_{p2} , как и величина активного сопротивления R_{a1} , также пропорциональна значению $(\eta\rho_{ж}\omega)^{0,5}$. Теоретически пограничный слой оказывает колеблющемуся шару активное и реактивное сопротивления, равные по величине и пропорциональные значению $(\eta\rho_{ж}\omega)^{0,5}$. Величиной, обеспечивающей равенство сопротивлений $R_{a1} = R_{p1}$, является глубина пограничного слоя.

Рассмотрим физическое различие между рассмотренным выше зондом шаром и другими, реально используемыми в практике, конструкциями зондов, например, стержнями, совершающими крутильные, вращательные продольные и изгибные механические колебания.

Если стержень одним концом глухо закреплен, а к другому свободному концу вдоль его продольной оси приложить крутящий момент, то после снятия крутящего момента стержень совершает свободные крутильные колебания вокруг продольной оси. Вязкая жидкая среда, в которой совершаются крутильные колебания, радиально возмущена и оказывает только комплексное сопротивление Z_m пропорциональное $(\eta\rho_{ж}\omega)^{0,5}$, обусловленное массой и вязкостью пограничного слоя. Поперечные размеры стержня остаются неизменными и сам он линейно не смещается, а значит, присоединенная масса и излучение ультразвука отсутствуют, т. е. отсутствуют соответствующие им части реактивного R_p и активного R_a сопротивлений. Поэтому для стержней, совершающих крутильные колебания, выбор геометрических размеров стержня свободен.

Если стержень совершает продольные механические колебания вдоль собственной продольной оси, то они встречают со стороны вязкой жидкости комплексное сопротивление Z_m пропорциональное величине $(\eta\rho_{ж}\omega)^{0,5}$ на всей поверхности пограничного слоя стержня; а также активное сопротивление излучению и реактивное сопротивление присоединенной массы на свободном

конце стержня. Предпочтительной формой зонда для продольных колебаний является тонкая пластина, при этом толщина ее будет определять величину нежелательного сопротивления излучения в жидкость.

Изгибные колебания стержня сопровождаются перемещением по всей его длине определенного количества вязкой жидкости, огибающей измерительный стержень зонда. В данном случае характер нагрузки со стороны вязкой жидкости будет аналогичен нагрузке жидкости на шар.

Таким образом, не зависимо от конструкции измерительного зонда функцией вязкости всегда выступает активное или реактивное сопротивление импеданса пограничного слоя жидкости. Для нахождения вязкости контролируемой среды необходимо измерять активную или же реактивную составляющие полного импеданса Z_m .

При колебаниях измерительного зонда в воздухе он характеризуется собственной резонансной частотой ω_0 и механической добротностью Q_m , определяемой внутренними активными потерями. При частичном или же полном погружении вибрационного зонда в вязкую жидкость его исходные параметры изменяются. Присоединенная масса всегда понижает резонансную частоту, а вязкое трение вносит активные потери, уменьшающие величину механической добротности. Прямая зависимость вязкости от присоединенной массы пограничного слоя имеет место только для крутильных колебаний вибрационного зонда (круглого стержня). Измерение вязкости по величине резонансной частоты при продольных и изгибных колебаниях зонда является некорректным (неопределенным) из-за наличия присоединенной массы, которая в данных случаях зависит от плотности жидкости, существенно маскирующую массу пограничного слоя жидкости. Для рассматриваемых видов колебаний измерительных зондов потери на вязкое трение в жидкости сравнимы с внутренними активными потерями вибрационных зондов или же во много раз могут превышать их при измерении очень вязких жидкостей ($\eta \gg (0,1 \div 10) \text{ Па}\cdot\text{с}$). В данном случае определение вязкости ведется по активной составляющей комплексной реакции вязкой среды – контроль амплитуды механических колебаний, декремента за-

тухания или фазового соотношения между возбуждающей силой и скоростью колебаний на приемном преобразователе зонда.

Значит, всегда с применением вибрационных вискозиметров теоретически измеряют величину пропорциональную произведению $(\eta\rho_{ж}\omega)^{0,5}$. Так, как в большинстве практических случаев для различных жидкостей частота ω изменяется слабо, то можно считать, что выходным параметром вибрационных вискозиметров остается зависимость $(\eta\rho_{ж})^{0,5}$, в которой и должен градуироваться конкретный вискозиметр. Если считать, что плотность жидкости $\rho_{ж} = 1$, то вязкость в этих случаях называют приведенной. Истинную же вязкость находят делением приведенной вязкости на безразмерную величину, численно равную реальной плотности исследуемой жидкости.

При измерении вязкости на высоких частотах (10÷100 кГц) демпфирующие свойства многих жидкостей значительно уменьшаются из-за действия сдвиговой упругости жидкости, что приводит к большим погрешностям измерения. При мгновенном параллельном сдвиге двух поверхностей жидкой среды на небольшое расстояние возникает упругая деформация жидкости. После этого, вначале необходима сила для поддержания этой упругой деформации жидкости. Затем, по истечении некоторого времени молекулы жидкости начинают занимать свободное положение в пространстве. Переориентация происходит при вязком трении вследствие проскальзывания слоев жидкости за счет поворота ее частиц относительно друг друга. Первоначальное упругое напряжение (деформация) жидкости экспоненциально уменьшается во времени. Время, в течение которого деформация уменьшится в e раз, называют временем релаксации τ и оно пропорционально величине отношения η/G , где G – сдвиговая упругость жидкости. При времени релаксации равном $\sim 3\tau$ полностью завершается процесс упругой деформации, и жидкость полностью переходит в свободное ненапряженное состояние. При низкой частоте колебаний измерительного зонда длительность периода $T = (1 / f) \gg \tau$ и жидкость успевает «разрушиться» с напряженного состояния и ее слои уже свободно скользят относительно друг

друга. В этих условиях сдвиговая упругость не влияет на величину измеренной вязкости и эти измерения истинны.

Если величина времени периода колебаний зонда имеет соотношение $T \sim \tau$, то упругое сцепление в процессе измерения в жидкости не успевает разрушаться и «проскальзывание» слоев становится частичным, т. е. жидкость частично приобретает свойства «твердого» тела. При этих условиях сдвиговая упругость начинает занижать показания по вязкости, замеренные вибрационным вискозиметром.

Сдвиговая упругость реальной жидкости изменяет реакцию этой жидкости на колебания измерительного зонда. При приближении величины периода T к величине времени релаксации τ корневая зависимость $(\eta\rho_{ж}\omega)^{0,5}$ для составляющих R_a и R_p начинает нарушаться. Величина R_a при этом увеличивается медленнее по сравнению с зависимостью $\sqrt{\omega}$ и при $T \ll \tau$ остается практически постоянной величиной. Реактивная составляющая R_p при $T \sim \tau$ увеличивается медленнее, чем активная составляющая R_a , затем она достигает максимального значения. При этом по абсолютной величине $R_a > R_p$. При $T \ll \tau$ величина реактивного сопротивления R_p стремится к нулевому значению. Таким образом, если период времени колебаний вибрационного зонда существенно меньше времени релаксации $T \ll \tau$, то жидкость полностью приобретает свойства «твердого» тела. В этих условиях сдвиговая упругость жидкости сильно влияет на показания вибрационного вискозиметра, занижая показания измеренной вязкости в единицы и десятки раз.

Приведенные выше краткие теоретические изложения о влиянии сдвиговой упругости жидкости на результаты измерения ее вязкости в практике настоятельно рекомендует использование при любых видах колебаний вибрационных зондов как можно более низких частот (десятки и сотни Герц).

ГЛАВА 2

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ И ВИБРАЦИОННЫЕ ИСС НА ИХ ОСНОВЕ

Вибрационные вискозиметры весьма перспективны для использования в технике и имеют следующие основные преимущества: удобство и простоту использования, небольшие габариты вибрационного зонда, возможность контроля взрывоопасных жидкостей, возможность контроля вязкости жидкостей, находящихся при высокой температуре и высоком давлении, хорошие динамические параметры, возможность автоматизации процесса измерения и передачи информации как для исполнительных актюаторов агрегатов технологического процесса, так и передачи ее на большие расстояния по телеметрическим или беспроводным каналам связи на основе Интернет-технологий.

Основные контролируемые параметры вибрационного измерительного зонда – резонансная частота, амплитуда механических колебаний, сдвиг фаз между возбуждающей силой преобразователя и параметрами колебания приемного преобразователя зонда, а также декремент затухания механических колебаний.

Классификация вибрационных вискозиметров [1,2] приведена в таблице 2.1, из которой можно проанализировать преимущества и недостатки каждого метода измерения, приступая к практической реализации выбранного типа вискозиметра.

Таблица 2.1 – Классификация основных параметров вибрационных вискозиметров

Режим колебаний зонда	Измеряемая колебательная характеристика	Зонды с сосредоточенными параметрами		Зонды с распределенными параметрами	
		Резонансные	Апериодические	Резонансные	Бегущей волны
Вынужденные гармонические колебания	Амплитуда	Метод применим при малых D	Применим при $D \geq 1$	Применим при $D \ll 1$	Применим при $D > (\chi/(\chi+1))^{0.5}$
	Добротность	Высокая чувствительность при $\chi \ll 1$		Высокая чувствительность при $\chi \ll 1$	
	Сдвиг фаз	Применим в широком диапазоне D	Применим при $D > 1$	Применим в широком диапазоне D	Применим при $D > 1$
	Частота резонанса	Применим при $D \sim 1$		Применим при $D \sim 1$	
	Поглощение бегущей волны				Применим в широком диапазоне D
	Скорость распространения волны				При увеличении D погрешность уменьшается
Свободные колебания	Логарифмический декремент затухания	Высокая чувствительность при $\chi \ll 1$		Высокая чувствительность при $\chi \ll 1$	
	Собственная частота	Применим при $D \sim 1$		Применим при $D \sim 1$	
Гармонические автоколебания	Амплитуда	Высокая чувствительность при $\chi \ll 1$		Высокая чувствительность при $\chi \ll 1$	
	Частота	Низкая точность из-за фазовой неустойчивости частот		Низкая точность из-за фазовой неустойчивости частот	Эквивалентен скоростному методу при использовании зонда в звене обратной связи
Релаксационные автоколебания	Амплитуда		Методы применимы при широком диапазоне D		
	Частота				

где χ – коэффициент механических потерь, величина обратно пропорциональная механической добротности Q ($\chi = 1/Q$); D – коэффициент демпфирования вибронда контролируемой жидкостью.

В существующих вискозиметрах измерение вязкости ведут в двух режимах возбуждения вибрационных преобразователей измерительного зонда. В непрерывном режиме возбуждения измеряют следующие параметры зонда: частоту, амплитуду механических колебаний и фазовые соотношения между колебаниями возбуждающего и приемного преобразователей измерительного зонда. В импульсном режиме возбуждения – измеряют величину коэффициента (декремента) затухания вибрационного зонда.

Важнейшим теоретическим достижением в области вибрационной вискозиметрии является создание математических моделей для расчетов безразмерных коэффициентов демпфирования D_o измерительного зонда контролируемой жидкостью [1,2]. При этом для различных видов механических колебаний измерительных зондов выведены формулы для расчета коэффициентов D_o , связывающие конструктивные механические параметры зондов и параметры контролируемой жидкости – вязкость η и плотность $\rho_{ж}$ (таблица 2.2).

Для вибрационных вискозиметров предложен и используется ряд практических методов измерения вязкости жидкости. Ранее отмечалось, что понижение частоты колебаний зонда во всех отношениях весьма выгодно для построения вибрационных вискозиметров.

Существенным достижением в области разработки различных методов конструирования вибрационных вискозиметров, в т. ч. и при переходе к колебаниям низкой частоты является возможность использовать измерительные зонды неидеальной (неправильной) конфигурации, что позволяет удовлетворительно решить многие жесткие требования, продиктованные условиями использования вибровискозиметров в промышленных условиях.

Таблица 2.2 – Определения вязкого демпфирования для вибрационных измерительных зондов

Тип колебательного звена	Частота колебания		Коэффициент демпфирования	Обозначения
	Один конец жестко закреплен	Оба конца свободны		
Поступательные колебания, зонд с сосредоточенными параметрами			$\frac{D = h\sqrt{\rho_{жс}\eta}}{m\sqrt{2\omega}}$	h – площадь соприкосновения зонда с жидкостью; m – масса зонда
Вращательные колебания, зонд с сосредоточенными параметрами			$\frac{D = h\sqrt{\rho_{жс}\eta}}{J\sqrt{2\omega}}$	h – момент инерции площади соприкосновения зонда с жидкостью; J – момент инерции зонда
Продольные колебания, зонд с сосредоточенными параметрами	$\omega = \frac{(2n-1)\pi}{2l} \cdot \sqrt{E/\rho_3}$	$\omega = \frac{n\pi}{l} \sqrt{E/\rho_3}$	$\frac{D = h\sqrt{\rho_{жс}\eta}}{\rho_3 \sqrt{2\omega}}$	E – модуль Юнга; $n = 0, 1, 2, \dots$; l – длина зонда; h – отношение периметра поперечного сечения зонда к площади его сечения; ρ_3 – плотность материала зонда
Крутильные колебания, зонд с сосредоточенными параметрами			$\frac{D = h\sqrt{\rho_{жс}\eta}}{m\sqrt{2\omega}}$	h – отношение момента инерции периметра поперечного сечения зонда к моменту инерции площади этого сечения
Релаксационные			$\frac{D = h\sqrt{\rho_{жс}\eta}}{m\sqrt{2f}}$	f – частота релаксационных колебаний; h и m имеют ранее введенный смысл в зависимости от вида зонда
Изгибные колебания, зонд с распределенными параметрами	$\omega = \frac{(n\pi)^2}{l^2} \sqrt{\frac{El}{m}}$		$\frac{D = \sqrt{\rho_{жс}\eta}}{r\rho_3 \sqrt{2\omega}}$	$n_1 = 1,785$; l – длина зонда

При поступательных механических колебаниях в вязкой среде из-за сжимаемости жидкости происходит отвод энергии за счет излучения. С понижением частоты колебаний условия излучения звука в жидкость ухудшаются,

так как поперечные размеры вибратора (зонда) становятся весьма малыми по сравнению с длиной звуковых волн. При этом осциллирующий в жидкости зонд можно считать дипольным источником, поле которого в безграничной среде почти не зависит от его формы, а определяется только величиной создаваемого дипольного момента. В этих условиях колеблющееся тело можно заменить осциллирующим шаром такого же радиуса, чтобы он создавал одинаковый дипольный момент, как и реально рассматриваемое колеблющееся тело.

Рассмотрим некоторые параметры осциллирующего шара, выполняющего поступательные колебания. Давление в жидкости на поверхности шара в полярных координатах запишется в виде [1]

$$P(r, \theta) = \rho_{ж} c_{ж} U_o \cos \theta \frac{(kr)^4 - ikr[2 + (kr)^2]}{4 + (kr)^4} e^{-i\omega t}, \quad (2.1)$$

где U_o – амплитуда гармонических колебаний центра шара;

θ – угол, отсчитываемый от прямой, вдоль которой колеблется центр шара;

$k = \omega/c_{ж}$ – волновое число для продольных плоских волн.

Импеданс жидкости, нагружающий шар, из-за излучения звука, запишется в виде

$$Z = F/U = \frac{4}{3} \pi r^2 \rho_{ж} c_{ж} \left\{ \frac{(kr)^4}{4 + (kr)^4} - i \frac{kr[2 + (kr)^2]}{4 + (kr)^4} \right\} \quad (2.2)$$

и включает активную и реактивную составляющие. При этом импеданс Z жидкости зависит от модуля продольной объемной деформации среды через входящую в выражение (2.2) скорость распространения звуковых волн.

При уменьшении частоты и поперечных размеров зонда настолько, что $kr \ll 1$, импеданс стремится к значению

$$Z = -\frac{4}{8} i \pi r^2 \rho_{ж} c_{ж} (kr) = -i \omega \rho_{ж} \frac{V}{2} = -i \omega \frac{m_o}{2}, \quad (2.3)$$

где V – объем шара;

m_o – масса жидкости, заключенной в объеме шара.

На основании выше изложенного, можно заключить, что в самом общем случае импеданс жидкости, нагружающий колеблющейся в вязкой жидкости тело (зонд) любой геометрической формы, состоит из следующих компонент:

- активной составляющей (сопротивление R_{a1}) импеданса из-за излучения вязких волн в жидкость (как и для случая зонда в виде шара);
- реактивной составляющей (сопротивление R_{p1}) импеданса вязких волн, обусловленной величиной присоединенной массы жидкости (аналогично как при зонде-шаре);
- активной составляющей (сопротивление R_{a2}) импеданса за счет излучения звука в жидкость;
- реактивной составляющей (сопротивление R_{p2}) импеданса ввиду наличия лобового сопротивления, вызванного процессом обтекания вязкой жидкости вокруг осциллирующего тела (зонда).

То обстоятельство, что при малых по сравнению с длиной звуковой волны поперечных геометрических размеров осциллирующего тела (зонда) (выполняется условие $kr \ll 1$) можно упростить расчеты параметров таких измерительных зондов ввиду следующих условий.

1. Активная составляющая (сопротивление R_{a2}) импеданса Z излучения звука в контролируемую жидкость в соответствии с формулой (2.2) очень мала по сравнению с активной составляющей (сопротивление R_{a1}) импеданса вязких волн и может не учитываться с погрешностью

$$N \leq (kr)^4 / (\omega r / 2\nu)^{0,25}, \quad (2.4)$$

где $\nu = \omega / \omega_0$ безразмерная частота, на которой проводится реальное измерение;

ω_0 – резонансная частота ненагруженного зонда.

Условие (2.4) соответствует пренебрежению влиянием сжимаемости исследуемой жидкости на параметры вибрационного зонда.

2. Реактивная составляющая (сопротивление R_{p2}), обусловленная лобовым сопротивлением обтекания, с погрешностью, численно равной $(kr)^2$ может быть рассчитана при следующих упрощениях: не учитывается вязкость жидко-

сти; жидкость считается несжимаемой; форму тела (зонда) не учитывают и заменяют его шаром, создающий аналогичный дипольный момент, как и осциллирующее исходное тело.

3. При расчете импеданса вязких волн обязательно необходимо учитывать форму зонда. Однако если учесть пункты 1 и 2 и условие $(\omega r/2\nu)^{0,5} \gg 1$ (часто имеет место на практике), то вязкие волны считаются плоскими. Здесь, по-прежнему, форма тела (зонда) может не учитываться. Полный импеданс вязких волн рассчитываем умножением удельного импеданса плоских вязких волн $Z_0 = ((\eta\rho_{ж}\omega)/2)^{0,5} (i - 1)$ на полную площадь поверхности вибрационного зонда, соприкасающейся с контролируемой жидкостью.

4. Можно частично избавиться от влияния присоединенной массы на параметры зонда, обусловленные только влиянием активной компоненты (сопротивление R_{a2}) на потери колебательной энергии вибронда (механическая добротность Q_m , амплитуда колебаний).

5. Если проводится измерение плотности жидкости, то использование неидеальных зондов целесообразнее, чем идеальных. Здесь необходимо, в первую очередь, использовать такие характеристики зондов, которые связаны с присоединенной массой жидкости – резонансная частота, частота свободных колебаний, а также и фазовые соотношения.

Параметры реальных (неньютоновских) жидкостей можно определить из частотных зависимостей их вязкости и сдвиговой упругости. Равновесную вязкость необходимо всегда измерять при стационарном течении жидкости, что аналогично низкой (почти нулевой) частоте возбуждения зонда. Чем ниже частота, тем меньше погрешности измерений. Реальные промышленные среды: суспензии, эмульсии, растворы полимеров, кластерные гетерогенные жидкости считаются сплошными средами при расчете механического комплексного сопротивления сдвиговых волн на низких частотах. С ростом частоты глубина сдвиговых волн (рисунок 1.1) уменьшается и может стать соизмеримой с размерами кластерных включений и расстоянию между ними. При непрерывной работе вибрационного зонда для измерения вязкости коагулирующих или на-

липающих жидкостей, очень часто вибронд может покрываться тонкой пленкой коагулянта. При измерении в этих условиях показания прибора будут зависеть от величины сдвиговых модулей налипшей пленки, а не от вязкости контролируемой жидкости.

Значит и в этом случае, как и во многих случаях, использование низко- (инфра) частотных вибрационных зондов весьма удачно сказывается на повышении точности измерений и расширении диапазона набора жидких сред, контроль вязкости которых возможен с использованием вибрационных вискозиметров.

Очень существенным следствием понижения резонансной частоты виброндов для широкого использования в экстремальных условиях является разработка вибрационных зондов неидеальных (неправильной формы) конструктивных решений, в т. ч. и вибрационных зондов с сосредоточенными параметрами.

2.1 Амплитудный (автоколебательный) метод

Для жидкостей с динамической вязкостью $\eta \leq (5 \div 25)$ Па·с наиболее целесообразно использовать автоколебательный (амплитудный) метод измерения вязкости жидкостей, как наиболее простой, и легко поддающийся автоматизации. Метод обеспечивает наивысшую теоретически возможную чувствительность вибрационного измерительного зонда по вязкости. Измеряют максимальную (резонансную) амплитуду механических колебаний приемного преобразователя вибрационного зонда. Основные недостатки автоколебательного метода и вискозиметров, выполненных на его основе, неравномерность (до 2-3 порядков) чувствительности по измеряемому диапазону вязкостей, нелинейная и обратная зависимость показаний, т. е. при уменьшении вязкости увеличивается амплитуда механических колебаний.

Для исключения недостатков автоколебательного метода предложен компенсационный автоколебательный метод и изготовлены образцы вибраци-

онных вискозиметров [3-5]. Сущность компенсационного метода измерения состоит в том, что амплитуда механических колебаний измерительного зонда поддерживается постоянной путем соответствующего изменения величины возбуждающей силы (электрической мощности, тока или напряжения) возбуждающего преобразователя зонда. Величина возбуждающей силы преобразователя зонда является мерой вязкости контролируемой жидкости, при этом зависимость между этими параметрами прямая и практически линейная. Наиболее часто для амплитудного метода используют вибрационные зонды изгибных колебаний в виде цилиндрических стержней или камертонов.

На рисунке 2.1 приведены некоторые параметры вибрационного зонда, совершающего изгибные колебания и используемого в вискозиметрах вибрационной ИСС для измерения вязкости-плотности. Данная ИСС использовалась для измерения вязкости и плотности в составе агрегата приготовления вязких гомогенных и гетерогенных (смесь вязкой несущей жидкости с твердыми частицами, находящимися во взвешенном состоянии) рабочих жидкостей при проведении технологического процесса глубоко проникающего гидроразрыва нефтегазовых пластов для повышения производительности скважин. Конструктивно рассматриваемая ИСС измерения вязкости-плотности состоит из вибрационного измерительного зонда и электронного блока (рисунок 2.2). Зонд вибрационной системы выполнен в виде двух полуволновых круглых стальных тонких цилиндров и механически закреплен посередине своей длины, т. е. в узловой плоскости изгибных колебаний. Свободный (рабочий) конец зонда опускается в контролируемую жидкость, а на другом его конце в непосредственной близости к нему расположены четыре электромагнитные системы (катушки). В целом вибрационный зонд представляет собой высокочастотную электромеханическую систему, состоящую из двух поляризованных электромагнитных звеньев-преобразователей: возбуждающего и приемного, расположенных вблизи свободного конца зонда. В межплоскостном пространстве преобразователей помещена магнитомягкая стержневая вставка (зонд), вторая ветвь которого контактирует с анализируемой жидкостью (рабочий конец зонда).

Поляризованные электромагнитные системы вибратора (зонда) состоят из Ш-образного магнитопровода из магнитомягкого материала и постоянного магнита, выполненного из спецсплава. Постоянный магнит впрессован в магнитопровод и установлен внутри диэлектрического каркаса катушки. Каждая поляризованная электромагнитная система состоит из двух последовательно включенных индуктивностей с магнитопроводами, установленными в корпусе разноименными полюсами встречно.

Один из преобразователей служит для возбуждения зонда, а другой – используется для измерения амплитуды механических колебаний рабочего конца стержня зонда, совершающего механические колебания в воздухе (свободный или ненагруженный режим работы) или в контролируемой жидкости (нагруженный режим работы вибрационного зонда). Измерение вязкости ведут по амплитуде механических колебаний (возбуждающей силе) компенсационным методом, а измерение плотности – по величине резонансной частоты нагруженного жидкостью вибрационного зонда.

Резонансную частоту f и коэффициент демпфирования $D_{и}$ зонда (круглый стержень) рассчитывают по выражениям таблицы 2.2

$$f = \frac{1}{2\pi} (3,534/l^2) \sqrt{\frac{Er^4\pi}{4m_0}}, \quad (2.5)$$

$$D_{и} = \frac{\sqrt{\eta\rho_{ж}}}{r\rho_3\sqrt{2\omega_0}}, \quad (2.6)$$

где l , r , ρ_3 , E и m_0 – длина, радиус, плотность, модуль Юнга и масса единичной длины измерительного зонда.

Частота колебаний зонда выбиралась в пределах 300-400 Гц (рисунок 2.1,а), чтобы измерения вязкости были более точными и исключить влияние сдвиговой упругости жидкой среды. Для контролируемой жидкости с $\rho_{ж} = 880 \text{ кг/м}^3$ величина безразмерного коэффициента демпфирования $D_{и}$ для рассматриваемого зонда с $r = 2\div 4$ мм при увеличении вязкости от 10^{-3} до 50 Па·с

увеличивается от нулевого до значений $D_{и} = 0,3-0,4$. При этом чем меньше радиус зонда тем больше чувствительность (выше значение $D_{и}$) (рисунок 2.1,б).

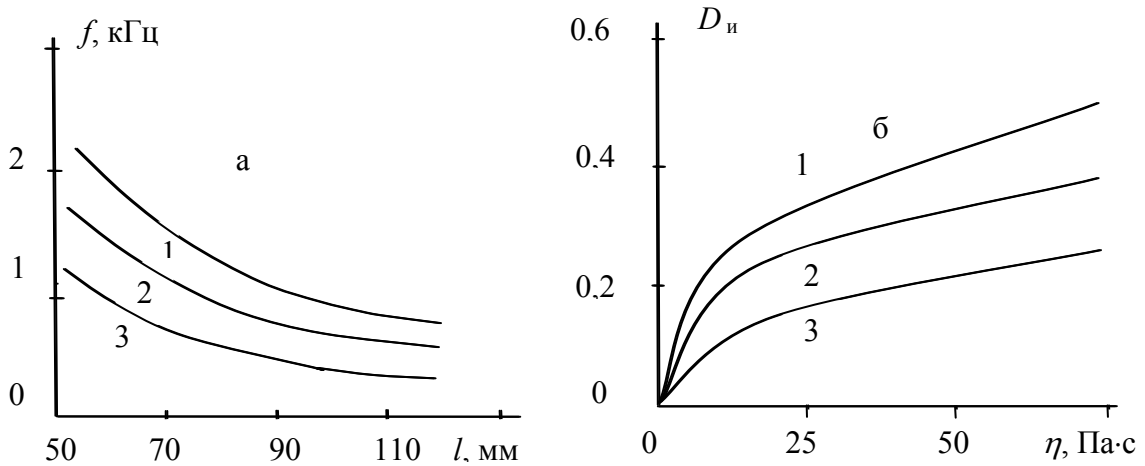


Рисунок 2.1 – Зависимость резонансной частоты (а) и коэффициента демпфирования (б)

Чувствительность вибрационного вискозиметра к величине вязкого демпфирования измерительного зонда контролируемой жидкостью для автоколебательного и компенсационно-автоколебательного методов записываются одним и тем же выражением

$$C_{A,F} = dA/dD = dF/dD = (\chi + D + \chi D), \quad (2.7)$$

где F – возбуждающая сила (электрическое напряжение или ток);

A – амплитуда механических автоколебаний зонда, нормированная по предельной амплитуде при частоте, стремящейся к нулю;

$\chi = 1/Q$ – тангенс угла механических потерь (механические потери) упругого подвеса мембраны вибрационного зонда. Для зондов с малыми потерями величина $\chi = 10^{-2} - 10^{-5}$.

На рисунке 2.2, в качестве примера, приведены зависимости чувствительности $C_{A,F}$ от величины демпфирования D при различных значениях тангенса механических потерь χ . Видно, что чувствительность автоколебательного метода увеличивается с уменьшением величины χ , причем ее максимальное

значение $C_{A \max} = \chi^2$. Чувствительность резко падает с увеличением коэффициента демпфирования D (т. е. с ростом вязкости), особенно при малых значениях χ .

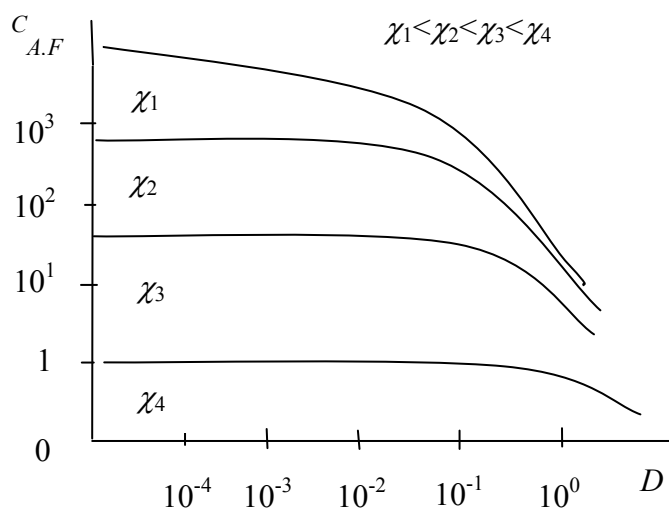


Рисунок 2.2 – Чувствительность автоколебательного и компенсационного методов

Разработанная ИСС (рисунок 2.3) с микропроцессорным интерфейсом на выходе [4, 5], используемая в составе автоматического комплекса реанимации нефтегазовых скважин методом гидроразрыва пластовых пород вокруг коллектора в устье скважины, позволяет измерять динамическую вязкость η и плотность $\rho_{жс}$ гомогенных и гетерогенных жидкостей. На рисунке 2.4 приведена ее функциональная схема, выполненная на основе предложенного компенсационного автоколебательного метода. В измерительной емкости (резервуар или трубопровод) с контролируемой вязкостью помещается вибрационный зонд 1. Возбуждающий 2 и приемный 3 преобразователи зонда включены к входу и выходу синхрокольца усилительного тракта схемы самовозбуждения электронного блока и являются элементами механической обратной связи колебательных звеньев зонда. Кольцо самовозбуждения, кроме усилителей, содержит фазовращатель 4, обеспечивающий необходимый баланс фаз, при котором автоматически устанавливается резонансная частота автоколебаний зонда

1(свободного или нагруженного жидкостью). Усилитель-ограничитель 5 исключает нестабильность кольцевого усиления электронного тракта на выходные показания вискозиметра. Полосовой фильтр 6 выделяет первую гармонику напряжения возбуждения усилителя-ограничителя 5 и подает его на вход согласующего усилителя 7, что и обеспечивает чисто гармонические (синусоидальные) колебания возбуждающего преобразователя 2 вибрационного измерительного зонда 1.



Рисунок 2.3 – Внешний вид вибрационной ИСС измерения вязкости-плотности

Для регулирования величины возбуждающей силы (электрической мощности, силы тока), подаваемой на обмотку возбуждения 2 зонда, служит управляемый аттенюатор 8, регулирующий амплитуду входного напряжения усилителя мощности 9. Аттенюатор 8 имеет регулируемый коэффициент усиления, величина которого изменяется в широких пределах при помощи сборки полевых транзисторов. Для изменения тока возбуждения обмотки 2, переменное напряжение с выхода приемной электромагнитной обмотки преобразователя 3 зонда 1 усиливается в блоке 10, затем детектируется в блоке 11 в постоянное напряжение, которое и подается на один из входов сравнивающего устройства 12, на второй вход которого подается постоянное напряжение от эталонного источника напряжения 13.

С выхода усилителя-ограничителя 14 постоянное управляющее напряжение подается на вход аттенюатора 8. Значит, на выходе сравнивающего устройства 12 и соответственно на входе аттенюатора 8 сигнал управления будет

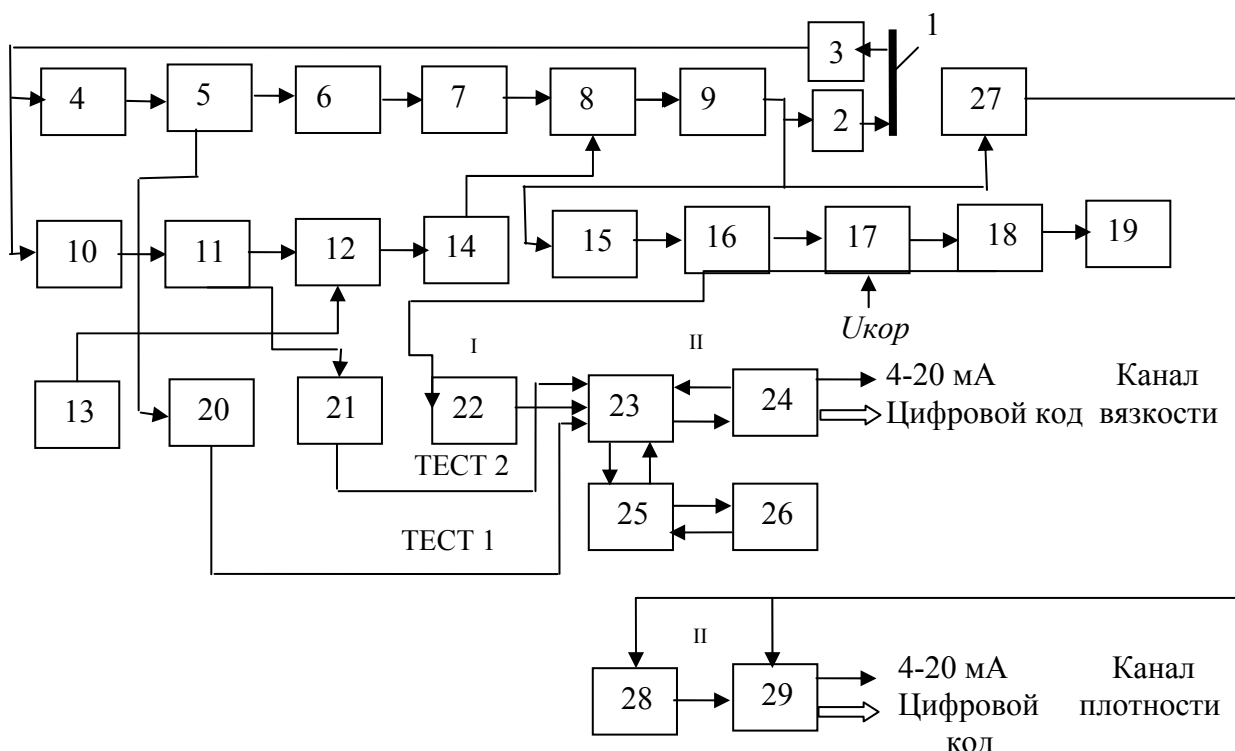


Рисунок 2.4 – Функциональная схема ИСС измерения плотности-вязкости

отсутствовать лишь в том случае, если амплитуда автоколебаний зонда равна значению установленного опорного напряжения – $U_{опор}$ блока 13. В противном случае происходит изменение выходного напряжения усилителя 7 в аттенюаторе 8, а затем и через усилитель мощности 9 до тех пор, пока амплитуда колебаний зонда 1 не достигнет заданного исходного уровня, обусловленного величиной измеряемой вязкости.

Для отсчета информации о вязкости контролируемой жидкости электрическое напряжение с выхода усилителя мощности 9 через согласующий усилитель 15 детектируется в блоке 16 в постоянное напряжение и подается на один из входов сумматора 17, на второй вход которого подается напряжение $U_{кор}$ для корректировки на нулевое значение выхода вискозиметра при работе зонда в воздухе. Напряжение от сумматора 17 подается на схему линеаризации 18. Выходное напряжение схемы 18 используется как для визуального наблюдения на

индикаторе 19, так и для автоматического управления через соответствующую мини-ЭВМ исполнительными элементами технологического процесса гидроразрыва. Связь ИСС вязкости и плотности с мини ЭВМ организуется через 12-и разрядный интерфейс следующим образом.

Например, для канала вязкости аналоговая информация со схемы 18 в виде выходного унифицированного тока (4-20) мА или напряжения (0-5) В подается на вход интерфейса, состоящего из модуля преобразования I и модуля измерения и обработки II. В модуле I входное напряжение преобразуется интегрирующим АЦП (преобразователь напряжение – частота КР1108ПП) 22 в частоту $f = (2,5-12,5)$ кГц. Модуль II включает микроконтроллер 23 (КР 1835ВГ14), буферный регистр 25 (КР588ИР), постоянное перепрограммируемое запоминающее устройство (ППЗУ) 26 (КС573РФ2) и 4-х канальный согласователь 24 выхода интерфейса со входом мини ЭВМ.

Для измерения плотности жидкости (канал плотности) выходное напряжение усилителя мощности 9 (частота 300-400 Гц) подается в блок 27 формирования временной длительности полупериода частоты возбуждающего преобразователя 2 измерительного зонда. Затем прямоугольные импульсы с выхода блока 27 подаются в модуль измерения и обработки информации о плотности 29, аналогичный блоку II в канале измерения вязкости. Для получения унифицированного тока (4-20) мА, пропорционального плотности контролируемой гетерогенной или гомогенной жидкости, используют интегрирующий преобразователь длительность импульса – ток (напряжение) 28.

Выходные сигналы (аналоговый и цифровой код) отдельно по каналу вязкости и каналу плотности подаются через соответствующие интерфейсы для использования как в отдельных исполнительных актюаторах технологического процесса гидроразрыва пласта, так и в общей процессорной системе автоматического управления и контроля (не показана на схеме) технологического процесса гидроразрыва пласта при реанимации нефтегазовых скважин.

Для повышения надежности получаемой и передаваемой информации вводятся элементы самотестирования, а также 4-х канальные (информационные

и синхронизирующие) цифровые выходы, при этом согласователи 24 выполнены на развязывающих оптопарах. В ППЗУ 26 записываются программы для работы соответствующих интерфейсов отдельно по каналам плотности и вязкости. Программа обеспечивает прием импульсов, измерение частоты АЦП, ее усреднение по пяти точкам и преобразование этой частоты в 8-ми разрядный ток. В составе ИСС имеются блоки самодиагностики и самотестирования. Формируются две посылки в 1-й и 2-й разряды информационного слова о нахождении величины измеряемой вязкости или плотности в заданном диапазоне измерения. Кроме того, на вход интерфейса вязкости (микроконтроллер 23) поступают два тестовых сигнала (постоянное напряжение) ТЕСТ 1 и ТЕСТ 2 о работоспособности основных узлов вибрационной ИСС. При правильной работе синхрокольца возбуждения ИСС сигнал с выхода усилителя 5 (контроль работоспособности канала приемного преобразователя 2 зонда 1) детектируется в схеме 20 и в виде посылки ТЕСТ 1 постоянным напряжением $U = (2-3) В$ подается на вход микроконтроллера. При правильной работе кольца стабилизации возбуждающей силы преобразователя (канал возбуждения) зонда 1 постоянное напряжение с выхода детектора 11 через детектор-согласователь уровней 21 в виде посылки ТЕСТ 2 с постоянным напряжением $U = (2-3) В$ также подается на вход микроконтроллера 23. Тестовые сигналы ТЕСТ 1 и ТЕСТ 2 затем формируются в информационном слове в 0-м и 3-ем разрядах цифровых выходных кодов отдельно по каналу вязкости и каналу плотности. Измерение и формирование выходных посылок происходит в реальном масштабе времени.

Зная исходные величины η и $\rho_{жс}$ гомогенной вязкой среды при непрерывном введении в ее состав твердых сыпучих примесей сферической и несферической формы диаметром частиц (0,8÷1,2) мм измеряют величины плотности и приведенной динамической вязкости $(\eta_c \rho_{жс})^{0,5}$ гетерогенной смеси. По приведенной измеренной вязкости находят реальную динамическую вязкость η_c смеси делением ее на численное значение плотности. Определение концентрации добавок и плотности смеси ведут на основании поправок.

Теоретический расчет динамической вязкости гетерогенных смесей (с твердыми сыпучими добавками) основывается на поправке Эйнштейна [6]

$$\frac{\eta_1}{\eta_o} = 1 + \alpha \frac{\eta_o + \frac{5}{2}\eta_2}{\eta_o + \eta_2}, \quad (2.8)$$

где η_1 , η_o , η_2 – динамическая вязкость смеси, несущей вязкой жидкости и твердой или газообразной фазы;

α – объемная концентрация примеси.

Если в качестве примеси используется сыпучие твердые компоненты сферической формы с отношением поперечных геометрических размеров частиц в пределах 1,0-1,5, то в выражении (2.8) можно принять $\eta_2 = \infty$. В результате упрощения выражение (2.8) для величины вязкости гетерогенной смеси примет вид

$$\eta_1 = \eta_o \left(1 + \frac{5}{2} \alpha \right). \quad (2.9)$$

Если же твердые частицы имеют несферическую форму, но близкую к эллипсоидам вращения с отношением диаметров в пределах 1:(~3), то получим значение динамической вязкости в виде

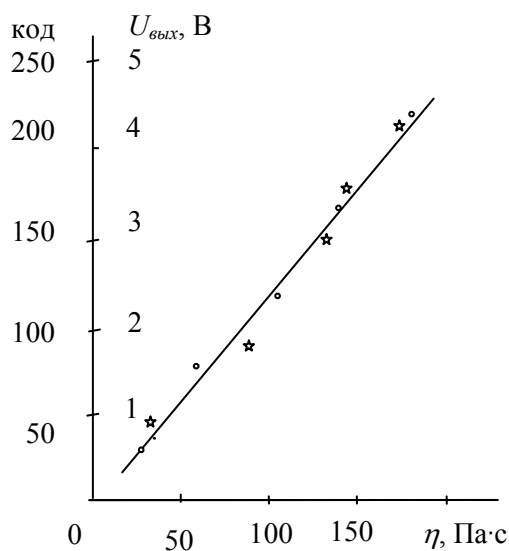
$$\eta_1 = \eta_o (1 + 5\alpha). \quad (2.10)$$

Анализируя выражения-поправки (2.8 – 2.10) можно утверждать, что динамическая вязкость гетерогенных смесей, включающих несущую вязкую основу и твердые добавки, всегда возрастает с увеличением концентрации добавок. Зная исходную плотность и вязкость несущей жидкой основы и измеряя приведенную динамическую вязкость и плотность полученной смеси, можно определить как концентрацию добавок в смеси, так и вязкость полученной смеси.

Все вычислительные операции по определению концентрации добавок, плотности и вязкости, а также формирование управляющих и унифицирован-

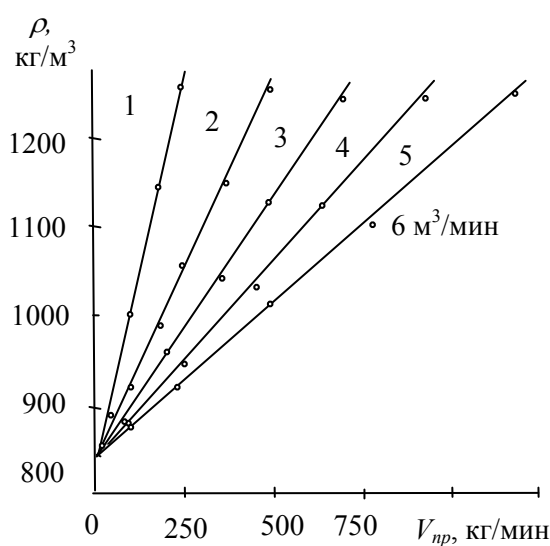
ных аналоговых (ток 4-20 мА) и цифровых (N – разрядных) кодов отдельно по каналам вязкости и плотности ведутся с помощью двух встроенных микроконтроллерных интерфейсов. Такие интеллектуальные ИСС по определению [7] относятся к микросистемной технике.

На рисунках 2.5 и 2.6 в качестве примера приведены экспериментальные зависимости величин вязкостей полиэмульсии ПЭГН-1 и углеводородного геля НГА 37/44 и плотности применительно к рабочим жидкостям (смесь углеводородного геля с пропантом) глубокопроникающего гидроразрыва нефтяных пластов.



* - полиэмульсия ПЭГН-1,
 • - гель НГА 37/44

Рисунок 2.5 – Зависимость вязкости исходной фазы пескопропантонесущей рабочей смеси для гидроразрыва



1 - $V_c = 1$ м³/мин; 2 - 2; 3 - 3; 4 - 4; 5 - 5;
 6 - $V_c = 6$ м³/мин

Рисунок 2.6 – Зависимость плотности рабочей жидкости гидроразрыва от скорости подачи пропанта V_{np} при различных объёмах закачки в скважину

Питание ИСС вязкости-плотности выполняется постоянным напряжением ± 15 В и ± 5 В через сетевые фильтры от гальванически развязанных стабилизаторов напряжения постоянного тока.

Лучшие отечественные и зарубежные образцы автоколебательных (амплитудных) вибрационных вискозиметров на изгибных колебаниях круглых стержней или камертонов имеют погрешность $0,3 \div 1,0$ % [3-5, 8].

2.1.1 Методические рекомендации к проектированию ИСС измерения вязкости при использовании изгибных колебаний стержневых зондов

1. Подробно ознакомиться с разделами 1, 2, 2.1, 3-7 настоящей работы.

2. Вибрационные зонды изгибных колебаний стержней правильной формы (круглый цилиндрический стержень, пластина прямоугольной формы, камертонные сдвоенные стержни) используют для одновременного измерения вязкости и плотности контролируемой жидкости. Вязкость определяется по величине амплитуды механических колебаний или же по декременту затухания измерительного зонда. Плотность жидкости однозначно определяют по величине резонансной частоты измерительного зонда, нагруженного вязкой контролируемой жидкостью.

3. При конструировании вибрационных вискозиметров материал для вибросигнального зонда должен обладать малыми несовершенствами упругости, высокой релаксационной стойкостью, стабильностью упругих свойств во времени и в переменных внешних условиях, необходимой коррозионной стойкостью при работе с агрессивными средами. В качестве материалов для вибросигнальных измерительных зондов используют углеродистые стали и сплавы. Для высокого класса ИСС вибровискозиметрии при измерении неагрессивных жидких сред и при небольшом температурном диапазоне окружающей среды для изготовления вибросигнальных зондов хорошо использовать хромкремниймарганцевистую сталь 35ХГСА с повышенной коррозионной стойкостью, высокой прочностью, повышенной износостойкостью и умеренной вязкостью. Для ИСС измерения вязкости общего назначения вибросигнальные зонды можно изготавливать из сталей 35ХГС, 50ХГА, 50ХФА, а также из сталей 20Х13 и 40Х13.

Для образцовых и 1-го класса ИСС измерения вязкости и плотности при работе в агрессивных средах и повышенной температуре для изготовления вибросигнальных зондов необходимо использовать элинварный сплав 44НХТЮ – ферромагнитный сплав с железохромникелевой основой с добавками титана и алюминия.

Для исключений температурных погрешностей материал виброчастотного зонда должен иметь практически нулевые температурные коэффициенты линейного расширения и изменения модуля упругости.

Материалы для виброчастотных измерительных зондов должны быть ферромагнетиками, способными хорошо взаимодействовать с магнитным полем для построения качественных электромагнитных преобразователей зонда (возбуждающего и приемного).

4. Для зонда в виде цилиндрического стержня, совершающего изгибные отгибания и выбранного для него материала по конструктивно ориентировочным параметрам зонда: плотности ρ_z , модулю Юнга E , радиусу r и длине l по формуле (2.5) провести моделирование (расчет) резонансной частоты ненагруженного зонда. Построить семейство резонансных частот в зависимости от выбранных конструктивных параметров (подобно рисунку 2.1 а). По приведенным зависимостям окончательно выбрать резонансную частоту (в диапазоне 50-200 Гц) ненагруженного зонда, его диаметр и длину.

5. Для выбранного измерительного зонда по формуле (2.6) провести моделирование зависимости коэффициента демпфирования D зонда от величины динамической вязкости η и плотности $\rho_{ж}$ контролируемой жидкости и параметров измерительного зонда – ω_0 , l , ρ_z и r (см. п. 4). Построить семейство зависимостей $D = \Psi(\omega_0, l, \rho_z, r)$.

6. В зависимости от полученных результатов расчетов (п. 4, 5), и учитывая прочностные конструктивные параметры виброзонда, выбираем форму зонда – цилиндрический стержень с параметрами, обеспечивающими максимальную чувствительность к вязкости (величина коэффициента демпфирования D максимальна). При этом стремиться к минимальному диаметру зонда не следует, т. к. кроме основной моды изгибных колебаний могут возникнуть паразитные механические колебания, приводящие к существенным погрешностям измерений.

7. Для первой моды изгибных колебаний зонда ($f = 50-200$ Гц) разработать его конструкцию так, чтобы механическое закрепление в его нулевой (уз-

ловой) плоскости механических колебаний обеспечивало минимальные механические потери, т. е. $\chi \leq (10^{-2} - 10^{-3})$ (механическая добротность зонда $Q \geq 100-1000$). Механические потери можно определить по методике, изложенной в работе [14].

8. По формуле (3.4) определить величину коэффициента ошибки в зависимости от коэффициентов механических потерь χ и демпфирования D . Оценить полную относительную погрешность по формуле (3.1).

9. В качестве электромеханических преобразователей вибрационного зонда – возбуждающего и приемного можно использовать пьезоэлектрические и электромагнитные преобразователи [12].

10. Для улучшения метрологических параметров ИСС измерения вязкости с использованием изгибных колебаний необходимо использовать только автоколебательный компенсационный метод измерения. При этом методе амплитуда механических колебаний нагруженного зонда автоматически поддерживается постоянной за счет соответствующего изменения возбуждающей силы (электрической мощности) возбуждающего преобразователя вибронда. Величина возбуждающей силы является мерой измеряемой вязкости контролируемой жидкости.

11. Построение электронной части ИСС измерения вязкости должно быть выполнено подобно функциональной схеме, приведенной на рисунке 2.4. Электронная часть ИСС измерения параметров контролируемой жидкости должна состоять из двух частей: канал измерения динамической вязкости и канал измерения плотности. Все электронные блоки выполнять по методикам, изложенным в работе [13]: – измерение частоты вести по методике, изложенной на стр. 69-88.

12. Определение плотности контролируемой жидкости ведется по измерению резонансной частоты нагруженного зонда. Уменьшение частоты нагруженного зонда обусловлено наличием присоединенной массы жидкости (см. пункт 1). Измерение резонансной частоты нагруженного зонда (измерение

плотности жидкости) необходимо вести по методике, изложенной на стр. 69-88 источника [13].

13. В электронной части обязательно должны быть введены элементы самодиагностики, самотестирования и идентификации.

14. Для функциональной обработки измерительной информации, параметров самодиагностики, самотестирования и идентификации, а также формирования выходных унифицированных сигналов (аналогового и цифрового) в состав электронной части обязательно должен вводиться микроконтроллер.

15. Для передачи выходной информации потребителю используется токовая петля, телеметрическая система или каналы беспроводной связи, выполненные в соответствии с мировыми стандартами IEEE 1451.1-1451.5; 802.11-802.16.

2.2 Частотно-фазовый метод

Расширение диапазона измерения вязкостей жидкости получают при использовании двух разновидностей фазового метода. При частотно-фазовом методе (диапазон измерения $\eta \leq 150$ Па·с) последовательно измеряют резонансные частоты свободного (ω_0) и нагруженного контролируемой жидкостью (ω) вибронда при сдвиге фаз между возбуждающей силой и скоростью колебаний зонда равным $\varphi = \pi/2$. Значение вязкости η жидкости определяют по выражению [9]

$$\eta\rho_{ж} = C \frac{(\omega_0^2 - \omega^2)^2}{\omega^3}, \quad (2.11)$$

где $C = m^2 / 8 S^2$;

m – масса;

S – площадь зонда.

Из анализа выражения (2.11) очевидно, что все величины, входящие в него определяются независимо друг от друга. Метод не требует дополнитель-

ных калибровок, является абсолютным и поэтому весьма ценен для развития вибрационной вискозиметрии. Однако, пока данный метод не получил достаточного распространения и в литературных источниках не известны реальные конструкции вибрационных измерителей, выполненных на его основе.

Для практической реализации данного частотно-фазового метода нами предлагается следующая структурная схема ИСС измерения вязкости (рисунок 2.7).

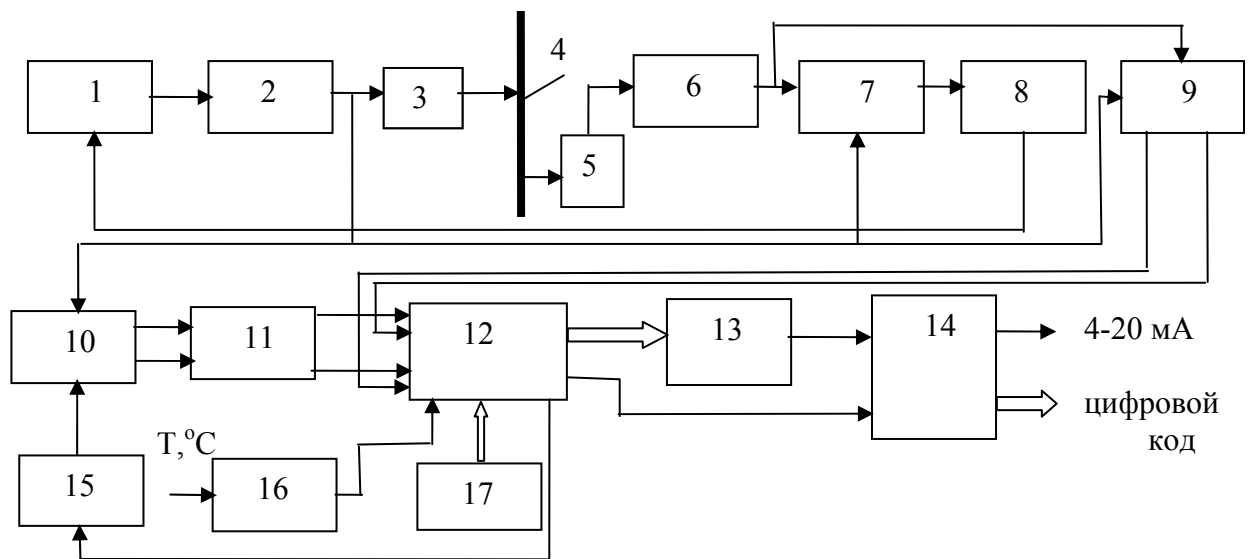


Рисунок 2.7 – Структурная схема частотно-фазовой ИСС вискозиметрии

Задающий генератор 1 вырабатывает низкочастотное напряжение, которое через усилитель мощности 2 подается на преобразователь 3 для возбуждения механических колебаний измерительного зонда 4. С приемного преобразователя 5 зонда 4 электрическое напряжение через усилитель 6 подается на один из входов фазового детектора 7, на второй вход которого подается электрическое напряжение с выхода усилителя мощности 2. При сдвиге фаз $\varphi = \pi/2$ между напряжениями преобразователей 3 и 5 зонда 4 выходное напряжение фазового детектора 7 равно нулю и оно не изменяет частоту генератора 1. Если же угол $\varphi \neq \pi/2$, то выходное напряжение фазового детектора 7 имеет конкретное значение и определенную полярность и оно через частотный модулятор 8 изменяет частоту генератора 1 в такую сторону, чтобы при изменении резонансной

частоты зонда 4, угол сдвига фаз стремился к значению $\varphi = \pi/2$ и выходное напряжение фазового детектора 7 стремилось к нулевому значению. Через мультиплексор 10, управляемый напряжением блока 15, выходные напряжения усилителя мощности 2 частот ω_0 и ω раздельно во времени подаются на преобразователь частота-код 11. Затем код подается на вход микроконтроллера 12. Микроконтроллер 12 производит вычисление вязкости по формуле (2.11) и формирует выходные унифицированные сигналы – аналоговый ток 4÷20 мА и цифровой N -разрядный код для передачи их через выходной интерфейс 14 потребителю. Для формирования токового сигнала служит преобразователь цифровой код-ток 13. Для выполнения операций диагностики и самотестирования используется устройство 9, на входы которого подаются выходные напряжения усилителей 2 (контроль правильности функционирования канала возбуждающего преобразователя зонда) и 6 (контроль правильности функционирования канала приемного преобразователя). Постоянные выходные напряжения устройства 9 подаются в микроконтроллер 12 и далее представляются в выходном цифровом коде соответствующими значениями разрядов. Программа работы вискозиметра предварительно заносится в ППЗУ 17. Для введения температурных поправок по результатам измерения и приведения значения вязкости к температуре 20°C в состав вискозиметра вводится сенсор температуры 16. Управление по выбору частот ω_0 и ω происходит напряжением микроконтроллера 12 через блок 15, который управляет мультиплексором 10.

По частотно-фазовому резонансному методу наиболее целесообразно строить вибрационные вискозиметры, измерительный зонд которых совершает крутильные колебания и механическая добротность имеет очень высокое значение ($Q \geq 500-1000$). При крутильных колебаниях отсутствует присоединенная масса жидкости и излучение звука и масса пограничного слоя обтекания мала, поэтому и зонды должны быть весьма чувствительными и иметь малую массу. Наилучшим вариантом конструктивного исполнения вибрационного зонда крутильных колебаний является пустотелый цилиндрический зонд.

Измерение вязкости по частотно-фазовому методу для зондов продольных и изгибных колебаний является сложной задачей, из-за влияния присоединенной массы, которая является функцией плотности жидкости.

Известно, что для измерения динамической вязкости в расширенном диапазоне значений использовали амплитудно-частотный метод, при котором частота зонда при погружении его в контролируемую жидкость остается постоянной и равной частоте ненагруженного зонда (нагрузка на воздух). Однако при таком методе измерения вязкости по частоте имеют место большие погрешности, особенно в области малых значений вязкости при $\eta < 10^{-2}$ Па·с[9]. Для значений вязкости $\eta > (50 - 100)$ Па·с этот метод полностью не пригоден.

2.2.1 Методические рекомендации к проектированию ИСС измерения вязкости при вращательных (крутильных) колебаний цилиндрических стержневых зондов

1. Подробно ознакомиться с разделом 1, 2, 2.2 и 3-7 настоящей работы.

2. Для измерения вязкости в диапазоне до 150 Па·с используем частотно-фазовый метод, а в качестве измерительных зондов используем цилиндрические стержни, совершающие крутильные колебания вокруг их продольной оси. Вязкость определяется по величине резонансных частот нагруженного и ненагруженного измерительного зонда.

3. При конструировании вибрационных вискозиметров материал для вибросигнального зонда должен обладать высокой релаксационной стойкостью, стабильностью упругих свойств во времени и в переменных внешних условиях, необходимой коррозионной стойкостью при работе с агрессивными средами. В качестве материалов для вибросигнальных измерительных зондов используют стали и сплавы. Для высокого класса ИСС вискозиметрии при измерении вязкости неагрессивных жидких сред и при небольшом температурном диапазоне окружающей среды для изготовления вибросигнальных зондов используют хромокремниевую марганцевистую сталь 35ХГСА, которая имеет повышенную коррозионную

стойкость, высокую прочность, повышенную износостойкость и умеренную вязкость. Для ИСС измерения вязкости общего назначения виброчастотные зонды можно изготавливать из сталей 35ХГС, 50ХГА, 50ХФА, а также из сталей 20Х13 и 40Х13.

Для образцовых и 1-го класса ИСС измерения вязкости и плотности при работе в агрессивных средах и повышенной температуре для изготовления виброрезонансных зондов используют элинварный сплав 44НХТЮ, который обладает высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками. Для исключений температурных погрешностей материал виброчастотного зонда должен иметь практически нулевые температурные коэффициенты линейного расширения и изменения модуля упругости.

Материалы для виброчастотных измерительных зондов должны быть ферромагнетиками, способными хорошо взаимодействовать с магнитным полем для построения качественных электромагнитных преобразователей зонда (возбуждающего и приемного).

4. Для измерительного зонда в виде цилиндрического стержня из выбранного для него материала по конструктивно ориентировочным параметрам зонда: плотности ρ_3 , модулю сдвига G , радиусу r и длине l стержня по формуле (2.5) провести моделирование (расчет) резонансной частоты ненагруженного зонда, совершающего крутильные колебания по формуле

$$\omega_0 = [(2n-1) \pi (G/\rho_3)^{0.5}]/2l, \quad (2.12)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$

Цилиндрический стержень закреплен глухо одним концом, а другой конец стержня свободен.

5. Выбираем частоту крутильных колебаний в диапазоне $f = (50-200)$ Гц, при этом для повышения чувствительности цилиндрический зонд можно выполнить пустотелым и по возможности большего диаметра (2,0-10) см для вовлечения большего объема сдвиговой жидкости пограничного слоя в колебательный процесс.

6. Для ориентировочно выбранной конструкции измерительного зонда крутильных колебаний с распределенными параметрами по формуле таблицы 2.2 и источников [1,2] провести моделирование зависимости коэффициента демпфирования D зонда от величины динамической вязкости η и плотности $\rho_{жс}$ контролируемой жидкости и параметров измерительного зонда – ω_0, l, p_3 и r . Построить семейство зависимостей $D = \Psi(\omega_0, l, p_3, r)$, из которых по максимуму чувствительности окончательно скорректировать конструктивные параметры зонда – материал зонда, длину и его диаметр.

7. Разработать конструкцию измерительного зонда крутильных колебаний так, чтобы механическое закрепление обеспечивало минимальные механические потери на резонансной частоте ненагруженного зонда, т.е. $\chi \leq (10^{-2} - 10^{-3})$ (механическая добротность зонда $Q \geq (100-1000)$). Механические потери можно измерять по методике, изложенной в работе [14].

В качестве электромеханических преобразователей вибрационного зонда – возбуждающего и приемного лучше использовать пьезоэлектрические или электромагнитные преобразователи [12].

8. Построение электронной части ИСС измерения вязкости должно быть выполнено подобно функциональной схеме, приведенной на рисунке 2.7. Выполнение электронных блоков функциональной схемы частотно-фазовой ИСС вискозиметрии выполнять по методикам, изложенным в работе [13].

9. Определение вязкости контролируемой жидкости ведется по измерению резонансной частоты нагруженного зонда. Уменьшение частоты нагруженного зонда обусловлено наличием массы жидкости сдвиговой волны пограничного слоя (см. пункт 1). Измерение резонансной частоты свободного и нагруженного зонда (измерение вязкости жидкости) необходимо вести по методике, изложенной на стр. 69-88 источника [13]. Определение вязкости вести по формуле (2.11).

10. В электронную часть ИСС виброчастотного вискозиметра обязательно должны быть введены элементы самодиагностики, самотестирования и идентификации.

11. Для функциональной обработки измерительной информации, формирования параметров самодиагностики, самотестирования, идентификации, а также формирования выходных унифицированных сигналов (аналогового и цифрового) в состав электронной части ИСС обязательно должен вводиться микроконтроллер.

12. Для передачи выходной информации от ИСС измерения вязкости потребителю используется токовая петля, телеметрическая система или каналы беспроводной связи, выполненные в соответствии с мировыми стандартами IEEE 1451.1-1451.5, 802.11-802.16.

2.3 Фазовый вибрационный метод

Для существенного расширения диапазона измеряемой динамической вязкости вплоть до величин (10^6 - 10^7) Па·с предложен фазовый метод, при котором измеряют величину фазового сдвига φ между электрическими напряжениями возбуждающего и приемного преобразователей вибрационного измерительного зонда [1]. Для данного фазового метода вибрационные зонды должны иметь только сосредоточенные параметры и в исследуемой вязкой жидкости должны создавать плоские сдвиговые волны. Для вибрационных зондов используют поступательные и вращательные (крутильные) механические колебания. Значения безразмерных коэффициентов демпфирования используемых зондов запишутся выражениями [2]:

зонд поступательных колебаний

$$D_{II} = \frac{h \sqrt{\eta \rho_{ж}}}{m \sqrt{2\omega_o}}, \quad (2.13)$$

зонд вращательных колебаний

$$D_B = \frac{M \sqrt{\eta \rho_{ж}}}{J \sqrt{2\omega_o}}, \quad (2.14)$$

где h – площадь соприкосновения зонда с жидкостью;

m – масса зонда;

M – момент инерции площади соприкосновения зонда с жидкостью;

J – кинетический момент инерции зонда.

Для моделирования величины коэффициентов демпфирования D_o для поступательных и вращательных колебаний зонды конструктивно выбраны в виде стального шарика диаметром $d = 2r$ от 5 до 100 мм и стального цилиндра диаметром $d = 2r$ от 6 до 100 мм и длиной $l = 100$ мм. Конструктивно зонды выполнялись как сплошными, так и пустотелыми с толщиной стенки 2 мм. Моменты инерции выбранных зондов определялись по выражениям:

сплошные зонды:

$$M = (8 \pi r^4) / 3 - \text{для шара}; \quad (2.15)$$

$$M = \pi r^3 (2l + r) - \text{для цилиндра};$$

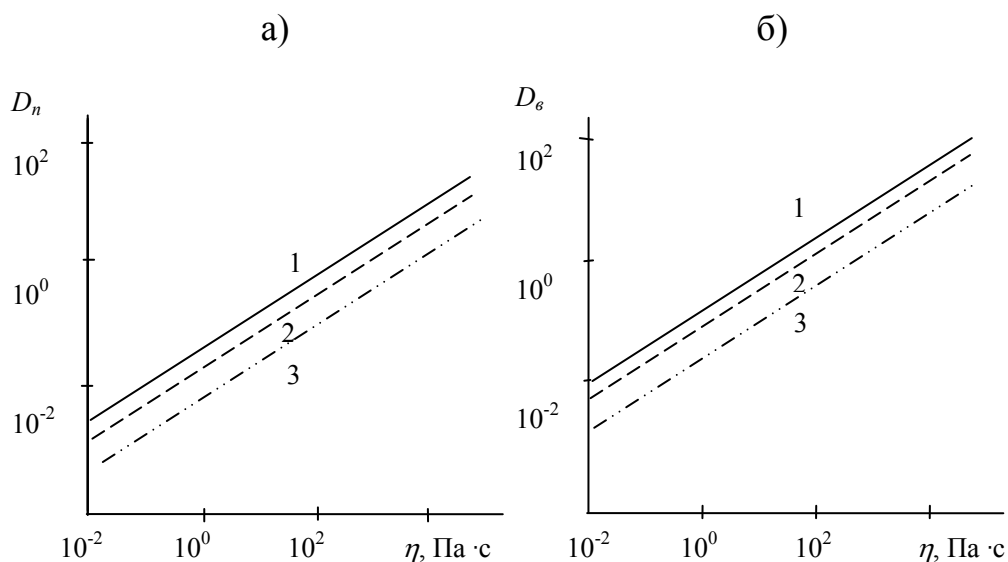
пустотелые зонды:

$$J = (8\pi\rho_3(r^5 - r_b^5)) / 15 - \text{для шара}; \quad (2.16)$$

$$J = 0,5\pi\rho_3 l (r^4 - r_b^4) - \text{для цилиндра};$$

где r_b – внутренний радиус пустотелого зонда. По приведенным выражениям (2.13 – 2.16) проведено обширное моделирование зависимостей коэффициентов демпфирования D_o измерительных стальных зондов в зависимости от их конструктивного исполнения и величины вязкости исследуемых жидкостей. Некоторые результаты этого моделирования коэффициентов D_o (коэффициент вязкого демпфирования без конкретизации типа колебаний зонда) от плотности контролируемой жидкости ($\rho_{ж} = 880 \text{ кг/м}^3$) и параметров вибрационных стальных зондов приведены на рисунке 2.8. Анализируя эти зависимости можно констатировать следующее. Измерительные зонды с сосредоточенными параметрами на 1-2 порядка имеют более высокое значение по коэффициенту демпфирования

ния D_o , чем зонды с распределенными параметрами, совершающими изгибные колебания. Одинаковой конструкции зонды для вращательных (колебательных) колебаний имеют по сравнению с зондами поступательных механических колебаний величину коэффициента D_o в 1,5-2 раза большую. Измерительный зонд в виде шарика имеет на 20-30 % более высокую чувствительность, чем цилиндрический зонд с одинаковым диаметром зонда. Существенное различие в величинах коэффициента D_o имеет место для сплошных и пустотелых вибрационных зондов, при этом, чем больше наружный диаметр зонда (толщина стенки неизменна), тем выше чувствительность к демпфированию (рисунок 2.8, зависимость 2). Например, сплошной шарик диаметром 5 мм (рисунок 2.8, зависимость 1) и пустотелый шар радиусом 25 мм (рисунок 2.8, зависимость 2) имеют близкие значения коэффициентов D_o . Зонд в виде сплошного шара радиусом 25 мм (рисунок 2.8, зависимость 3) имеет чувствительность по коэффициенту D_o в ~ 2 раза меньшую, чем пустотелый шар-зонд такого же наружного диаметра.



1; 3 – сплошной шарик $r = 5$ мм и 25 мм, 2 – пустотелый шар $r = 25$ мм

Рисунок 2.8 – Зависимость коэффициентов демпфирования для поступательных (а) и вращательных (б) колебаний

При малых значениях колебаний вибрационного зонда зависимость угла сдвига фаз φ между электрическими напряжениями приемного и возбуждающего преобразователей зонда записывается выражением [1]

$$\varphi = \arctg \frac{D_0 \nu^{3/2} + \nu^2 - 1}{\chi + D_0 \nu^{3/2}} + \varphi_0, \quad (2.17)$$

где $\nu = \omega/\omega_0$ – безразмерная круговая частота колебаний вибронда;

ω_0 – резонансная частота ненагруженного зонда;

можно считать, что величина $\chi \sim 1/Q$ – обратно пропорциональная величине механической добротности Q ,

$\varphi_0 \sim 0,1^\circ$ – постоянный фазовый сдвиг в электронной цепи, создаваемый электрическими и механическими цепями.

Типичные частотные зависимости угла сдвига φ от геометрических параметров зонда и коэффициента D_0 приведены на рисунке 2.9. Чем меньше механические потери в зонде при коэффициенте $D_0 = 5$, тем выше чувствительность прибора (зависимости 1-3).

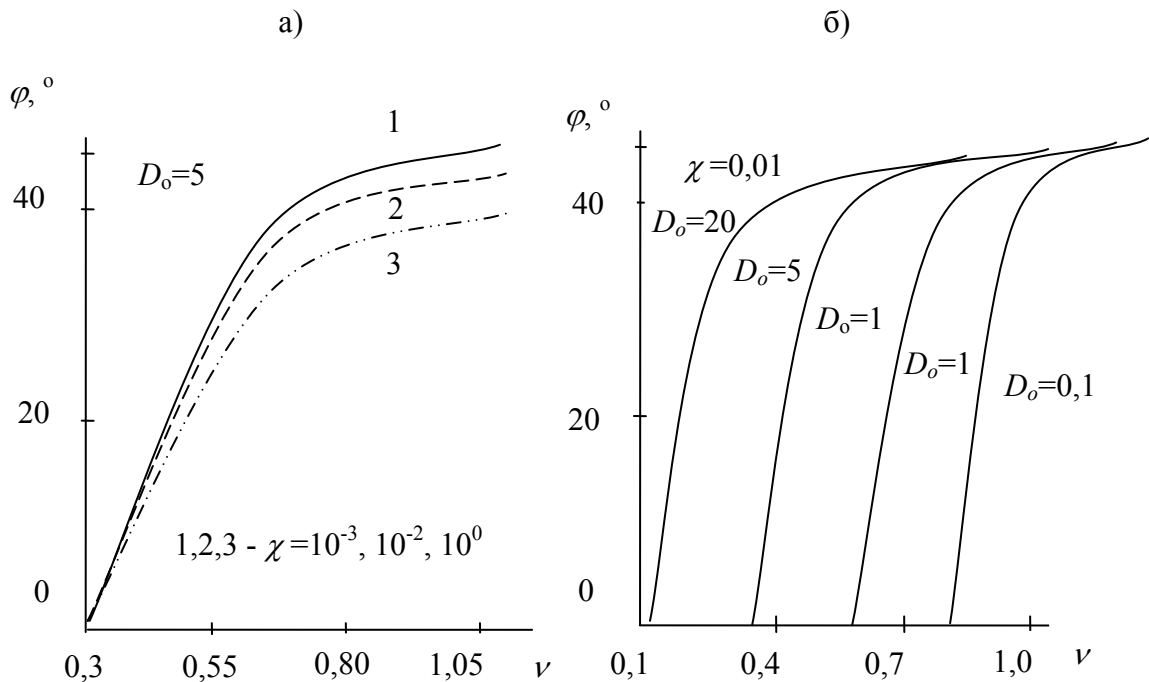


Рисунок 2.9 – Частотные зависимости угла сдвига фаз

Из рисунка 2.9,б очевидно, что при увеличении значения коэффициента D_o безразмерная частота ν , на которой значение угла сдвига фаз $\varphi \sim 0$, сдвигается в сторону меньших значений ν . Из анализа типичных зависимостей $\varphi = \psi(\chi, D_o, \nu)$ очевидно, что этим методом можно вести измерения при коэффициенте демпфирования $D_o \geq 0,1$ и $\chi \geq 10^{-3}$.

По результатам измеренного (рассчитанного) значения сдвига фаз φ на выбранной частоте ν приведенная вязкость жидкости записывается выражением [1]

$$\sqrt{\eta\rho_{ж}} = \frac{J\sqrt{2\omega_0}}{M} \frac{\nu^2 - 1 - \chi \operatorname{tg}(\varphi - \varphi_0)}{\nu^{3/2} [\operatorname{tg}(\varphi - \varphi_0) - 1]} \sqrt{\nu} . \quad (2.18)$$

В окрестности резонансной частоты ($\nu \sim 1$) приведенную вязкость $\sqrt{\eta\rho_{ж}}$ можно записать в более простом виде

$$\sqrt{\eta\rho_{ж}} \cong \frac{J\sqrt{2\omega_0}}{M} \frac{\chi \operatorname{tg}(\varphi - \varphi_0)}{1 - \operatorname{tg}(\varphi - \varphi_0)} . \quad (2.19)$$

Рассчитанные по выражению (2.18) значения приведенной вязкости показаны на рисунке 2.10. Величина $(\eta\rho_{ж})^{0,5}$, которую можно замерить данным методом повышается с ростом потерь χ и уменьшением безразмерной частоты ν . Предельно достижимая динамическая вязкость жидкости, при величине постоянной прибора равной $\frac{J\sqrt{2\omega_0}}{M} = 3,0 \times 10^3 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ (постоянная вискозиметра) и плотности жидкости $\rho_{ж} = 880 \text{ кг/м}^3$, которую можно измерить данным методом достигает величины $\sim 10^6 \div 10^7 \text{ Па} \cdot \text{с}$, что до сих пор является рекордным значением для вибрационных вискозиметров.

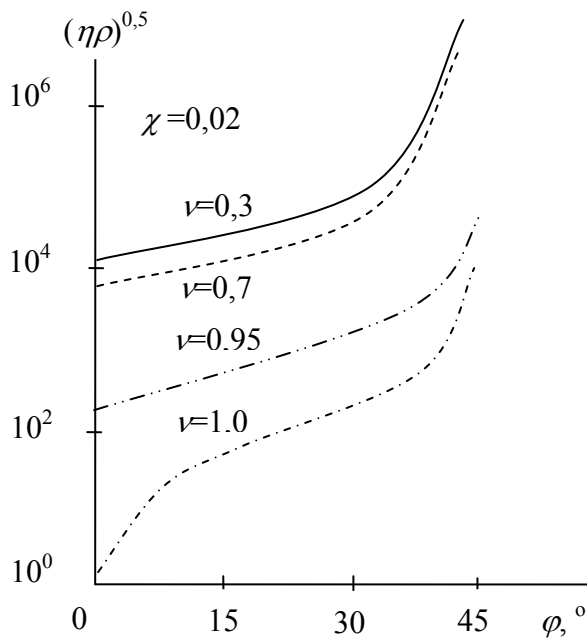


Рисунок 2.10 – Зависимость приведенной вязкости от угла сдвига

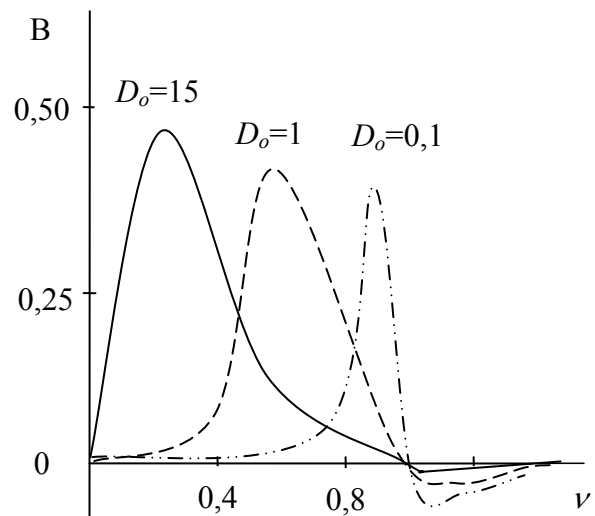


Рисунок 2.11 – Частотные зависимости чувствительности фазового вискозиметра

Из графиков (рисунок 2.10) и выражений (2.17) и (2.18) вытекает, что увеличив постоянную прибора (вискозиметра) $\frac{J\sqrt{2\omega_0}}{M} \gg 3,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ и снизив частоту ν до значений 0,25-0,35 при $\chi = 0,02$ возможно еще больше расширить диапазон измеряемых значений вязкости в сторону предельно больших значений $\sqrt{\eta\rho_{ж}}$. Например, при указанных значения χ , ν , $\frac{J\sqrt{2\omega_0}}{M}$ и плотности жидкости $\rho_{ж} = 880 \text{ кг/м}^3$ можно измерить вязкость до $\eta = (10^6 - 10^8) \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Чувствительность рассматриваемого фазового метода, равная отношению приращения угла φ к вызвавшему его изменению вязкости $\Delta\eta$ по [10] имеет вид

$$B = \frac{D_o \nu^{3/2} (1 + \chi - \nu^2)}{2\{(\chi + D_o \nu^{3/2})^2 + [\nu^2 (1 + D_o / \sqrt{\nu})]^2\}} \quad (2.20)$$

Анализ приведенной зависимости чувствительности (рисунок 2.11), рассчитанной по (2.20) показывает, что повышение механической добротности Q зонда всегда ведет к увеличению чувствительности. Увеличение коэффициента демпфирования D_o сдвигает максимум чувствительности в сторону уменьшения безразмерной частоты ν . Чем меньше величина D_o , тем ближе значение максимума чувствительности B к резонансной частоте ненагруженного зонда. Максимальное значение чувствительности стремится к своему предельному значению $B \cong 0,5$. Характерным для частотных зависимостей $B = \psi(\nu)$ является нулевая чувствительность при условии $\nu^2 = (1 + \chi)$. На этой безразмерной частоте все фазочастотные характеристики вибрационного зонда пересекаются в единой точке равной $\varphi = \pi/4$. При $\nu^2 > (1 + \chi)$ шкала вискозиметра будет обратной, как в амплитудном методе измерения вязкости. Поэтому при измерении рассматриваемым фазовым методом частоту измерения ω всегда необходимо выбирать ниже резонансной частоты ω_o ненагруженного вибрационного зонда.

Широкодиапазонная фазовая вибрационная ИСС вискозиметрии может быть выполнена по функциональной схеме, приведенной на рисунке 2.12. Кварцевый генератор 6 вырабатывает стабильную частоту $f_{эм}$. Автоматически управляемым делителем 5 частота $f_{эм}$ понижается и через усилитель мощности 4 напряжение низкой частоты подается на возбуждающий преобразователь 2 вибрационного зонда 1, где и преобразуется в низкочастотные механические колебания. Зонд 1 в контролируемой жидкости создает плоские сдвиговые волны. На другом противоположном конце зонда 1 (или в непосредственной близости от него) расположен приемный преобразователь 3, воспринимающий колебания жидкой среды.

От приемника 3 напряжение низкой частоты поступает на вход усилителя 8. Данный усилитель имеет глубокую автоматическую регулировку усиления в пределах 50÷60 дБ и цепи корректировки для уменьшения влияния высокой частоты, модулирующей слабый низкочастотный сигнал.

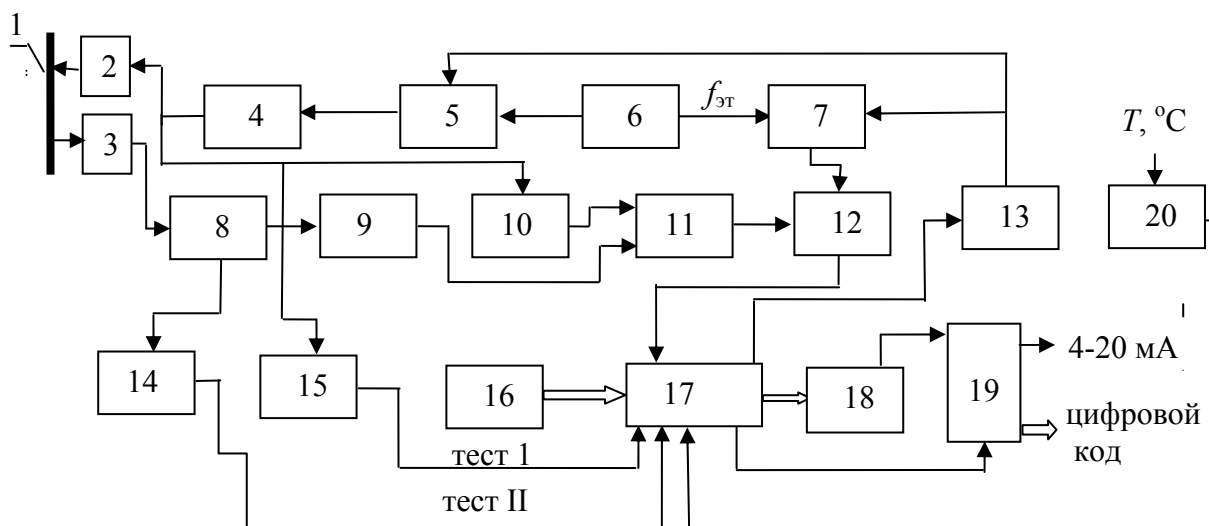


Рисунок 2.12 – Структурная схема фазовой ИСС вискозиметрии

Напряжения на входе преобразователя 2 и выходе преобразователя 3 не синфазные, при этом величина сдвига фаз φ между ними пропорциональна реакции жидкости на вводимые в нее механические колебания.

Выходные напряжения усилителей 4 и 8 подаются на нуль-органы (триггеры Шмита) соответственно 10 и 9, в которых при переходе напряжения через нулевое значение формируется прямоугольный импульс с очень высокой крутизной фронтов ($\sim 0,01$ мкс). При подаче импульсов с нуль-органов 9 и 10 по их передним фронтам в формирователе 11 получают прямоугольный импульс, длительность которого t_i , прямо пропорциональна величине фазового сдвига φ , т.е. вязкости исследуемой жидкости $t_i \sim \varphi \sim \eta$.

Измерение длительности прямоугольного импульса t_i выполняется с помощью хорошо разработанных электронных время импульсных методов измерения, суть которых состоит в счете количества импульсов генератора эталонной частоты, прошедших на счетчик в течение времени t_i . Для выполнения этой операции в вискозиметре имеется делитель частоты 7 и пересчетное устройство 12, на один вход которого подается от формирователя 11 импульс, длительностью t_i , а на другой – напряжение эталонной частоты от блока 7. Полученный с выхода пересчетного устройства 12 последовательный код, пропорциональный

величине вязкости, подается на вход микроконтроллера 17, где и формируется двоичный N -разрядный выходной цифровой код, пропорциональный величине фазового сдвига. Одновременно через блок измерения частоты 16 в микроконтроллер 17 подается значение текущей частоты напряжения усилителя мощности 4, подаваемого на возбуждающий преобразователь 2 зонда 1.

Для управления отдельными исполнительными элементами технологического процесса наиболее приемлемым является получение и выходного унифицированного аналогового тока (4-20) мА. В этом случае с выхода микроконтроллера 17 выходной цифровой код подается на цифроаналоговый преобразователь 18. Выходные унифицированные сигналы вискозиметра через выходной сетевой интерфейс 19 передаются непосредственно потребителю по проводным или беспроводным каналам связи. Вискозиметр имеет встроенные блоки самодиагностики и тестирования. Для этого выходные напряжения усилителей 4 и 8, как наиболее информативных о надежной работе вискозиметра, подаются на входы выпрямителей-формирователей соответственно 14 и 15. Постоянные напряжения величиной (2,5-3,5) В этих формирователей, при правильной работе приемо-возбуждающих преобразователей 2 и 3 и усилителей 4 и 8, подаются на входы микроконтроллера 17 для последующего размещения логических «1» в старших разрядах выходного кода. Если имеется нарушения в работе вибрационного зонда 1, то оба (или одно) напряжения с выхода формирователей 14 и 15 равно нулевому значению. В старшем разряде тестовой части выходного цифрового кода формируется «0», что в дальнейшем воспринимается как неправильная работа вискозиметра. В вискозиметр вводится также сенсор температуры 20 для корректировки температурной погрешности измерений вязкости и приведенные значения измеряемой вязкости к температуре в 20°C.

Околорезонансные измерения реально осуществимы при скачкообразном (электронным путем) изменении частоты возбуждения вибрационного измерительного зонда, так чтобы она была близка к резонансной частоте при демпфировании зонда контролируемой жидкостью. Для выбора оптимальной частоты измерения в зависимости от вязкости контролируемой жидкости за-

дающий генератор выполняется электронно-перестраиваемым. Это позволяет одним и тем же измерительным зондом покрывать очень широкий диапазон значений вязкости. Учитывая, что вибрационный вискозиметр работает в широком диапазоне вязкостей, то это создает значительную механическую нагрузку на измерительный зонд при больших значениях вязкости (верхняя часть предела измерения). Безусловно, в этих условиях генератор, возбуждающий измерительный зонд, должен иметь достаточный запас по выходной электрической мощности.

В микроконтроллере 17 в течение измерительного процесса проводится анализ измеряемого значения фазы. Если величина фазы $\varphi \geq 45^\circ$, то с выхода микроконтроллера подается импульс напряжения через блок 13, который выдает управляющее напряжение на делитель частоты 5. При этом частота генератора 4 понижается до тех пор, пока угол сдвига фаз не будет находиться в диапазоне $10^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$. При выходе в этот диапазон угла сдвига фаз прекращается дальнейшее изменение частоты генератора. В микроконтроллер 17 постоянно вводится информация о величине фазы и частоты напряжения возбуждения вибронда.

При определенных выше значениях фазы, частоты и известной величине плотности контролируемой жидкости по выражению (2.18) и проводится вычисление измеряемой вязкости в широком диапазоне значений.

В состав микроконтроллера 17 входит и перепрограммируемое запоминающее устройство, в котором записана вся программа измерительно-вычислительного процесса.

Микроконтроллер 17 выполняет следующие основные функции: метрологическую обработку информации и необходимые вычисления по результатам измерения; выбор необходимой частоты измерения по величине вязкости и управление частотой задающего генератора для возбуждения измерительного зонда; управление процессом измерения; выбор и регулировку диапазона измерения; формирование идентификационной информации о вискозиметре и передачи полной информации измерений по запросу потребителя.

2.3.1 Методические рекомендации к проектированию ИСС измерения больших значений вязкости с использованием зондов с сосредоточенными параметрами

1. Подробно ознакомиться с разделами 1, 2, 2.3 и 3-7 настоящей методики.

2. Для измерения вязкости жидкостей в диапазоне (10^{-2} - 10^6) Па·с выбираем фазовый широкодиапазонный вибрационный метод, подробно описанный в разделе 2.3. В качестве измерительных вибрационных зондов, создающих в контролируемой жидкости плоские сдвиговые волны, пригодны стержни с сосредоточенными параметрами, создающие в жидкости поступательные, вращательные или крутильные механические колебания.

3. При конструировании вибрационных вискозиметров материал для вибросигнального зонда должен обладать малыми несовершенствами упругости, высокой релаксационной стойкостью, стабильностью упругих свойств во времени и в переменных внешних условиях, необходимой коррозионной стойкостью при работе с агрессивными средами. В качестве материалов для вибросигнальных измерительных зондов используют стали и сплавы. Для высокого класса ИСС вибровискозиметрии при измерении вязкости неагрессивных жидких сред и при небольшом температурном диапазоне окружающей среды для изготовления вибросигнальных зондов хорошо использовать хромокремниймарганцевистую сталь 35ХГСА с повышенной коррозионной стойкостью, которая после термообработки: закалка в масле при 880°C и отпуске при $380\text{-}400^{\circ}\text{C}$ приобретает высокую прочность, повышенную износостойкость и умеренную вязкость. Для ИСС измерения вязкости общего назначения вибросигнальные зонды можно изготавливать из сталей 35ХГС, 50ХГА, 50ХФА, а также из сталей 20Х13 и 40Х13.

Для образцовых и 1-го класса ИСС измерения вязкости и плотности при работе в агрессивных средах и повышенной температуре для изготовления вибросигнальных зондов используют элинварный сплав 44НХТЮ – ферромагнитной сплав с

железохромникелевой основой с добавками титана и алюминия. Элинварный сплав после дополнительной термообработки обладает высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками. Для исключений температурных погрешностей материал виброчастотного зонда должен иметь практически нулевые температурные коэффициенты линейного расширения и изменения модуля упругости.

Материалы для виброчастотных измерительных зондов должны быть ферромагнетиками, способными хорошо взаимодействовать с магнитным полем для построения качественных электромагнитных преобразователей зонда (возбуждающего и приемного).

4. В данном методе определение вязкости основано на измерении фазового сдвига в диапазоне $0^\circ < \varphi < 45^\circ$ между электрическими напряжениями возбуждающего и приемного преобразователей вибронда. При этом измерения ведутся в районе резонансной частоты, которую автоматически изменяют так, чтобы обязательно выполнялось условие $0^\circ < \varphi < 45^\circ$.

5. Резонансную частоту ненагруженных измерительных зондов с сосредоточенными параметрами независимо от вида колебаний выбирают в диапазоне $f_0 = (5-50)$ Гц.

6. В качестве зондов с сосредоточенными параметрами целесообразно выбирать шар или цилиндрической формы стержень. Зонды выполняют с поступательными или вращательными (крутильные) колебаниями, которые затем передаются в контролируемую жидкость.

7. Для выбранного материала и типа зонда (шар или цилиндрический стержень) по конструктивно ориентировочным параметрам зонда: плотности ρ_z , модулю Юнга E , радиусу r и длине l по формулам (2.13 – 2.16) провести моделирование (расчет) зависимости коэффициента демпфирования D зонда от величины динамической вязкости η и плотности $\rho_{ж}$ контролируемой жидкости, а также и параметров измерительного зонда – ω_0 , l , ρ_z и r . Для повышения коэффициента демпфирования измерительные зонды при достаточном их диаметре

можно выполнять и полыми. Построить (подобно рисунку 2.8) семейство зависимостей $D = \Psi(\omega_0, l, p_3, r)$.

8. В зависимости от полученных результатов моделирования и учитывая прочностные конструктивные параметры виброзонда, выбираем форму зонда с сосредоточенными параметрами в виде шара или цилиндрического стержня с параметрами, обеспечивающими максимальную чувствительность к вязкости (величина коэффициента демпфирования D максимальна). При этом стремиться к минимальному диаметру зонда не следует, и выбираем диаметр зондов в диапазоне (15-50) мм.

9. Для первой моды механических колебаний зонда ($f = 5-50$ Гц) разработать его конструкцию так, чтобы механическое закрепление в его нулевой (узловой) плоскости механических колебаний обеспечивало минимальные механические потери, т. е. $\chi \leq (10^{-2} - 10^{-3})$ (механическая добротность зонда $Q \geq 100-1000$). Механические потери ненагруженного зонда можно измерять по методике, изложенной в работе [14].

10. По формуле (2.17) провести моделирование зависимости угла сдвига фазы между напряжениями возбуждающего и приемного преобразователей от величины коэффициента демпфирования D и безразмерной частоты ν при фиксированных значениях величины механических потерь χ (подобно рисунку 2.9).

11. В качестве электромеханических преобразователей вибрационного зонда – возбуждающего и приемного можно использовать пьезоэлектрические и электромагнитные преобразователи [12], но для столь низких частот конструктивно целесообразнее использовать электромагнитные преобразователи.

12. По выражению (2.18) промоделировать зависимость приведенной вязкости $\sqrt{\eta\rho_{ж}}$ от величины механических потерь χ и постоянной вискозиметра $\frac{J\sqrt{2\omega_0}}{M}$. Определить максимальное значение динамической вязкости η , которое можно измерять при выбранных конструктивных и схемотехнических решениях зонда и электронной части вискозиметра.

13. По выражению (2.20) определить достижимые значения чувствительности разрабатываемого вибрационного широкодиапазонного вискозиметра.

14. После проведенного моделирования по п.9-13 разработать и изготовить электронную часть ИСС вибровискозиметра, подобно функциональной схемы, приведенной на рисунке 2.12.

15. В состав электронной части ИСС вибровискозиметра должны войти следующие основные блоки: возбуждения и приема механических колебаний; измерения фазового соотношения между электрическими напряжениями приемного и возбуждающего преобразователей измерительного зонда; измерения частоты напряжения возбуждающего преобразователя измерительного зонда; устройства электронного управления изменением частоты генератора возбуждения; элементы самодиагностики, самотестирования и идентификации; микропроцессорная система обработки и преобразования информации. При проектировании и схемотехнических решениях элементов и блоков электронной части ИСС вибровискозиметра необходимо использовать методические указания, изложенные в источнике [13], а именно:

- методы измерения временных интервалов t_i вести по методике, изложенной на стр. 22-36 источника [13],

- методы измерения фазовых интервалов φ_i вести по методике, изложенной на стр. 36-46 источника [13],

- измерение частоты вести по методике, изложенной на стр. 69-88 источника [13].

16. Для функциональной обработки измерительной информации, параметров самодиагностики, самотестирования и идентификация, а также формирования выходных унифицированных сигналов (аналогового и цифрового) в состав электронной части обязательно должен вводиться микроконтроллер.

17. Для передачи выходной информации потребителю используется токовая петля, телеметрическая система или каналы беспроводной связи, выполненные в соответствии с мировыми стандартами IEEE 1451.1-1451.5, 802.11-802.16.

ГЛАВА 3

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ВИСКОЗИМЕТРОВ

Для рассматриваемых основных трех методов измерения, используемых в вибрационных вискозиметрах, приведем выражения для определения полной погрешности измерения:

1. для амплитудного метода:

$$\Delta\eta/\eta = N_a (\Delta A/A) + N_{av} (\Delta v/v) + N_{aP} (\Delta P/P), \quad (3.1)$$

2. для частотно-фазового метода:

$$\Delta\eta/\eta = N_{\varphi P} (\Delta\varphi/\varphi) + N_{\varphi v} (\Delta v/v), \quad (3.2)$$

3. для фазового широкодиапазонного метода:

$$\Delta\eta/\eta = N_{\varphi P} (\Delta\varphi/\varphi) + N_{\varphi v} (\Delta v/v) + N_{\varphi f} (\Delta f/f) + N_{\varphi P} (\Delta P/P), \quad (3.3)$$

где N_a и N_{av} ; $N_{\varphi P}$; $N_{\varphi f}$, $N_{\varphi v}$; N_{aP} и $N_{\varphi P}$ – соответственно коэффициенты ошибок измерения амплитуды, частоты генератора, сдвига фаз, резонансной частоты ненагруженного зонда и подводимой мощности для возбуждения измерительного зонда;

$(\Delta A/A)$; $(\Delta\varphi/\varphi)$; $(\Delta v/v)$ и $(\Delta f/f)$; $(\Delta P/P)$ – относительные приведенные погрешности измерения амплитуды механических колебаний, фазы, частоты генератора и резонансной частоты вибрационного зонда, а также электрической мощности.

Коэффициенты N_a , N_{av} , $N_{\varphi P}$, $N_{\varphi v}$, $N_{\varphi f}$, N_{aP} и $N_{\varphi P}$ – суть методические составляющие ошибок выбранного метода измерения вязкости, которые определяются выбранным методом и прежде всего параметрами вибрационного зонда и

они показывают во сколько раз суммарная приведенная относительная погрешность вибрационного вискозиметра больше чем, относительные погрешности электронных измерителей амплитуды (вольтметра), фазы (фазометра), частоты (частотомера) и электрической мощности.

Для автоколебательного метода измерения вязкости, при $N_{\varphi v}$ и N_{ap} очень близких к нулевому значению и при $\chi \ll 1$ и $D < 1$, величина коэффициента ошибки запишется в виде

$$N_a = 2 \left(1 + \frac{1}{D_o} \right) (\chi + D_o + \chi D_o). \quad (3.4)$$

Чем меньше величина χ механических потерь, тем выше чувствительность метода и меньше величина коэффициента N_a , которая в пределе стремится к значению 2. При тщательно выполненной конструкции измерительного зонда величина полной приведенной погрешности этого метода находится в пределах (0,3-1,5)%.

Для частотно-фазового метода погрешность определена в работе [9]

$$\frac{d(\rho\eta_{ж})}{\rho\eta_{ж}} / \frac{d(v/v_o)}{v/v_o} = \frac{3v^2 + 1}{v^2 + 1}. \quad (3.5)$$

и в пределе при $v \sim 1$ составляет величину близкую к значению 2.

Для широкодиапазонного фазового метода приведенная относительная погрешность измерения вязкости определяется методическими погрешностями: $N_{\varphi\varphi}$ – погрешностью измерения сдвига фаз; $N_{\varphi v}$ – нестабильностью частоты задающего генератора; N_{af} – нестабильностью резонансной частоты измерительного зонда, обусловленной изменением температуры, старением и т. д.; $N_{\varphi p}$ – нестабильностью выходной мощности генератора, возбуждающего зонд 1. Фазовые погрешности отдельных электронных блоков вискозиметра можно суммировать с погрешностью измерителя фазы и представлять их в составляющей φ_o . Пренебрегая величинами $N_{\varphi f}$ (ввиду ее малости для кварцевых генераторов) и $N_{\varphi p}$ (можно автоматически поддерживать достаточно точно постоянной вели-

чину электрической мощности, вводимой в вибрационный зонд), полная приведенная погрешность запишется суммой составляющих

$$\Delta\eta/\eta = N_{\varphi\nu}(\Delta\nu/\nu) + N_{\varphi\rho}(\Delta\varphi/\varphi). \quad (3.6)$$

Коэффициенты ошибки $N_{\varphi\nu}$ и $N_{\varphi\rho}$ запишутся в виде [1]

$$N_{\varphi\nu} = \frac{\frac{3}{2}(1-\nu^2)/\nu^2 + 2\nu}{1 + \chi + \nu^2}, \quad (3.7)$$

$$N_{\varphi\rho} = 2 \frac{(\chi + D_0\nu^{3/2})^2 + (D_0\nu^{3/2} + \nu^2 - 1)^2}{D_0\nu^{3/2}(1 + \chi - \nu^2)}. \quad (3.8)$$

Анализируя приведенные на рисунке 3.1 зависимости коэффициентов ошибок $N_{\varphi\nu}$ и $N_{\varphi\rho}$, рассчитанных по выражениям (3.7) и (3.8) можно констатировать следующее. Увеличение механических потерь χ (рисунок 3.1,а) приводит к некоторому снижению ошибки $N_{\varphi\nu}$, возможно из-за уменьшения чувствительности вибрационного зонда. При величине $(\Delta\nu/\nu) \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ (кварцевые задающие генераторы) безразмерная частота измерения ν может сдвигаться в сторону ее уменьшения вплоть до $\nu = 0,2-0,3$ (измерение больших значений вязкости жидкостей). При этих условиях погрешность $N_{\varphi\nu}(\Delta\nu/\nu)$ при $\chi = (10^{-3} - 1,0)$ не превысит значений (0,4-1)%.

Зависимости коэффициентов ошибки сдвига фаз $N_{\varphi\rho}$ (рисунок 3.1,б) от величины коэффициента демпфирования D_0 имеют явно выраженный минимум своих значений при выбранных для измерения вязкости значениях безразмерной частоты ν . Минимальные значения $N_{\varphi\rho}$ находятся в пределах $N_{\varphi\rho} \sim (1,5-2,0)$. Чем меньше значения вязкости, тем ближе частота измерений к резонансной частоте не нагруженного измерительного зонда. Частотные зависимости минимума $N_{\varphi\rho}$ хорошо коррелируют с зависимостями чувствительности фазового метода (рисунок 2.11).

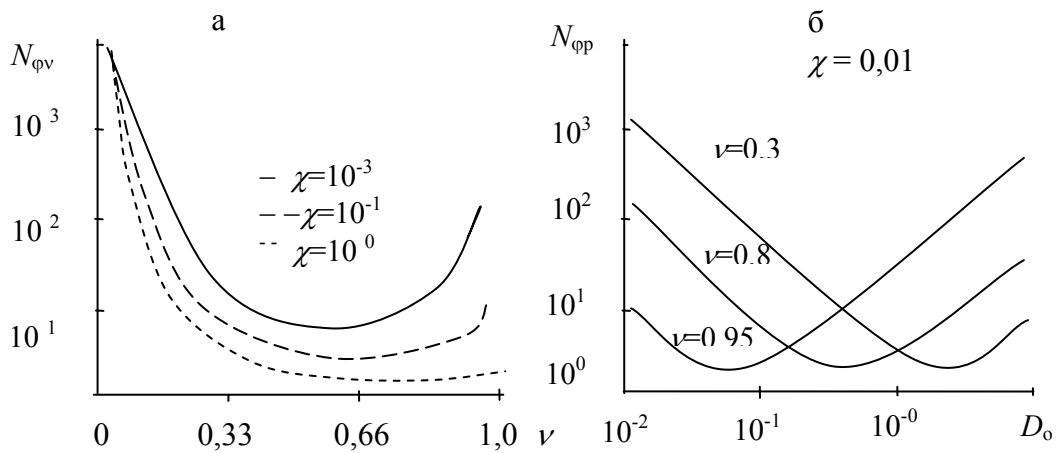


Рисунок 3.1 – Зависимости коэффициентов ошибок частотной (а) и фазовой (б) нестабильности

В целом можно констатировать, что погрешности измерения в амплитудном методе имеют наибольшее значение. В компенсационном амплитудном методе эти погрешности меньше, чем в простом амплитудном методе. Принципиально наиболее перспективны вибрационные вискозиметры на основе фазовых методов, имеющих на один-два порядка меньшую погрешность, чем амплитудные вискозиметры. Однако фазовые вибрационные вискозиметры схемотехнически (требуется многоканальное построение задающего генератора) существенно сложнее, чем амплитудные вискозиметры.

ГЛАВА 4

КОНСТРУКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРАЦИОННЫХ ИСС ВИСКОЗИМЕТРИИ

1. Принципиально вибрационные вискозиметры могут быть построены с использованием различных конструкций измерительного зонда, совершающего колебания: изгибные, продольные, вращательные и крутильные. При этом вибрационные зонда могут быть в равной степени с распределенными и с сосредоточенными параметрами. Выбор типа колебаний вибронда и его параметров является исключительно сложной задачей. Требуется проведение тщательного моделирования всех параметров отдельных звеньев ИСС вискозиметрии: механических, электромеханических, электронных и т.д. Особенно тщательно должен быть промоделирован основной элемент вискозиметра – вибрационный измерительный зонд с учетом его реальных резонансных механических параметров в зависимости, как от материала и конструктивного исполнения измерительного зонда, так и от параметров контролируемой жидкости.

2. Необходимо предусмотреть полное исключение взаимного влияния механических и электрических параметров возбуждающего преобразователя на измерительный преобразователь вибрационного зонда. Для этого нужно при возбуждении и регистрации механических колебаний зонда для его преобразователей использовать различные физические принципы действия; проводить разнесение возбуждающего и приемного преобразователей на расстояние, обеспечивающее полное исключение их взаимного влияния друг на друга.

3. В конструкции вибрационного зонда необходимо полностью исключить побочные (паразитные) механические колебания непосредственно в зонде и в элементах подвески колебательной системы.

4. Механические потери (величина обратная механической добротности) должны быть минимальными: $\chi \cong (10^{-3}-10^{-4})$.

5. Логарифмическая чувствительность, равная отношению изменения натуральных логарифмов показаний электронного вискозиметра и величины

вязкости контролируемой среды является одним из наиболее информативных параметров вибрационных вискозиметров. В [9] приведен краткий анализ зависимости логарифмической чувствительности для некоторых наиболее распространенных вибрационных методов измерения вязкости.

6. При конструировании вибрационных вискозиметров материал для вибросигнального зонда должен обладать малыми несовершенствами упругости, высокой релаксационной стойкостью, стабильностью упругих свойств во времени и в переменных внешних условиях, необходимой коррозионной стойкостью при работе с агрессивными средами. В качестве материалов для вибросигнальных измерительных зондов используют стали и сплавы. Для высокого класса ИСС вибровискозиметрии при измерении неагрессивных жидких сред и при небольшом температурном диапазоне окружающей среды для изготовления вибрационных зондов хорошо использовать хромкремниймарганцевистую сталь 35ХГСА с повышенной коррозионной стойкостью, которая после термообработки: закалка в масле при 880°С и отпуске при 380-400°С приобретает высокую прочность, повышенную износостойкость и умеренную вязкость. Для ИСС измерения вязкости общего назначения вибросигнальные зонды можно изготавливать из сталей 35ХГС, 50ХГА, 50ХФА, а также из сталей 20Х13 и 40Х13.

Для образцовых и 1-го класса ИСС измерения вязкости и плотности при работе в агрессивных средах и повышенной температуре для изготовления вибрационных зондов используют элинварный сплав 44НХТЮ – ферромагнитной сплав с железохромникелевой основой с добавками титана и алюминия. Элинварный сплав после дополнительной термообработки обладает высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками. Для исключений температурных погрешностей материал вибросигнального зонда должен иметь практически нулевые температурные коэффициенты линейного расширения и изменения модуля упругости.

Материалы для вибросигнальных измерительных зондов должны быть ферромагнетиками, способными хорошо взаимодействовать с магнитным по-

лем для построения качественных электромагнитных преобразователей зонда (возбуждающего и приемного).

Для материалов виброчастотных измерительных зондов очень важным является следующее соотношение $\sigma_{\pi} / \sigma_y \cong (0,1-0,15)$, где σ_{π} – предел прочности и σ_y – предел упругости материала (сопротивляемость металла механической пластической деформации).

Для повышения метрологических и эксплуатационных характеристик виброчастотных измерительных зондов разработаны методы упрочнения материала резонатора, для замедления роста процессов ползучести (развитие необратимой деформации во времени), основанные на комбинированном воздействии теплового и механического воздействия. Упрочнение происходит ввиду создания упорядоченных дислокационных структур в металлической матрице, что и способствует резкому торможению подвижности дефектов кристаллической решетки

Таким образом, наиболее подходящим материалом для вибрационных измерительных зондов являются элинварные сплавы, стоимость которых в 30-40 раз выше, чем углеродистая сталь.

ГЛАВА 5

ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ ВИБРАЦИОННЫХ ИСС ВИСКОЗИМЕТРОВ

В настоящее время используемые электронные блоки вибрационных вискозиметров выполняются с очень малыми значениями погрешностей $\gamma < (10^{-8} - 10^{-3}) \%$ [13]. Поэтому, имеется возможность практически исключить или же свести к минимуму (частотную, фазовую и др.) виды погрешностей электронных блоков в составе полной приведенной погрешности вибрационных вискозиметров.

ГЛАВА 6

ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ

Интеллектуальные сенсорные системы вибрационной вискозиметрии относятся к серии очень сложных измерительно-информационных систем. Поэтому для уменьшения приведенной погрешности необходимо использовать оптимальное сочетание как эксплуатационных параметров вибрационного вискозиметра, так и методики проводимых измерений. Особенно тщательно необходимо спланировать методику измерений, учитывая все особенности технологического процесса с использованием контролируемой жидкости. Необходимо учитывать пространственное распределение температурного поля контролируемой жидкости. Учитывать необходимо и условия пространственного распределения вязкости в контролируемой жидкости, находящейся в неподвижном состоянии или в режиме ламинарного или турбулентного движения, учитывать необходимо эффект налипания жидкости на вибронд и т.д.

Таким образом, разработка и эксплуатация вибрационных вискозиметров будет весьма успешной только в том случае, когда предварительно проведен комплекс всех мероприятий по анализу выбранного принципа измерения; проведено тщательное моделирование его основного звена вибрационного измерительного зонда с полным учетом параметров контролируемой жидкости; а также выбрана наиболее оптимальная методика измерения.

Учитывая приведенные выше формулы и зависимости, а также изготавливая измерительные зонды с необходимой (малой) величиной механических потерь, можно четко выбрать необходимые эксплуатационные параметры вибрационного вискозиметра, где полная приведенная погрешность измерения будет минимальной и находится в заданных пределах.

Из анализа приведенных выше зависимостей очевидно, что построение качественных ИСС вискозиметрии для широкого диапазона измеряемых вязкостей, удовлетворяющих высоким метрологическим и эксплуатационным требованиям промышленного производства задача довольно сложная, но решаемая.

Требуется тщательный учет многих факторов конструктивного, технологического, материаловедческого и электронного схемотехнического характера.

ГЛАВА 7

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В ИСС измерения вязкости рассматриваемых методов – амплитудного, частотно-фазового и фазового в качестве выходной информационной величины являются следующие:

- аналоговая величина – унифицированный постоянный ток (4-20) или (0-20) мА, постоянное напряжение (0-5) или (0-10) В;
- цифровой 8;16 или 32-разрядный код.

В ИСС вязкости используются также следующие выходные переменные параметры первичных сенсоров:

- переменное электрическое напряжение синусоидальной формы амплитудой (1-10) В для возбуждающих электромагнитных преобразователей виброзондов и постоянное напряжение (10-50) В при использовании пьезоэлектрических возбуждающих преобразователей;

- фазовое соотношение между электрическими низкочастотными напряжениями возбуждающего и приемного преобразователей измерительного зонда в диапазоне $\varphi = (0-90)^\circ$. Во временном соотношении эта величина фазы эквивалентна значению (0,2-100) мс;

- высокая частота (1-10) МГц в качестве эталонной при использовании времяимпульсного метода измерения величины фазы или низкой (резонансной) частоты механических колебаний зонда;

- резонансная частота вибрационных измерительных зондов (10-500) Гц.

В ИСС для расширения их функциональных возможностей широко применяют микроконтроллеры, которые используются для:

- управления измерительным процессом;
- приема цифровой информации с первичного сенсора;
- повышения метрологических параметров ИСС за счет специальных вычислений первичной информации по заданной программе от ППЗУ;

- формирования выходного слова, включающего информационный цифровой код, информацию о самотестировании и самодиагностике основных блоков сенсорной системы измерения вязкости;
- формирования идентификационной (TEDC) информации;
- формирования выходных цифровых сигналов в беспроводные электронные приемо-передатчики, выполненные по требованиям IEEE 802.11-802.16.

Микроконтроллеры (МК) представляют собой законченную микропроцессорную (МП) систему обработки информации, реализованную в виде БИС. МК объединяет основные функциональные блоки МП: центральный процессор (ЦПУ), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), периферийные устройства для ввода и вывода измерительной информации (УВВ) [15].

Чрезвычайно широкое разнообразие моделей МК, необходимость и возможность разработки и изготовления в кратчайшие сроки новых моделей МК различными организациями обеспечивает модульный принцип построения МК. При этом принципе построения большинство моделей МК одного семейства содержит в себе базовый функциональный блок (процессорное ядро МК) одинаковый для всех МК данного семейства и изменяемый функциональный блок, который объединяет МК и первичные сенсорные системы

Процессорное ядро обозначают названием семейства МК, основой которого оно является. Например, ядро MCS-51 – ядро семейства МК фирмы «INTEL» 8xС51, ядро PIC16 – процессорное ядро фирмы «MICROCHIP» PIC16, ядро HC08 – процессорное ядро семейства МК фирмы «MOTOROLA» MC68HC08.

Наибольшее распространение получили МК во встроенных системах ИСС контроля и управления. Главной причиной популярности МК является то, что они являются практически готовыми вычислительными устройствами, почти не требующими для своей работы дополнительного оборудования. Возможность программировать работу МК позволяет разрабатывать достаточно слож-

ные электронные устройства, в которых программный продукт может достигать до 90%.

На рынке МК активно работают более 30 разработчиков и изготовителей. Предлагается широкий ассортимент МК, отличающийся как своими техническими параметрами, так и перечнем встроенных периферийных устройств.

Критерием для выбора МК в составе ИСС измерения вязкости-плотности является:

- наличие необходимых периферийных устройств, начиная от EEPROM-памяти и заканчивая LAN или LCD-контроллером;
- переход к FLASH-технологии для ПЗУ программ пользователя;
- быстроедействие;
- надежность;
- энергопотребление и наличие энергосберегающего режима работы;
- габаритные размеры и тип корпуса;
- низкая стоимость.

Еще одним важным параметром МК, влияющим на стоимость и возможность их реализации во встроенных устройствах, является способ программирования МК:

- перепрограммируемые МК с УФ или электрическим стиранием самые дорогие, но и самые практичные для мелкосерийного и экспериментального применения,

- однократно программируемые МК существенно дешевле перепрограммируемых, но программирование однократное,

- масочно-программируемые МК – самый дешевый способ изготовления, однако программирование выполняется промышленным способом на заводах-изготовителях, что диктует использование таких МК только в условиях крупносерийного изготовления при условии, что заложенная программа не будет изменяться.

Используемые в устройствах контроля и управления МК можно условно разделить на 3-и класса:

- 8-и разрядные, занимающие ~ (40-50) % рынка электронных устройств, предназначенных для встраивания в ИСС контроля;

- 16 и 32-х разрядные;

- цифровые сигнальные процессоры (DSP), обладающие значительными вычислительными возможностями.

Среди основных разработчиков и изготовителей МК отметим следующие основные фирмы:

- «INTEL» – МК семейств: MCS-51 и 8xC51Fx; MCS-251; MCS-96; MCS-196/296 и семейство контроллеров Универсальный последовательный мини 8x930;

- «MOTOROLA» – в основном выпускает заказные микроконтроллеры семейств: HC05, которое насчитывает до 180 разновидностей, начиная с простейшего 68HC05KJ1 до сложного 68HC05L10; HC11 и HC08;

- «MICROCHIP» – МК семейств: PIC16F84, весьма популярные, просты для изучения и перепрограммирования; PIC16C5x; PIC15C5x, недорогие и с минимальным набором периферии; PIC16x/7x/8x/9x с развитой периферией; PIC17C4x/5x высокопроизводительные и с расширенной периферией и МК нового семейства PIC18Cxxx с оптимизацией по RISC-ядру.

Приведенная краткая аннотация семейств, в основном, 8-и разрядных МК далеко не полная, т. к. МК выпускает и целый ряд компаний мелких компаний: "ST-Microelectronics" (семейство ST6, ST7 и ST9); "National Semiconductor" (семейство COP8); "Zilog"; "NEC"; "Mitsubishi" и др.

Продукция указанных выше организаций постоянно все в больших объемах появляется на рынке стран СНГ, в том числе и рынке Белоруссии.

Среди перечисленных организаций по разработке и изготовлению МК, безусловно, на первом месте стоит компания "INTEL", основной законодатель моды в области разработки и изготовления микропроцессоров и микроконтроллеров.

Приведем краткую сравнительную характеристику МК семейства компании "INTEL". Архитектура MCS-51 получила свое название от первого пред-

ставителя семейства МК 8051, выполненного по технологии NMOS. Удачный набор периферийных устройств, гибкий выбор внешней или внутренней программируемой памяти обеспечил на длительное время на рынке успех этого семейства. Имеется ряд, эмуляторов, отладчиков и программаторов микросхем 8051. В дальнейшем, при переходе на технологию изготовления CMOS, реализованы режимы работы Idle и Power Down, что позволило существенно снизить энергопотребление кристалла микроконтроллера.

Следующим этапом 8-битной архитектуры был выпуск МК 8xC51FA/FB/FC (более краткое название 8xC51Fx), в состав которых был введен массив программируемых счетчиков (PCA). В состав PCA входят 16-и разрядный таймер-счетчик и 5 (пять) 16-и разрядных модуля выборки и сравнения, каждый из которых связан со своей линией порта ввода-вывода МК. Выполнение программируемых функций в PCA происходит без загрузки центрального процессора, что существенно повышает быстродействие МК, точность измерений и обработки сигналов и снижает время взаимодействия МК на внешних запросах. Реализованный PCA в МК 8xC51Fx оказался чрезвычайно удачным и поэтому сам PCA стал многократно использоваться и другими фирмами производителями МК.

Совместными усилиями компаний "INTEL" и "Phillips" устранен наибольший недостаток архитектуры MCS-51 – низкое быстродействие, обусловленное 8-и разрядным АЛУ. Доработка позволила резко повысить производительность МК нового семейства MCS-251 (компания "INTEL") и 51xA (компания "Phillips"). Система команд МК семейства MCS-251 содержит все 111 команд, входящих в систему команд МК семейства MCS-51 (старые команды) и еще 157 новых команд. В режиме соответствующего программирования семейства MCS-51 и MCS-251 совместимы. Для пользователей, ориентированных на МК семейства MCS-251 в качестве механической замены семейства MCS-51 компания "INTEL" выпускает МК семейства MCS-251 с заранее запрограммированными битами конфигурации, в состоянии Binary Mode. Эти МК называются семейством MCS-151.

МК семейства MCS-96 компании "INTEL" используются как встраиваемые микропроцессорные устройства при разработке и изготовлении сложных контрольно-измерительных систем и систем управления. Достоинство этого семейства МК:

- выполнение операций с данными, представленными в формате "байт"(8 бит) и формате "слово" (16 бит), а иногда и в формате "двойное слово" (32 бита);

- улучшена система выполнения математических операций;

- наличие двух и трех адресных команд арифметических и логических операций;

- многообразие периферийных устройств;

- наличие большого числа программных и программно-ориентированных средств поддержки.

Микроконтроллеры "INTEL" семейства MCS-196/296 – высокопроизводительные 16-и разрядные устройства для решения задач встроенного управления разнообразным технологическим оборудованием от бытовой техники до автомобильной и самолетной техники. В семейство MCS-196 (иногда название 80C196) входят более 30 типов МК с тактовой частотой $f=50$ МГц и адресным пространством до 6 Мбайт. МК семейства MCS-196 имеют следующие преимущества:

- простая система команд;

- одно адресное пространство для команд и данных;

- множество периферийных устройств;

- высокое быстродействие;

- семейство выполнено по технологии КМОП.

Контроллеры Универсальной шины 8x930 состоят из двух кристаллов 8x930Ах и 8x930Нх и очень сильно насыщены встроенными средствами так, что они выглядят существенно мощнее, чем простые микроконтроллеры

В рассматриваемых выше вариантах ИСС вязкости и плотности в качестве микроконтроллеров использовался простой вариант КР1835ВГ14 с огра-

ниченными техническими возможностями. Для рассматриваемых ИСС измерения вязкости и плотности в качестве оптимального варианта по своим функциональным возможностям лучше использовать МК семейства MCS-51 (8x51Fx) или MCS-251 (MCS-151) для формированию управленческих и измерительно-вычислительных и информационных сигналов по системе TEDS и по стандартам IEEE 1451 и IEEE 802.

Структурная схема ИСС измерения вязкости и плотности с использованием микроконтроллеров семейства MCS-51 представлена на рисунке 8.1. Она включает следующие основные блоки и узлы: 1 – 8-и разрядное арифметическое логическое устройство (АЛУ); 2 – оперативное запоминающее (ОЗУ) на 128 байт; 3 – постоянное перепрограммируемое устройство (ППЗУ) объемом 4096 однобайтовых ячеек памяти; 4 – блок управления; 5 – блок двухканальных 16-и разрядных программируемых таймера; 6 – интеллектуальный интерфейсный блок; 7 и 8 – ИСС измерения вязкости и плотности соответственно; 9 и 10 – информационные интерфейсы соответственно по каналам вязкости и плотности; 11 – четыре 8-и разрядных параллельных порта ввода/вывода с двумя или тремя состояниями линий (H,L,Z), 12 – формирователь сигналов для беспроводной сети WirelessMAN-OFDMA и 13 – модуль приемо-передатчика для беспроводной сети в стандарте IEEE 802.16. В состав микроконтроллерной системы входят двунаправленная шина данных (ШД) и однонаправленная шина управления (ШУ).

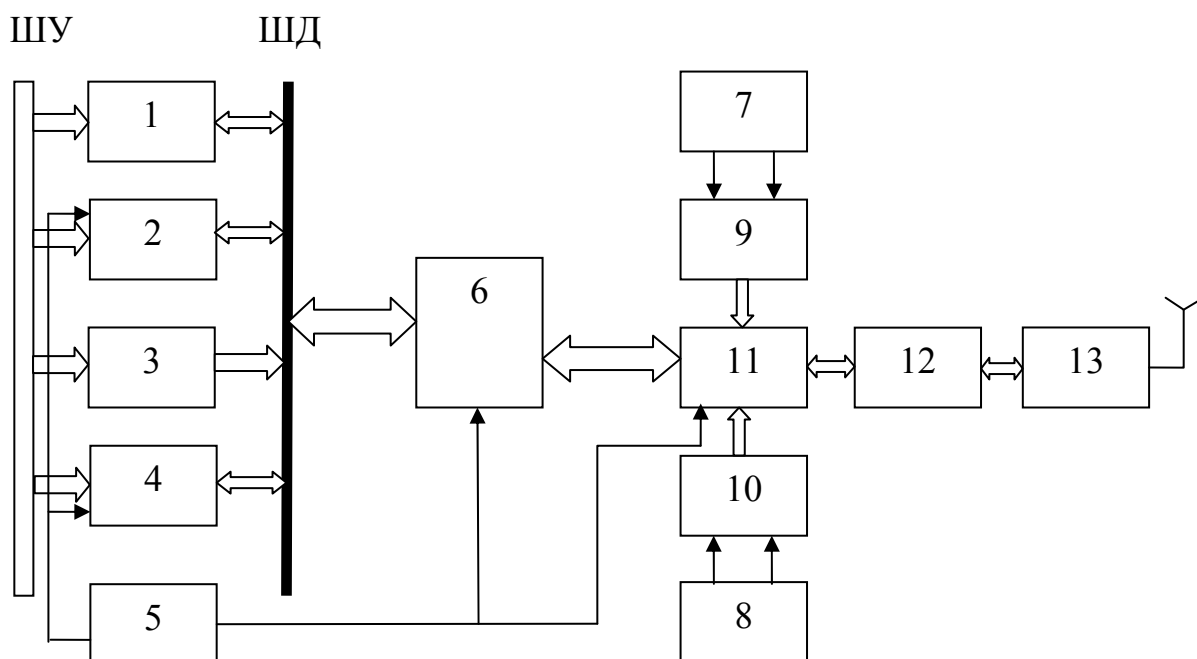


Рисунок 8.1 – Функциональная микроконтроллерная сенсорная система

МК семейство MCS-51 используют гарвардскую архитектуру: память программ 3 (ППЗУ) и память данных 2 (ОЗУ) имеют отдельные адресные пространства, причем максимальная емкость каждого составляет 64 Кбайта.

7.1. Программирование МК семейства MCS-51

Рассмотрим основные принципы программирования МК семейства MCS-51 на языке C++. В исходном тексте программы, написанной на языке программирования для C-51 используют символы ASCII или ANSI. Множество символов, в языке программирования C-51 разбивают на пять групп [16].

1. В группу символов, используемых для образования ключевых слов и идентификаторов, входят прописные и строчные буквы английского алфавита и символ подчеркивания.
2. Прописные и строчные буквы русского алфавита.
3. Знаки нумерации и специальные символы.

4. Управляющие и разделительные символы. К этой группе символов относятся: перевод каретки, возврат каретки, пробел табуляции, символ новой строки и символ новой страницы. Такие символы отделяют друг от друга лексические единицы языка, такие как константа, идентификаторы и т.д.

5. Управляющие последовательности – специальные символьные комбинации, которые используют в функции ввода и вывода информации.

7.2. Основы структуры программ для МК MCS-51

Язык программирования C++ для МК семейства MCS-51 является структурно-модульным языком. Каждый из операторов в программах является частью одного из модулей. Каждая из программ состоит из одного или нескольких модулей. Каждый из модулей записывается отдельным файлом и компилируется отдельно.

В модуле размещают операторы, составляющие целую программу. Такие операторы объявляют константы или переменные и делают необходимые действия. Операторы, выполняющие действия должны всегда помещаться в подпрограммы. Выполнение программы всегда необходимо начинать с подпрограммы с именем main.

Подпрограммы начинаются с заголовка подпрограммы, в который входит тип возвращаемой переменной, имя подпрограммы и круглых скобок, внутри которых объявляются переменные-параметры подпрограммы. В подпрограмме main, а также и в других подпрограммах, где не нужно возвращать переменные, вместо типа переменной указывается слово void. Исполняемые операторы заключаются в фигурные скобки.

Все константы и переменные, используемые в программе, в обязательном порядке объявляются до подпрограммы, где они будут использованы первый раз.

При составлении программы для МК программист должен совершенно четко представлять функциональную (принципиальную) схему или алгоритм

работы электронного устройства, например ИСС измерения вязкости-плотности, так как всегда устройство и программа теснейшим образом связаны между собой и всегда дополняют друг друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая выше рассмотренные возможности и преимущества вибрационных вискозиметров различных методов построения при надлежащем решении ряда конструктивных, технологических и методических вопросов вибрационные методы имеют значительные перспективы, как в плане изучения физических свойств конкретных жидкостей, так и в области контроля разнообразных технологических процессов.

К задачам, которые необходимо решать в ближайшее время в области вибрационной, в т. числе и ИСС, вискозиметрии можно отнести следующие:

- существенное повышение точности измерений и переход в область ИСС с широкими функциональными возможностями;

- разработка простых, более чувствительных и надежных в эксплуатации вискозиметров для исследования жидкостей различных технологических процессов;

- расширение возможностей вибрационной вискозиметрии для измерения фазовых переходов жидкостей как в области высоких температур, так и в области температур затвердевания;

- расширение работ в области развития фазовых вибрационных методов;

- широкое использование ИСС вибрационной вискозиметрии жидкостей при воздействии на них различных факторов внешнего физического воздействия;

- расширение диапазона измерений;

- освоение инфранизкочастотного диапазона измерения вязкости;

- создание эталонных вискозиметров и в первую очередь для больших значений вязкостей;

- совершенствование метрологического обеспечения, разработка эталонов жидкостей, разработка новых методик измерения и градуировки вискозиметров.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. По главе 1:

- физическое понятие вязкости материалов и параметры для ее измерения,
- охарактеризуйте физическое явление возникновения поперечной волны и параметры ее определяющие при колебании тел в жидкости,
- укажите основы классической теории вязкого сопротивления (импеданса) движению жидкости при механических колебаниях вибрационного зонда. Проанализируйте значения активной и реактивной составляющих полного импеданса,
- оцените влияние сдвиговой упругости жидкости на погрешность измерения вязкости вибрационными методами,
- обоснование выбора низких (инфранизких) частот вибрационных зондов для измерения вязкости.

2. По главе 2:

- обоснование выбора вибрационных методов для измерения вязкости жидкости (газов),
- основные параметры механических вибрационных зондов инвариантные величине измеряемой вязкости жидкости,
- особенности параметров идеальных и неидеальных вибрационных зондов для измерения жидкости,
- физическое обоснование безразмерного коэффициента демпфирования вибронда контролируемой жидкостью, зависимость его величины от параметров демпфируемой жидкости и конструктивных параметров вибронда, а также вида его механических колебаний,
- преимущества и недостатки частотно-фазового метода измерения вязкости материалов с помощью виброндов с распределенными параметрами, совершающих крутильные механические колебания,
- преимущества и недостатки фазового метода измерения вязкости материалов в диапазоне больших ее значений ($\eta = (10^{-1}-10^8)$ Па·с) с помощью вибро-

зондов с сосредоточенными параметрами, совершающих продольные и крутильные (вращательные) механические колебания,

- общие и характеристические особенности построения функциональных электронных блоков вибрационных вискозиметров, основанных на амплитудном, частотно-фазовом и фазовом методах измерения,

- обоснование необходимости использования в электронных блоках наличие узлов самодиагностики и идентификации,

- обоснование необходимости использования в электронных блоках вибрационных вискозиметров микроконтроллеров и основные функции, выполняемые встроенными микроконтроллерами.

3. По главе 3:

- приведите основные составляющие полной относительной погрешности измерения вибрационными вискозиметрами, основанными на трех основных методах измерения - амплитудном, частотно-фазовом и фазовом,

- проведите сравнительный анализ составляющих относительных погрешностей вибрационных вискозиметров, выполненных на основе следующих методов измерения – амплитудного, частотно-фазового и фазового.

4. По главе 4:

- обоснование основных конструктивно-технологических требований к вибрационным измерительным зондам,

- обоснование по выбору материалов для упругих колебательных элементов измерительных зондов.

5. По главе 5:

- изложите основные требования к электронным блокам вибрационных вискозиметров,

- оцените погрешности электронных блоков и составляющих их узлов.

6. По главе 6:

- обоснование принципов сочетания эксплуатационных параметров и выбираемых методик измерения и метрологических испытаний вибрационных вискозиметров.

7. По главе 7:

- функциональное обоснование использования в вибрационных вискозиметрах микропроцессоров и микроконтроллеров,
- основные параметры используемых в ИСС измерения вязкости микроконтроллеров,
- основные принципы построения микроконтроллеров для ИСС измерения,
- выполните сравнительный анализ современных микроконтроллеров, выпускаемых различными фирмами,
- обосновать выбор для ИСС измерения вязкости микроконтроллеров,
- сделайте краткий анализ по вопросам программированию микроконтроллеров, а также языкам программирования микроконтроллеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крутин, В.Н. Колебательные вискозиметры и пути их совершенствования / В.Н. Крутин // Сб. науч. трудов; под ред. чл. корр. АН СССР С.С. Кутателадзе. – Новосибирск, 1976. – С. 8-28.
2. Крутин, В.Н. К методике расчета колебательных крутильных вискозиметров с сосредоточенными параметрами / В.Н. Крутин, И.Б. Смирницкий // Зав. лаборатория. – 1975. – № 4. – С. 461-466.
3. Дзюба, А.П. Разработка вибрационного вискозиметра общепромышленного назначения и опыт его внедрения / А.П. Дзюба, В.Н. Крутин, Л.А. Ушаков [и др.] // Сб. науч. трудов; под ред. чл. корр. АН СССР С.С. Кутателадзе. – Новосибирск, 1976. – С. 78-87.
4. Колешко, В.М. Электронный прибор для измерения плотности-вязкости нефтепродуктов / В.М. Колешко, В.Я. Сунка // Материалы, технология, инструменты. – 1997. №1. – С. 96-99.
5. Колешко, В.М. Реанимация нефтегазовых скважин / В.М. Колешко, В.Я. Сунка. – Минск, 1996. – 60 с.
6. Лойцянский, А.Г. Механика жидкости и газа / А.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987.
7. Вернер, В.Д. Изделия микросистемной техники – термины и определения, классификация и обозначения типов / В.Д. Вернер, А.И. Иванов, Н.Г. Коменская, В.В. Лучинин [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2008. №1. – С.2-5.
8. <http://www.vspmos.ru/systems3.phtml>
9. Гладкий, В.Н. Вибрационные вискозиметры металлургических процессов / В.Н. Гладкий, А.Б. Каплун // Зав. лаборатория. – 1981. – №9. – С.63-69.
10. Крутин, В.Н. Фазовый вибрационный метод измерения вязкостей / В.Н. Крутин, Л.А.Ушаков // Зав. лаборатория. – 1976. – №8. – С.1197-1199.
11. Эткин, Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика / Л.Г. Эткин. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004.

12. Исакович, М.А. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / М.А. Исакович, Ю.И. Китайгородский, В.Е. Лямов, И.Б. Найденова; под ред. И.П. Голяминой. – М.: Советская Энциклопедия, 1979.
13. Ратхор, Т.С. Цифровые измерения АЦП / ЦАП. / Т.С. Ратхор. Перев. с английского. – М.: Техносфера, 2006. – 390 с.
14. Кремлевский, В.П. Вибрационный вискозиметр / В.П. Кремлевский, А.А. Степичев // Сборник научных трудов. Под ред. чл. корр. АН СССР С.С. Кутателадзе. – Новосибирск, 1976. – С. 98-103.
15. Александров, Е.К. Микропроцессоры / Е.К. Александров, Р.И. Грушевицкий, М.С. Куприянов [и др.]; под ред. Пузанова Д.В. – СПб; Питер, 2002.
16. Павловская, Т.Я. С/С++ Программирование на языке высокого уровня / Т.Я. Павловская. – СПб: Питер, 2002. – 646 с.