

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, начальник лаборатории
экспериментальной механики «ЮУрГУ(НИУ)»,
к.т.н.
/ _____ / П.А. Тараненко /

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор
_____ А.Л. Шестаков/
« _____ » _____ 2017 г.

Исследование влияния внешних факторов на частотные характеристики кориолисового расходомера

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР

Руководитель, к.т.н., доцент

_____ /О.Ю. Бушуев/
« _____ » _____ 2018 г.

Автор

студент группы КЭ - 225
_____ /Г.Д. Смирнов/
« _____ » _____ 2018 г.

Нормоконтролер, к.т.н., доцент

_____ /А.С. Волосников/
« _____ » _____ 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Смирнов Г.Д. Исследование влияния внешних факторов на частотные характеристики кориолисового расходомера. – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-225, 2018, 104 с, 55 ил., 30 табл., 2 прилож., библиогр. список – 50 наим.

Выпускная квалификационная работа посвящена исследованию влияния внешних факторов на частотные характеристики кориолисовых расходомеров.

В ходе выполнения ВКР были решены следующие задачи:

1. Анализ источников погрешностей и причин выхода из строя кориолисовых расходомеров.
2. Экспериментальное исследование влияния внешних факторов на частотные характеристики кориолисовых расходомеров.
3. Оценка влияния внешних факторов на частотные характеристики кориолисовых расходомеров.
4. Оценка влияния изменения объемной доли воздуха в жидкости на частотные характеристики кориолисовых расходомеров.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР			
Изм.	Лист.	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.	Г.Д. Смирнов				Исследование влияния внешних факторов на частотные характеристики кориолисового расходомера	Лит.	Лист	Листов
Пров.	О.Ю. Бушуев						4	104
Реценз.	П.А. Тараненко					ЮУрГУ Кафедра ИНИТ		
Н. Контр.	А.С. Волосников							
Утв.	А.Л. Шестаков							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОРИОЛИСОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ.....	9
1.1 Актуальность разработки новых интеллектуальных датчиков с возможностью оценки их технического состояния в процессе эксплуатации	9
1.2 Устройство кориолисового расходомера	15
1.2.1 Кориолисова сила.....	15
1.2.2 Принцип работы кориолисового расходомера.....	16
1.3 Анализ основных источников погрешности и причин выхода из строя кориолисовых расходомеров.....	23
1.4 Цели и задачи исследования.....	30
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРИОЛИСОВОГО РАСХОДОМЕРА	32
2.1 Описание экспериментального поливочного стенда	32
2.2 Методика обработки результатов эксперимента	37
2.3 Программа для работы со стендом	43
2.4 Экспериментальные исследования	48
2.4.1 Описание эксперимента с фиксацией корпуса.....	49
2.4.2 Описание эксперимента с присоединённой массой.....	49
2.4.3 Описание эксперимента с воздействием давления	51
2.4.4 Описание эксперимента с изменением содержания воздуха в измеряемой жидкости	52

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСХОДОМЕРОВ	54
3.1 Результаты эксперимента с фиксацией корпуса кориолисового расходомера	57
3.2 Результаты эксперимента с присоединённой дополнительной массой к трубкам расходомера во время пролития в нем воды	59
3.3 Результаты эксперимента с присоединённой дополнительной массой к трубкам расходомера без пролития воды	66
3.4 Оценка влияния факторов на частотные параметры кориолисового расходомера	71
4 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ВОЗДУХА В ЖИДКОСТИ НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРИОЛИСОВОГО РАСХОДОМЕРА	73
4.1 Сравнение способов обработки экспериментальных исследований	76
4.2 Результаты эксперимента с изменением объема воздуха при постоянном расходе	83
4.3 Результаты эксперимента при изменении расхода и изменении процента содержания воздуха в жидкости кориолисового расходомера	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Спектральный анализ	101
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Программа работы с проливочным стендом	102

ВВЕДЕНИЕ

Развитие рыночной экономики требует перестроений систем учета продуктовых и сырьевых потоков. Большинство потоков по характерному типу, на примере нефтеперерабатывающего завода разделяют на: входящие (поставка сырья на заводы), межцеховые, внутрицеховые, выходящие (изготовленная продукция с заводов) [13].

В связи с увеличением качества измерения расхода на узлах коммерческого учета вызывают необходимость замены ряда устаревших приборов на современные приборы. Но даже современные приборы должны соответствовать совокупности критериев, отвечающие за качество: измерений плотностей, массовых расходов, наличием компьютерных интерфейсов, измерений температуры, удобство эксплуатации и монтажа [37-41].

Устройства, характеристики которых соответствуют вышперечисленным требованиям, относят измерительные приборы прямого метода измерений жидкой массы продукта [43].

К вышперечисленным приборам относят массовый кориолисовый расходомер. Данный измерительный прибор обладает метрологическими характеристиками выше, чем все остальные измерительные измеряемые поток, имеет преимущества перед расходомерами измеряющие объем. В первой степени это измерение массового расхода прямым методом. Данная особенность важна на химических производствах, где необходимо вести наиболее точный учет расхода жидкости [46,26].

В современное время измерение расхода (объемного и массового) занимает следующее место после температуры и составляет 15 % от всех измерений в промощённых инфраструктурах. Существует, расходомеры, не только измеряющие объем жидкости, но и определяющие массу расходуемой жидкости.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

Массовые расходомеры относят к более точным приборам по сравнению с объемными расходомерами. Их используют в нефтехимической, химической, пищевой, фармацевтической, косметической, целлюлозно-бумажной, и многих других отраслях промышленности.

Одни их самых распространенных массовых расходомеров жидкостей это расходомеры, основанные на эффекте Кориолиса, они измеряют расход прямым методом измерения и нечувствительны к изменению условий процесса измерения [5].

Различные неисправности измерительных устройств на производстве приводят к изменению качества измерений расходов на важных этапах коммерческого учета. Данная тенденция вызывает снижение дохода на самом производстве [26].

Чтобы обнаруживать неисправности на самом начальном этапе их появления и уметь своевременно их локализовать, необходимо разработать систему диагностики и/или самодиагностики состояния самых важных приборов, от показаний которых зависит весь ход технологического процесса.

Цель настоящей работы – разработка системы диагностики технического состояния кориолисового расходомера.

Задачи, решаемые в данной работе:

- 1) Провести анализ источников погрешностей и причин выходов из строя кориолисовых расходомеров;
- 2) Провести экспериментальные исследования влияния внешних факторов на частотные характеристики кориолисовых расходомеров;
- 3) Оценить влияние внешних факторов на частотные характеристики кориолисовых расходомеров;
- 4) Оценить влияние двухфазной среды на частотные характеристики расходомеров;

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОРИОЛИСОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ

1.1 Актуальность разработки новых интеллектуальных датчиков с возможностью оценки их технического состояния в процессе эксплуатации

В современное время возникает, повышенный интерес со стороны промышленной отрасли именуемыми себя интеллектуальными средствами измерения. Интеллектуальные средства измерения обладают высокими характеристиками в отличие от традиционных измерений. Во-первых, это вызвано, потребностью поддержания самого продолжительного временного отрезка службы устройства без необходимости его обслуживания и демонтажа при неизменности его надежности и метрологических характеристик. Во вторых, для обеспечения уверенности в том, что устройство работает надлежащим образом, соответствует предъявляемым к нему метрологическим требованиям, а не отклоняется в виду нарушения технических условий при его изготовлении или влияния на него каких либо случайных внешних факторов. Особенно велика потребность в таких приборах в радиохимической и аэрокосмической промышленности, где постоянный монтаж и демонтаж устройства затруднен или невозможен.

Так же замечен рост несоответствия большинства «интеллектуальных» датчиков, представленных сегодня на рынке, требованиям, которые предъявляются к ним, например, со стороны ГОСТ Р. 8.673-2009. В этом документе приведены основные термины и определения, касающиеся интеллектуальных датчиков и систем измерения. В нем описывается, что интеллектуальным датчиком называется «адаптивный датчик с функцией самоконтроля» [23]. Под адаптивным датчиком понимается в данном случае обособленное конструктивно устройство, содержащее несколько или один первичный измерительный преобразователь, «параметры и алгоритмы или параметры или алгоритмы работы которого в процессе эксплуатации могут

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

изменяться в зависимости от сигналов, содержащихся в нем преобразователей». Понятие метрологический самоконтроль означает «проверка метрологической исправности датчика в процессе его эксплуатации автоматически, которая может быть реализована с помощью использования принятых опорных значений. Эти значения формируют с помощью встроенного в датчик измерительного преобразователя или выделенного дополнительного параметра выходного сигнала» [23]. Иными словами, интеллектуальные датчики обеспечивают автоматическую проверку погрешности измерения, а именно, находится ли текущая погрешность измерений в заданных пределах. Метрологической исправностью называют состояние датчика, при котором погрешность измерения данного датчика в процессе эксплуатации условиях работы находится в установленных пределах.

Цель реализации метрологического самоконтроля — это снижение вероятности получения недостоверных измерительных информации в течение меж поверочного или меж калибровочного интервала. Другими словами, это снижение риска возникновения метрологического отказа, который невозможно обнаружить. А, следовательно, и снижение, обусловленных этим отказом последствий. Метрологический самоконтроль поможет обосновать изменения меж поверочного или меж калибровочного интервала в зависимости от остаточного метрологического ресурса; сократить эксплуатационные затраты за счет уменьшений числа калибровок или поверок, или снижения затраты на устранения последствий нарушений технологического процесса, вызванного метрологическими отказами [24]. По результату самоконтроля можно осуществить оценку остаточного метрологического ресурса прибора; произвести изменения меж поверочных или меж калибровочных интервалов; скорректировать функцию преобразований измерительных датчиков.

Разработчики и производители приборов обязаны закладывать в них разработанный ими алгоритм или способ метрологического самоконтроля. Это должно делаться для обеспечения интеллектуальных измерительных приборов

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

выполнения их предъявленных требований. Современные развития измерительных устройств не позволяют производить мгновенные переходы к интеллектуальным средствам измерения, которые способны обеспечивать во всей полноте метрологический самоконтроль. Что бы его обеспечить, нужно провести масштабные научные исследования, направленные, включая, выявления критических составляющих погрешностей средств измерений, сформировать пригодные для контролей параметров, которые могут характеризовать эти погрешности, разработать конструкторские решения, которые позволят внедрять принципы самоконтроля в средства измерения.

В ряде случаев, когда метрологический самоконтроль еще не реализован, необходимым является обеспечение возможности оценки и/или диагностики технического состояния средства измерения, важной для принятия решения об использовании данного устройства в технологическом процессе. Диагностика технического состояния или диагностика неисправностей может являться частью метрологического самоконтроля или само аттестации [49]. Под самодиагностикой или самоконтролем в данном случае понимается автоматическая диагностика своего технического состояния или проверка метрологической исправности самим устройством в соответствии с заложенным алгоритмом. Так или иначе, необходимым шагом к обеспечению самодиагностики и самоконтроля является исследование признаков и параметров, по которым можно судить о состоянии сенсора, и разработка алгоритмов, позволяющих осуществлять наблюдение за данными параметрами и принимать решение в случае их отклонения от опорных значений. Это обуславливает актуальность научной проблемы поиска принципов и способов диагностики состояния расходомеров, что также относится к таким распространенным расходомеров, как кориолисовы.

В зависимости от изменения, появления или исчезновения свойств выделяют такие ненормальные технические состояния объекта, как неисправность, неработоспособность, неправильное функционирование и не функционирование. В теории диагностирования с понятием технического состояния тесно связано

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

понятие дефект [19]. Под дефектом в общем случае понимается «недопустимое отклонение от нормы». Применительно к техническим объектам дефект – это такое изменение, наличие которого ведет к нарушению системы свойств объекта [19]. В данной работе рассматриваются такие состояния расходомера, при которых имеют место дефекты, которые влияют на его функционирование, но еще не привели к выходу его из строя и не диагностируются обычными средствами наблюдения.

Вопросы диагностики систем и механизмов, в их общем понимании, начали развиваться одновременно с появлением контрольно-измерительной аппаратуры, то есть с конца 19-века. В это время процесс контроля сводился, в основном, к проверке нахождения измеряемой величины в допустимых пределах. Стандартным оборудованием предприятий 1935 г. для контроля технологического процесса были графические регистраторы, а позднее – печатающие устройства. Позднее, в 1960-х гг. стали доступны аналоговые контроллеры на базе транзисторов с различными пороговыми устройствами. Однако, несмотря на то, что в это время уже можно было использовать методы спектрального анализа, например, на основе полосовых фильтров, по-прежнему в это время основным алгоритмом обработки производственной информации была пороговая обработка [16].

Развитие диалоговых систем контроля после 1960 г. открыло путь для появления улучшенных методов контроля, таких как анализ трендов. В 1968 г. появление программируемых логических контроллеров дало возможность создать защитные устройства на базе электромеханических реле, что упростило разработку систем защиты [13].

Появление в 1971 г. микроконтроллеров и децентрализованных систем контроля в 1975 г. дало начало более эффективным методам контроля, базирующихся на достаточно сложных алгоритмах и, собственно, к появлению алгоритмов диагностики и обнаружения неисправностей. Первые публикации по методам диагностики, основывающихся на моделях сигналов, были посвящены

аэрокосмическим системам и химическому производству. Эти исследования привели к созданию концепции обнаружения и изоляции неисправностей (FDI – Fault Detection and Iso-lation), которая в настоящее время также иногда называется обнаружение и диагностика неисправностей (FDD – Fault Detection and Diagnosis) [37].

Концепция FDI предполагает последовательную реализацию нескольких этапов. Сначала разрабатывается модель процесса. Затем специальные программные средства осуществляют контроль соответствия между данными и моделью (обнаружение неисправности). После регистрации несоответствия определяется, какой именно компонент системы (датчик, исполнительное устройство или что-нибудь иное) его вызвал. На завершающем этапе система должна отреагировать на выявленную неисправность наиболее адекватным образом. В рамках данной концепции были развиты два направления. Первое направление основано на использовании информационной избыточности. Второе основано на некоторых качественных моделях, которые получают исходя из эвристических соображений. Ко второму направлению можно отнести различные техники, такие как экспертные системы, нейронные сети, сети Петри, нечеткая логика [19].

В 1988 году на факультете инженерных наук Оксфордского университета был основан проект SEVA, целью которого стало создание прототипов нового поколения интеллектуальных и самоаттестующихся датчиков. В 1993 году доктором М. Генри и его коллегами была выдвинута новая модель датчика, которую они назвали SEVA (self-validating sensor). В русский язык эта концепция вошла под названием «само аттестации». В основе данной концепции лежит объединение трех областей: цифровых технологий, диагностики неисправностей и метрологии. Основное внимание в концепции уделяется оценке качества измерений и при возможности поддержание требуемого качества даже при наличии неисправности датчика. Работы М. Генри и его коллег позволили создать

национальный британский стандарт BS-7986, регламентирующий использование интеллектуальных самоаттестующихся средств измерения [18].

Разработка средств измерения с возможностью метрологического контроля с целью увеличения межповерочного интервала велась в России с конца 80-х годов прошлого века. Подход к метрологическому обеспечению на основе самоконтроля (автоматического метрологического контроля) был впервые предложен Р.Е. Таймановым и К.В. Сапожниковой на семинаре в Институте машиноведения АН ССР в 1985 г. С 1985 по 1992 г. был опубликован ряд статей и докладов на эту тему. Параллельно в конце 80-х годов на Украине, во Львове (в НПО «Система» и Львовском политехническом институте) также были развернуты работы в этом направлении. Тогда же был подготовлен и утвержден первый нормативный документ – Рекомендация МИ 2021-89. ГСИ. Метрологическое обеспечение гибких производственных систем. Основные положения, – в котором был введен термин «метрологический диагностический контроль» и эта операция рекомендована для значительного увеличения интервала между поверками [11].

Развитие концепции самоаттестации и самоконтроля породило дискуссию о терминах и понятиях, связанных с новым типом датчиков. В настоящее время идея отечественных ученых носит название метрологического самоконтроля, который подразумевает автоматическую проверку метрологической исправности датчика в процессе его эксплуатации. По опыту британских коллег во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева были разработаны отечественные ГОСТ Р. 8.673-2009 и ГОСТ Р. 8.734-2011.

В концепциях метрологического самоконтроля и самоаттестации предполагается не просто наличие механизма диагностики неисправностей, но выход на «качество измерений», указание статуса результата измерения (достоверный, экстраполированный, недостоверный и др.). Несмотря на то, что общий подход к обеспечению самодиагностики и самоконтроля хорошо описан,

актуальной задачей является создание моделей и разработка диагностических стратегий для конкретных типов измерительных устройств.

1.2 Устройство кориолисового расходомера

1.2.1 Кориолисова сила

Инженер из Франции Г. Кориолис одним из первых обратил внимание, на то, что тело, которое движется по плоскости Земли, имеют склонность к отклонениям в стороны, из-за вращения, направленного на восток, изображенного на рисунке 1.1. Земли. Отклонение происходит в левую сторону на южном полушарии относительно направления движения; а Северном – в правую. Данная особенность отклонения непосредственно влияет на погоду на всей планете, а также на приливы [6].

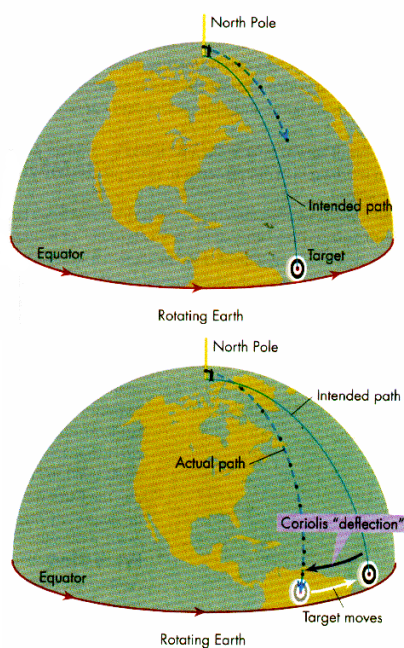


Рисунок 1.1 – Кориолисова сила

Кориолисова сила это одна из инерционных сил, которая используется при движении материальной точки относительно вращающейся системы отсчёта. Если добавить силу Кориолиса к действующим на материальную точку

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

физическим силам, то это позволяет учитывать влияние вращения системы отсчёта на такое движение. Данная сила названа по имени учёного Гюстава Кориолиса, впервые описывающего её в статье, опубликованной в 1835 году [15].

1.2.2 Принцип работы кориолисового расходомера

Кориолисов расходомер предназначен для измерения массового расхода жидкостей и газов. Принцип действия расходомера основан на изменении фаз механических колебаний двух пар точек U-образных трубок, по которым движется измеряемая среда. Трубки под воздействием внешнего возбуждения совершают установившиеся вынужденные колебания на резонансной частоте. Сдвиг фаз пропорционален величине массового расхода, который изображен на рисунке 1.2.

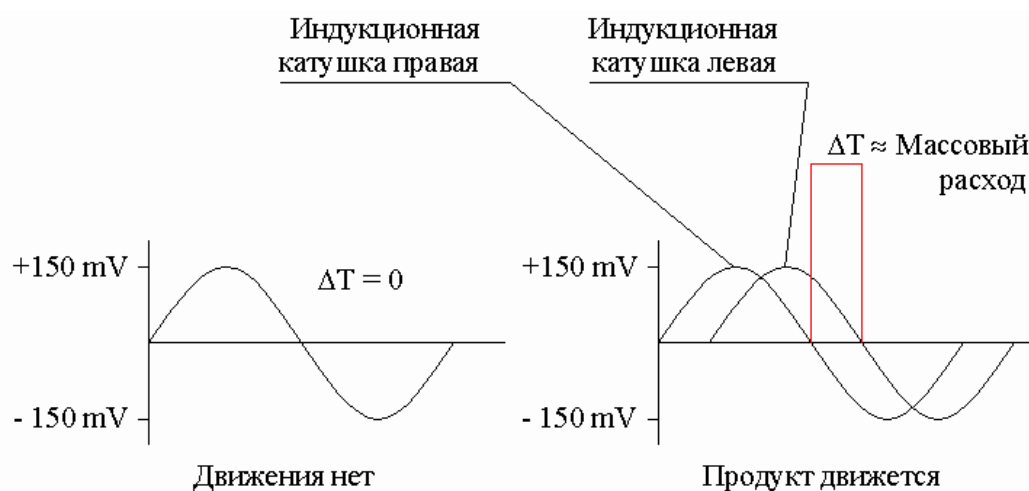


Рисунок 1.2 – Измерение расхода

На примере течения жидкостей горизонтальной трубки опишем принцип работы кориолисового расходомера. Придадим вращение с постоянной угловой скоростью на закрепленную трубу с одного конца, а так же горизонтальную плоскость находящуюся относительно точек закрепления. Придадим трубке вращение, тогда жидкость получит кориолисового ускорение и та величина, которая будет отклоняться, зависит от массовых расходов жидкостей.

Направление силы, которая отклоняет вещество, будет постоянно направлена вправо относительно векторов скорости. Вектора силы Кориолиса и самой скорости жидкостей лежат на горизонтальной плоскости.

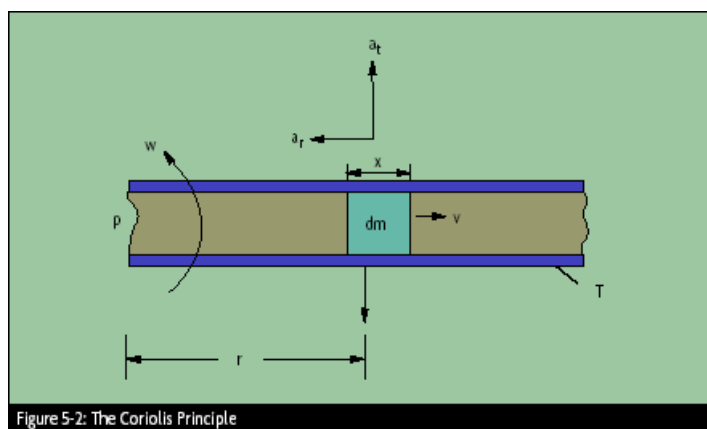


Рисунок 1.3 – Течение жидкости в горизонтальной трубе

В трубке движется частица жидкости, вызывающая вращение относительно постоянной точки P. Частица находится на расстоянии r от точки P, равному радиусу трубы R. Частица движется с угловой скоростью w. Ускорение частицы складывается из двух составляющих: центробежного, направленного к точке P и кориолисового, направленного вправо, относительно центробежного [16].

Следовательно, через измеренные значения силы Кориолиса в трубе с приданным на неё вращением, можно определять массовый расход. Придав трубкам колебательные или вибрационные движения, можно достичь появления силы, на этом принципе работают кориолисовы расходомеры.

Потоки жидкостей и механический привод создают вибрации на трубках, тогда сила Кориолиса вызывает повторную вибрацию, которая заставляет изгибать трубки, это проявляется в разнице фаз движения трубок.

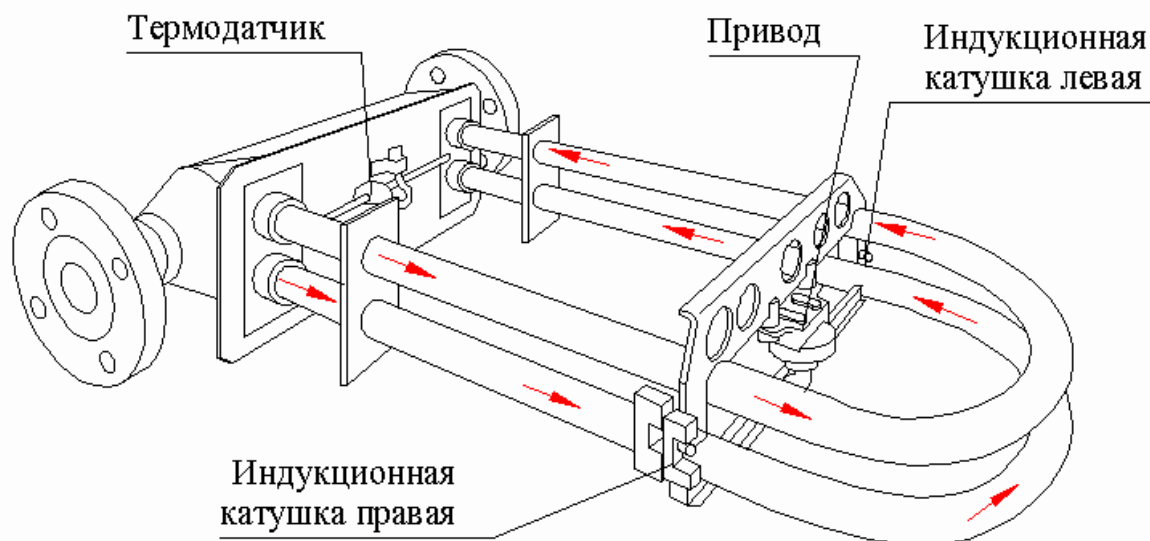


Рисунок 1.4 – Конструкция расходомера

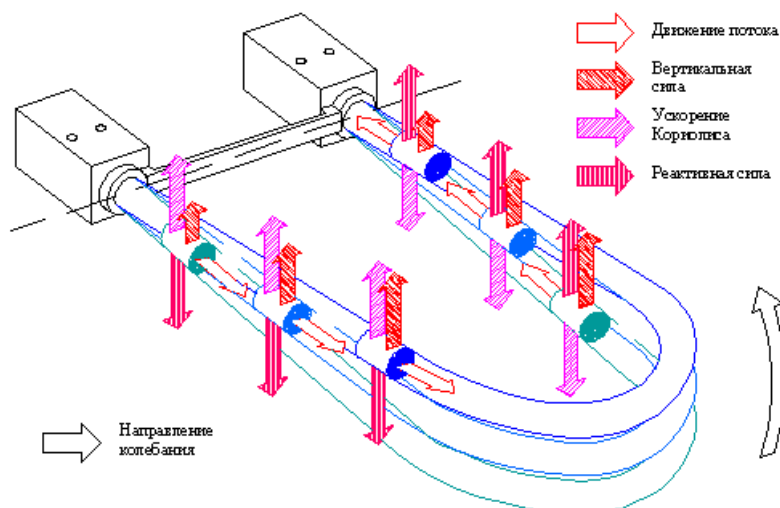


Рисунок 1.5 – Схема действия силы Кориолиса

Совокупность, состоящая из геометрии трубок расходомера, из кого материала они изготовлены, масса трубок, а так же масса всей конструкции с жидкостью задают размер естественной резонансной частоты. При постоянной массе трубок и при том, что масса жидкостей рассчитывается через ее плотность, которая умножается на постоянный объем, то резонансная частота зависит от плотности, протекающей в трубках жидкости.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Следовательно, плотность жидкости может быть определена путем измерения резонансной частоты колебаний трубок (заметим, что плотность жидкости может быть определена и в отсутствие потока, пока трубки заполнены жидкостью и колеблются).

В разработке исследования выбран кориолисов расходомер ДУ15 с изогнутыми трубками. Этот расходомер имеет сравнительно небольшие размеры (400x290x60), что делает его удобным при экспериментальных исследованиях, где необходимо использование специальной оснастки для закрепления и стенда для создания потока воды через трубки расходомера. С другой стороны, расходомер ДУ15 можно считать среднего размера, т.к. диаметр его трубок значительно больше малых расходомеров (ДУ2 и ДУ3). В дальнейшем, например, при исследовании влияния давления на собственные частоты колебаний трубок, в качестве дополнительного расходомера будет рассматриваться расходомер ДУ50.

Геометрическая модель кориолисового расходомера ДУ15 представлена на рисунке 1.7. Расходомер состоит из измерительной части (трубок) и корпуса.

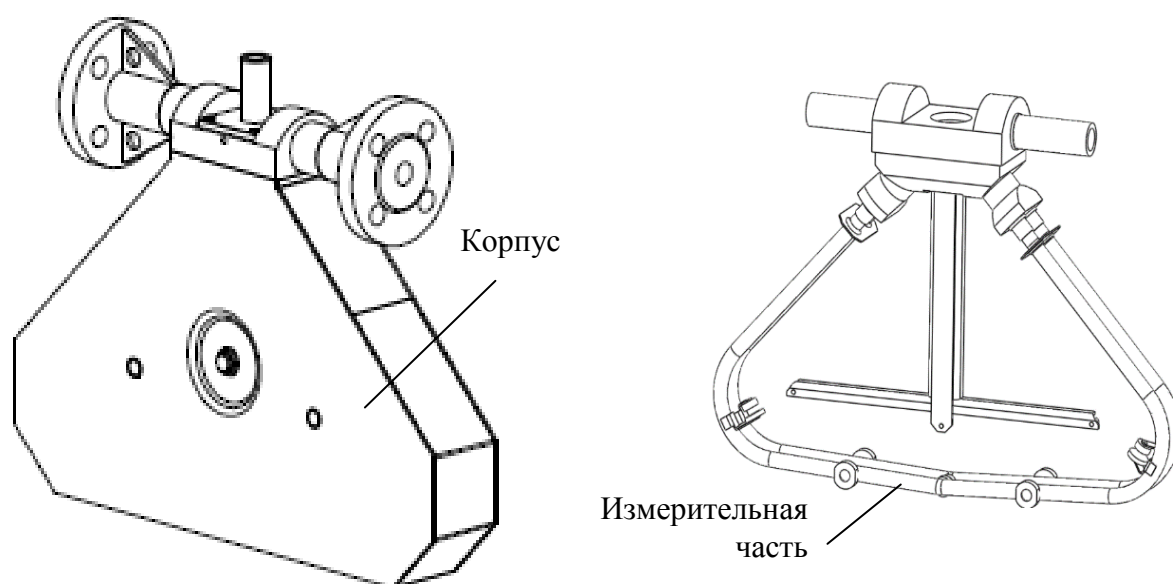


Рисунок 1.6 – Геометрическая модель расходомера

Собственные формы колебаний расходомера можно разделить на собственные формы трубок, когда колеблются преимущественно трубки, а корпус не деформируется и собственные частоты корпуса, когда корпус деформируется, а трубки движутся как абсолютно твердые тела. Существуют формы собственных колебаний, на которых деформируются трубки и корпус, затрудняющие идентификацию форм, на которых колеблются трубки. С целью идентификации форм и частот собственных колебаний расходомера модальный анализ расходомера удобно рассматривать по отдельным подсистемам:

- измерительная часть (без корпуса);
- корпус (без измерительной части);
- объединенная система (измерительная часть и корпус).

Что бы описать вынужденные колебания системы рассмотрим уравнение колебания трубок с жидкостью при учёте силы трений:

$$m \cdot x + 2 \cdot m_2 \cdot w_0 \cdot \dot{x} - E \cdot x = F_0 \cdot \sin(w_0 t), \quad (1.1)$$

где E – модуль упругости, Па;

F – сдвиговой кручением модуль упругости, Па;

m – масса всей системы состоящей из трубки и жидкости, кг.

$$m = m_1 + m_2, \quad (1.2)$$

где m_1 – масса трубок, кг;

m_2 – масса жидкости, кг.

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2 + \mu \cdot \dot{x}_2 = \mu \cdot x = \mu \cdot x \cdot w \cdot \sin(wt), \quad (1.3)$$

где μ – модуль упругости, Па.

Уравнение 1.2 описывает движение измерительной системы состоящей из трубок и жидкости. Уравнение 1.3 описывающие движения жидкостей в трубке при учете сил трений жидкостей об стенки труб расходомера.

Скорость потока жидкости рассчитывают следующим образом:

$$v = \frac{Q_m}{S}, \quad (1.3)$$

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

где Q_m – расход, кг/ч;

S – площадь сечения трубок.

$$S = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}, \quad (1.4)$$

где d_0 – диаметр трубок, м.

Рассмотрим уравнение движения трубки для расчета влияния силы Кориолиса и собственной частоты колебания трубки:

$$m \cdot \ddot{y} + 2 \cdot m_2 \cdot \omega_0 \cdot \dot{y} - \ddot{E} \cdot y = \ddot{F}_0 \cdot \sin t \quad (1.5)$$

Частоту колебаний следует выбирать резонансной, т.к. чтобы поддерживать постоянные колебания заполненной трубы, необходима минимальная вынуждающая сила. Резонансную частоту вычислим по следующей формуле:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1.6)$$

где ω_0 – собственная частота колебания трубок, Гц;

m – масса трубок и жидкости, кг;

k – жесткость, кг/с.

Поскольку характеристика трубок линейна, то их жесткость будет постоянна и определяется по формуле 1.8 [5]:

$$k = E \cdot \frac{3 \cdot \pi \cdot (d^4 - d_0^4)}{4 \cdot L^3}, \quad (1.7)$$

где E – упругость нержавеющей стали при нормальных условиях температуры.

Массу системы можно рассчитать следующим образом [7]:

$$m = m_T + m_{ж} \quad (1.8)$$

где m_T – масса трубок, кг;

$m_{ж}$ – жидкостная масса, кг.

$$m_T = \frac{\pi \cdot (2 \cdot l_1 + l_2) \cdot (d^2 - d_0^2) \cdot \rho_T}{4}, \quad (1.9)$$

где l – длина,

$$l_2 = \pi \cdot R$$

Масса жидкости рассчитывается как:

$$m_{ж} = \frac{(2 \cdot l_1 + l_2) \cdot \pi \cdot d_0^2 \cdot \rho_{в}}{4}; \quad (1.10)$$

где $\rho_{в}$ – плотность воды, кг/м³.

Если известна скорость движения жидкости v , то можно определить разность фаз колебаний трубок из соотношения [3]:

$$2 \cdot \omega_0 \cdot \rho_{в} \cdot v_1 \cdot a = (E - \rho_{в} \cdot v_1^2) \cdot \delta\varphi, \quad (1.11)$$

где a – длина трубки, м;

E – модуль упругости, Па;

$$\delta\varphi = \frac{2 \cdot \omega_0 \cdot a \cdot v_1 \cdot \rho_{в}}{E - \rho_{в} \cdot v_1^2}; \quad (1.12)$$

Силу Кориолиса можно рассчитать как:

$$F_k = 2 \cdot m_{ж} \cdot v_1 \cdot \omega_0, \quad (1.13)$$

Из выражения 4.3 следует, что собственная частота трубки зависит от её массы, что подтверждается экспериментальными исследованиями влияния внешних факторов на частотные характеристики кориолисового расходомера.

После проведения экспериментальных исследований существует возможность расчета частотной передаточной функции кориолисового расходомера. Исследовав передаточную функцию можно говорить о возможности разработки системы диагностики неисправностей кориолисовых расходомеров. Эталонная передаточная функция расходомера является аналитическим решением задачи колебаний участка трубы с потоком жидкости внутри него. В случае нулевого расхода матрица частотной передаточной функции имеет вид:

$$[H(i \cdot \omega)] = \sum_t^N \frac{Q_r\{\Psi\}_r \cdot \{\Psi\}_r^T}{\mu_{r,r} \cdot (p_r^2 - \omega^2)}, \quad (1.14)$$

где ω это рабочая частота (рад/с);

N – номер сохраняемых частот одного из режимов;

Q_r масштабирующие факторы;

$\{\Psi\}_r$ – вектор r -й рабочего режима;

$\mu_{r,r}$ – элемент диагональной матрицы обобщенной массы; p_r r -й номер рабочей частоты системы (рад/с).

Уравнение может быть записано в следующей форме:

$$[H(i \cdot \omega)] = \sum_t^N \frac{\{\Psi\}_r \cdot \{L\}_r^T}{\mu_{r,r} (p_r^2 - \omega^2)}, \quad (1.15)$$

где $\{L\}_r$ – вектор модального коэффициента распределения $\omega_{1,2}$ - резонансные частоты. Если при изменении массового расхода параметры колебательной системы меняются, то это находит отражение в изменении соответствующих подгоночных параметров. При проведении каждой операции аппроксимации на выходе вычислительного блока формируется полный набор «измеренных» параметров среды и колебательной системы. Вычисленное значение резонансной частоты поступает в блок генерации широкополосного сигнала возбуждения для подстройки центральной частоты в соответствии с равенством [11]:

$$F_0 = \frac{\omega_{1,2}}{2 \cdot \pi} \quad (1.16)$$

1.3 Анализ основных источников погрешности и причин выхода из строя кориолисовых расходомеров

При выявлении источников погрешности, нарастающей в процессе эксплуатации, рекомендуется в частности, выполнить следующие этапы:

1. анализ ожидаемых условий эксплуатации;
2. анализ публикаций в научно-технической литературе, касающихся причин возникновения погрешностей аналогов;
3. анализ опыта эксплуатации аналогов по сведениям о причинах метрологических отказов в процессе эксплуатации;
4. выявление «слабых звеньев» аналогов (под «слабыми звеньями» понимают элементы и узлы конструкции, изменение характеристик которых, в том числе

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

вследствие изменения свойств материалов, может со временем привести к существенному росту погрешности).

Из патента измерительный электронный прибор для кориолисового расходомера и способ подтверждения правильности калибровочного коэффициента расхода, используемого в этом измерительном приборе, следует, что на основе калибровочного коэффициента передачи можно судить о техническом состоянии расходомера и определять изменения плотности вещества. Рассчитывают коэффициент перед измерением через плотность вещества, через параметры трубки. Потом идет расчет через измерение путем периодов колебаний и сравнение плотности вещества или калибровочного коэффициента со значениями, которые посчитали перед измерением. Отклонения значений есть признак ошибки, неисправности.

Перед измерением расхода считают калибровочный коэффициент потока (ККП), который зависит от плотности жидкости, от площади поперечного сечения трубки [19].

При измерении жидкость изменяет размер сечения трубки из-за коррозии и других воздействий. При этом будет меняться ККП, а, следовательно, измерение расхода будет уже не точным.

Если следить за изменением ККП, то можно вовремя прекратить измерение или внести поправку в коэффициент. Для этого они измеряют КПП другим путем через уравнения и сравнивают результат.

Период колебаний используется для выявления ситуаций появления возможных ошибок в трубке из-за связи между калибровочным коэффициентом потока трубки и полученной в результате измерения плотностью вещества, протекающего по трубке. Калибровочный коэффициент потока равен первой геометрической постоянной, умноженной на модуль упругости первого рода (модуль Юнга) для трубки и на момент инерции трубки.

Плотность вещества, протекающего по трубке, вычисляют путем умножения квадрата периода колебаний трубки, когда вещество протекает по трубке, на

первую постоянную плотности и затем добавления к результату второй постоянной плотности. Первую постоянную плотности определяют путем умножения второй геометрической постоянной на модуль упругости первого рода для трубки и момент инерции трубки. Поскольку первая геометрическая постоянная калибровочного коэффициента потока и вторая геометрическая постоянная плотности умножаются на модуль упругости первого рода для трубки и на момент инерции трубки, калибровочный коэффициент потока и первая постоянная плотности являются пропорциональными.

Следующие четыре варианта осуществления настоящего изобретения обнаруживают ситуацию ошибок, которые выявляются при измерении периода колебаний трубки. В первом и втором вариантах осуществления используются плотность вещества, рассчитанная на основании измеренного периода колебаний трубки, чтобы обнаружить ситуацию возникновения ошибок. В третьем варианте осуществления для обнаружения ситуации возникновения ошибок используется первая постоянная плотности. В четвертом варианте осуществления обнаруживается ситуация возникновения ошибок на основании сравнения измеренного периода колебаний трубки внутри и известного периода колебаний трубки для данного вещества.

Первый вариант осуществления обнаруживает ситуацию возникновения ошибок следующим образом. Период колебаний трубки измеряется, когда по трубке протекает вещество с известной плотностью. Плотность вещества вычисляется на основании измеренного периода колебаний. Рассчитанная и известная плотности вещества сравниваются. Если рассчитанная плотность не равна известной плотности, сигнал указывает, что возникла ситуация ошибок, поскольку калибровочный коэффициент потока изменился, и требуется проверка кориолисового расходомера. Если рассчитанная и известная плотности равны, измеряемый массовый расход точен, и кориолисов расходомер проверять не нужно.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

Второй альтернативный вариант осуществления настоящего изобретения учитывает допуск при сравнении рассчитанных и известных плотностей вещества следующим образом. После вычисления плотности вещества известная плотность вычитается из рассчитанной плотности, чтобы вычислить отклонение рассчитанной плотности. Затем отклонение сравнивается с областью допустимых значений. Если отклонение находится вне области допустимых значений, сигнал указывает, что возникла ситуация ошибок, потому что калибровочный коэффициент потока мог измениться, и требуется проверка кориолисового расходомера. Если отклонение находится в пределах области допустимых значений, измеренный массовый расход оказывается точным, и кориолисов расходомер проверять не нужно.

В третьем альтернативном варианте осуществления настоящего изобретения ситуацию ошибок в кориолисовых расходомерах обнаруживают на основании первой постоянной плотности следующим способом. Первая постоянная плотности вычисляется с помощью калибровки для обнаружения ситуации ошибок. При калибровке первый период колебаний трубки измеряется, когда по трубке протекает первое эталонное вещество, имеющее первую известную плотность, а второй период колебаний измеряется, когда по трубке протекает второе эталонное вещество, имеющее вторую известную плотность. Затем первый и второй периоды колебаний возводятся в квадрат. Возведенный в квадрат период колебаний вычитается из второго, возведенного в квадрат периода колебаний для определения изменения возведенных в квадрат периодов колебаний. Для определения изменения плотностей первая известная плотность вычитается из второй известной плотности. Затем изменение плотностей делится на изменение периодов колебаний, возведенных в квадрат для определения первой постоянной плотности. Первая постоянная плотности, первая известная плотность и первый, возведенный в квадрат период колебаний, хранятся в запоминающем устройстве для использования при сравнениях в последующих испытаниях.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

В четвертом варианте осуществления для выявления ситуации возникновения возможных ошибок сравниваются ожидаемый период колебаний и измеряемый период колебаний трубки, когда вещество протекает по трубке. Ожидаемый период колебаний определяется из вычислений, используя известную плотность вещества, или из предыдущих измерений периода колебаний. Период колебаний трубки измеряется, когда по трубке протекает вещество. Измеряемый период колебаний сравнивается с ожидаемым периодом колебаний. Если измеряемый и ожидаемый периоды колебаний вещества не равны, сигнал указывает, что возникла ситуация ошибок, потому что калибровочный коэффициент потока изменился, и требуется проверка кориолисового расходомера. Если измеряемый и известный периоды колебаний равны, то измеряемый массовый расход оказывается точным, и кориолисов расходомер проверять не нужно.

Патент способ и устройство для обнаружения и коррекции ошибок в расходомере с использованием эффекта Кориолиса описывает и предлагает решить обнаружение неисправности связанной с трещинами. Трещины от коррозии дают утечку, что влияет на измерение расхода. Изобретение обеспечивает достаточно раннее обнаружение трещин.

При нормальной работе расходомера в статических условиях мощность возбуждения, необходимая для создания вибраций расходных трубок, и результирующая резонансная частота вибраций расходных трубок являются постоянными. Изменения требуемой мощности возбуждения или резонансной частоты вибраций расходных трубок указывают на изменение условий, в которых работает расходомер. Изменения мощности возбуждения или резонансной частоты анализируются при помощи способов и устройств в соответствии с настоящим изобретением для обнаружения трещины в расходных трубках или обнаружения других рабочих аномалий. Каждый обнаруженный при помощи настоящего изобретения дефект создает характерное изменение во времени мощности возбуждения и/или резонансной частоты. Например, изменение массового расхода материала в трубках может приводить к изменению

резонансной частоты расходных трубок без существенных изменений в требуемой мощности возбуждения. Однако внезапное изменение резонансной частоты расходных трубок, которое связано с увеличением требуемой мощности возбуждения, является свидетельством образования трещины в расходных трубках. Другие изменения рабочих состояний также являются характеристическими и детектируются (обнаруживаются) в соответствии с настоящим изобретением как рабочие дефекты или аномалии. Индикацией дефекта служат пороговые значения мощности возбуждения и частоты, а также расход и кривизна изменений во времени (первая и вторая производные во времени).

Настоящее изобретение позволяет обнаруживать наличие трещин в расходных трубках расходомера Кориолиса. Наличие трещины опознается за счет характеристического снижения резонансной частоты вибрирующих расходных трубок совместно с увеличением мощности возбуждения, которая требуется для создания вибраций расходных трубок. Такое раннее обнаружение трещины позволяет оператору или контуру управления прекратить поток материала или снизить давление в расходной трубке, чтобы предотвратить вредную утечку материала, протекающего в расходомере.

Патент способ и устройство для обнаружения и коррекции ошибок в расходомере с использованием эффекта Кориолиса рассказывается о частоте. Если значение наклона, частоты вибраций больше номинального значения тогда выходной сигнал может указывать на наличие трещины в расходомерных трубках.

Способ [12] отличается тем, что когда указанное измеренное значение текущей частоты вибраций на определенную величину лежит ниже номинального значения частоты вибраций, указанное измеренное значение текущей мощности возбуждения на определенную величину лежит выше номинального значения мощности возбуждения, тогда указанный выходной сигнал указывает на наличие трещины в указанных расходных трубках.

В ГОСТ Р. 8.734–2011 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля указывается, что возникновение погрешности в процессе эксплуатации, в основном обусловлено:

а) изменением характеристик материалов, элементов и узлов конструкции, а также технологических процессов (при их полном соответствии конструкторско-технологической документации);

б) повреждениями, вызванными нарушениями технологических процессов изготовления датчиков или каналов измерительной системы;

в) вторичными повреждениями в процессе эксплуатации как следствием процессов, вызванных повреждениями пункта б).

В ГОСТ Р. 8.734–2011 также приведены источники погрешности и условия их возникновения, характерные для датчиков расхода, а именно в частности к расходомеру Кориолиса. К первому рангу приоритета отнесены такие источники погрешности и условия их возникновения, как пузырьки газа в жидкости. А ко второму рангу: засорение, загрязнение, эрозия, коррозия.

Результаты наблюдений исследования показали, что 15,62 % от общего числа отказов топливной системы вызваны поломками расходомеров [14].

Любая схема расходомера имеет свои определенные неисправности. Для расходомеров «лопаточного» типа это в основном износ токопроводящих управляемых поверхностей потенциометров, а также образование маслянистых отложений на рабочих элементах.

Износ потенциометра (токоведущий «пропил» на дорожке) приводит к периодическому пропаданию электрического сигнала, вследствие чего происходит искажение передачи данных в блок управления.

Маслянистые отложения и окись на поверхности канала мешают перемещению заслонки, вследствие чего она начинает подклинивать.

Причиной неисправности в расходомерах может быть отсутствие питания от бортовой сети, а также неквалифицированное обслуживание этого узла. Так же

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

протираание рабочей поверхности расходомера ватой способно вывести его из строя. Данный узел является необслуживаемым и, как считается, неремонтопригодным. Может быть проверена только надежность соединения контактов, а в случае загрязнения может помочь продувка сжатым воздухом или промывка рабочих поверхностей специальными растворами.

Прямое измерение массы, осуществляющееся с помощью кориолисового расходомером

было бы полезно в дозировании партий материала. Однако это часто не практично, чтобы гарантировать, что при измерении расхода жидкости оставалась только жидкость от начала до конца партии. Например, при заполнении танкера нефтью, засасывание воздуха трудно избежать.

Неисправность кориолисовых расходомеров заключается в отклонении от перпендикулярности уплотнительной поверхности одного из фланцев сенсора от оси прибора. Причиной данной неисправности может служить выход из строя прибора, вследствие нарушения условий эксплуатации. Под нарушением условий эксплуатации понимается нерегламентированное механическое воздействие на сенсор, наиболее вероятная причина это не герметичность между фланцами [16].

1.4 Цели и задачи исследования

На основе изложенных подходов и обзора, существующих исследований в данной области было установлено, что, несмотря на множество развитых методов обнаружения и диагностики неисправностей, задача диагностики технического состояния кориолисового расходомера остается актуальной. Методы, основанные на анализе сигнала, часто базируются на простых соотношениях и не дают необходимого разрешения в случае оценки изменения АЧХ кориолисовых расходомеров.

Изменения величины фазового сдвига, не связанные с изменением параметров потока измеряемой среды, приводят к увеличению погрешности измерения

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

массового расхода. Смещение нуля кориолисового расходомера – это величина разности фаз при отсутствии течения измеряемой среды. Для исследования влияния условий закрепления на смещение нуля будет проведено экспериментальное исследование, позволяющая изменять дополнительную массу, которая присоединяется к трубкам расходомера. Изменение длины трубопроводов приводит к изменению форм и частот собственных колебаний системы расходомера соединённого трубопроводом. Для определения форм и частот собственных колебаний системы будут проведены экспериментальные испытания кориолисового расходомера при разных массах. Испытания проведены на расходомере со стоячей водой и при текущей воде с постоянным расходом. Установлено, что максимальное смещение нуля наблюдается при длинах трубопроводов, на которых частота собственных колебаний связанной системы совпадает с частотой резонансных колебаний трубок, на которой работает расходомер. Для уменьшения влияния дополнительной массы на смещение нуля в статье рассмотрено дополнительное жесткое закрепление расходомера за корпус.

Данное диссертационное исследование посвящено исследованию влияния внешних факторов на амплитудно частотные характеристик расходомеров.

Цель работы – Разработка и проведение экспериментальных исследований влияния внешних факторов на амплитудные характеристики для диагностики технического состояния кориолисового расходомера.

Основные задачи исследования:

1. анализ современных подходов к оценке технического состояния кориолисовых расходомеров.

2. экспериментальные исследования влияния внешних факторов на частотные характеристики кориолисового расходомера.

3. оценка результатов экспериментального исследования влияния внешних факторов на частотные характеристики расходомера.

4. оценка влияния двухфазного потока на частотные характеристики кориолисового расходомера.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРИОЛИСОВОГО РАСХОДОМЕРА

В ходе анализа второй главы было выделено, что, несмотря на множество развитых методов обнаружения и диагностики неисправностей, задача диагностики технического состояния кориолисового расходомера остается актуальной. Методы, основанные на анализе сигнала, часто базируются на простых соотношениях и не дают необходимого разрешения в случае оценки изменения АЧХ кориолисовых расходомеров. Выявлено несколько факторов влияющих на частотные характеристики кориолисовых расходомеров: попадание инородных предметов, налипание на трубки, коррозия, появление в жидкости пузырьков воздуха. В результате обнаружения данных факторов будет разработан экспериментальный стенд для исследования влияния внешних факторов на частотные характеристики кориолисовых расходомеров.

Как было описано в обзоре кориолисового расходомера расход измеряется разностью фаз между двумя катушками. При возникновении какой либо неисправности связанной с засорением, коррозией трубок показания расхода будет изменяться, и расходомер будет измерять с большей погрешностью. Самый ранний этап в оценке диагностики технического состояния заключается в оценивании влияния различных факторов на различные характеристики в расходомере. Эксперимент позволит оценить влияние неисправности на частотные характеристики катушек в расходомере.

2.1 Описание экспериментального поливочного стенда.

Объектом исследования стенда является кориолисов расходомер, закрепленный на установке, изображенной на рисунке 2.1.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32



Рисунок 2.1 – Проливочный стенд

Измерительное оборудование включает себя:

1. портативный трёхкомпонентный лазерный виброметр Polytec CLV-3D-3220 изображенный на рисунке 2.2;



Рисунок 2.2 – Портативный трёхкомпонентный лазерный виброметр Polytec CLV-3D-3220

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

2. лазерный виброметр предназначен для экспериментального бесконтактного определения в точке колеблющейся конструкции.

Основные технические характеристики:

- 2.1 тип виброметра: одноточечный, не сканирующий;
- 2.2 количество лазерных головок: 3 головки, упакованные в одном корпусе;
- 2.3 фокусное расстояние: 160 мм; 310 мм;
- 2.4 максимальная амплитуда виброскорости: 1,25 м/с;
- 2.5 максимальная частота колебаний: 250 кГц;
- 2.6 количество динамических диапазонов: 3 (до 100 мм/с; до 500 мм/с; до 2500 мм/с).

3. Система сбора и анализа данных LMS Scadas Lab рисунок 2.3;

Система сбора обеспечивает возможность подключения источников переменного и постоянного напряжения, а также датчиков ICP, таких как акселерометры и микрофоны. Система позволяет подключать тензометры (до 40 каналов). Имеет автономный режим работы, система предназначена для применения при ходовых испытаниях транспортных средств. Позволяет выполнять сбор данных в полевых условиях.



Рисунок 2.3 – Измерительный комплекс LMS

Основные технические характеристики:

- 3.1 максимальное число каналов: 40;
- 3.2 максимальная частота дискретизации: 204,8 кГц;
- 3.3 динамический диапазон: 150 дБ;
- 3.4 входной разъем для подключения датчиков: BNC;

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

3.5 количество каналов для измерения звуковых давлений и ускорений: 40;

3.6 количество каналов для измерения температур: 16.

LMS предлагает уникальную комбинацию программного обеспечения виртуального моделирования, систем автоматизации испытаний и инженерных услуг. Является признанным лидером в разработке систем виртуального моделирования и оптимизации.

На рисунке 2.4 представлена экспериментальная схема снятия электрических характеристик с катушек расходомера.

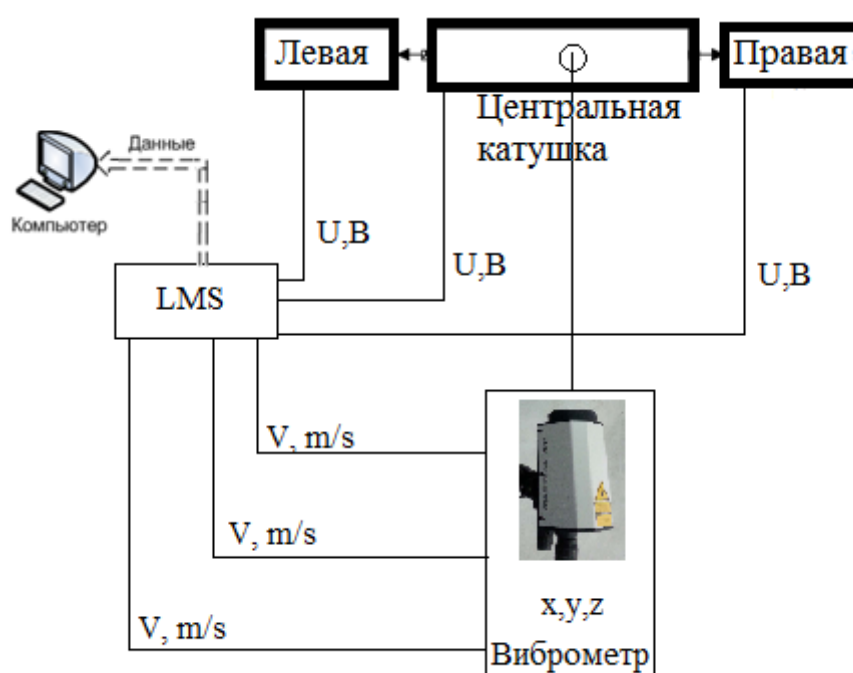


Рисунок 2.4 – Схема стенда для проведения исследований

Датчики всегда устанавливались вертикально, чтобы уменьшить неравномерность распределения газа, при асимметричной установке, как показано на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Установка для испытания кориолисового расходомер

К измерительному комплексу LMS подключают правую, левую и центральную катушки и измеряют напряжение, как показано на рисунке 2.6.

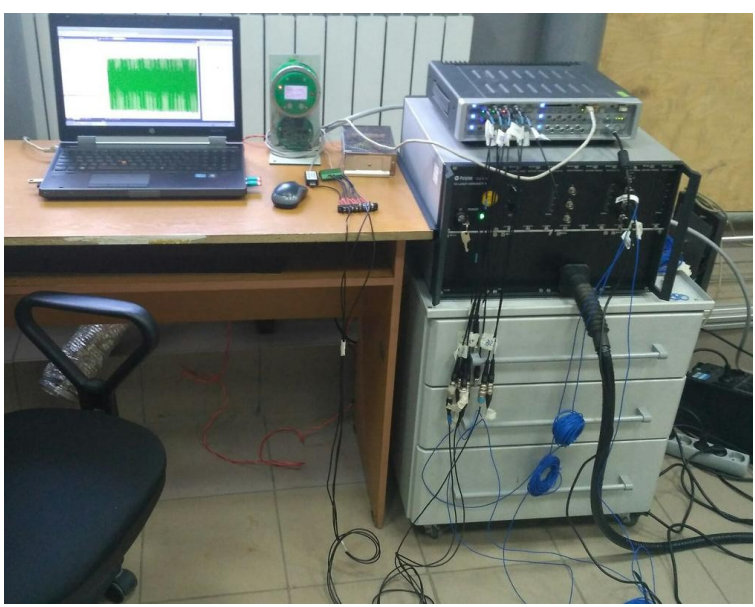


Рисунок 2.6 – Снятие частотных характеристик правой и левой катушки по каналам LMS

Общий вид экспериментальной установки изображен на рисунке 2.7



Рисунок 2.7 – Экспериментальная установка

2.2 Методика обработки результатов эксперимента

Большая часть настоящего исследования основана на спектральном анализе цифровых сигналов. Одним из самых распространенных и применяемых инструментов для такого анализа в настоящее время выступает дискретное преобразование Фурье (далее ДПФ).

Ниже приведены некоторые пояснения, связанные с особенностями применения алгоритма дискретного преобразования Фурье непосредственно в условиях, в которых проводились исследования.

Вся обработка информации в данной работе проводилась в пакете Matlab. Это обусловлено широкими возможностями данного пакета, которые также включают в себя управление и обмен данными с осциллографом.

Связь между представлениями сигнала во временной и частотной области согласно преобразованию Фурье представлена формулами (2.1) и (2.2) [3]:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (2.1)$$

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \exp(-j \frac{2\pi nk}{N}), \quad (2.2)$$

где N - количество отсчетов, используемых для расчета;

$x(k)$ - k -ый отсчет сигнала во временной области;

$X(n)$ - n -ый отсчет сигнала в частотной области;

Прямое и обратное ДПФ в Matlab'e реализовано стандартными функциями `fft` и `ifft`.

Как видно из формул (2.1) и (2.2), в них нет никакого указания на реальные моменты времени и частоты. В них фигурируют лишь номера отсчетов во временной и частотной областях. Временные и частотные масштабы определяются частотой дискретизации анализируемого сигнала, а также его длительностью.

Если последовательность $\{x(k)\}$ представляет собой отсчеты, взятые с частотой дискретизации F_s , то частоты анализа, соответствующие спектральным отсчетам, полученным в результате вычисления ДПФ, будут расположены с шагом

$$df = \frac{F_s}{N} \quad (2.3)$$

Из сказанного вытекает следующее:

Чтобы увеличивать анализируемый частотный диапазон, необходимо увеличивать частоту дискретизации F_s ;

Чтобы улучшить разрешение по частоте в получаемом спектре, необходимо увеличивать N , т.е. анализировать более длинный фрагмент сигнала.

Обработка измерений проводилась с помощью программного пакета Matlab.

После начала генерации импульсов с осциллографа на компьютер записывались временные отклики преобразователя. Затем к каждой реализации применялась операция быстрого преобразования Фурье

Спектры выходного сигнала рассчитывались в диапазоне от 0 до 50 кГц. Результирующее разрешение по частоте - 200 Гц.

На рисунке 2.8 представлены показания амплитудно частотной характеристики катушек:

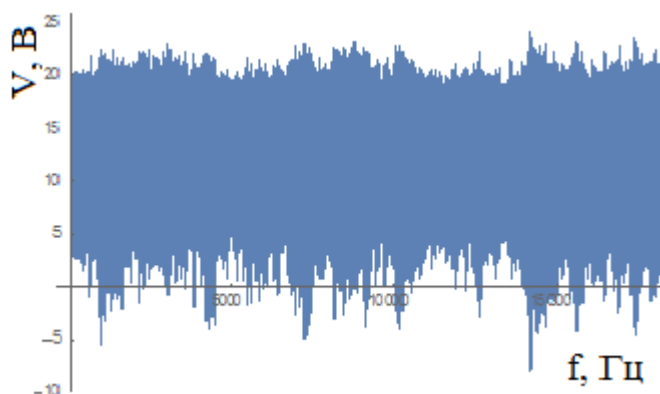


Рисунок 2.8 – Снятие частотных характеристик правой и левой катушки по каналам LMS

Как видно из рисунка, длительность интересующего нас отклика составляет приблизительно 2500 точек. Именно эти отсчеты используются для расчета спектра Фурье в процедуре fft.

Таким образом, согласно формуле (2.3) разрешение по частоте определится, как:

$$df = \frac{500000}{2500} = 200 \text{ Гц}$$

Согласно теореме Котельникова, спектр дискретного сигнала будет ограничен половиной частоты дискретизации F_s , т.е. 250 кГц.

На рисунках 2.5 и 2.6 приведены показания правой и левой катушек, а так же найден спектр.

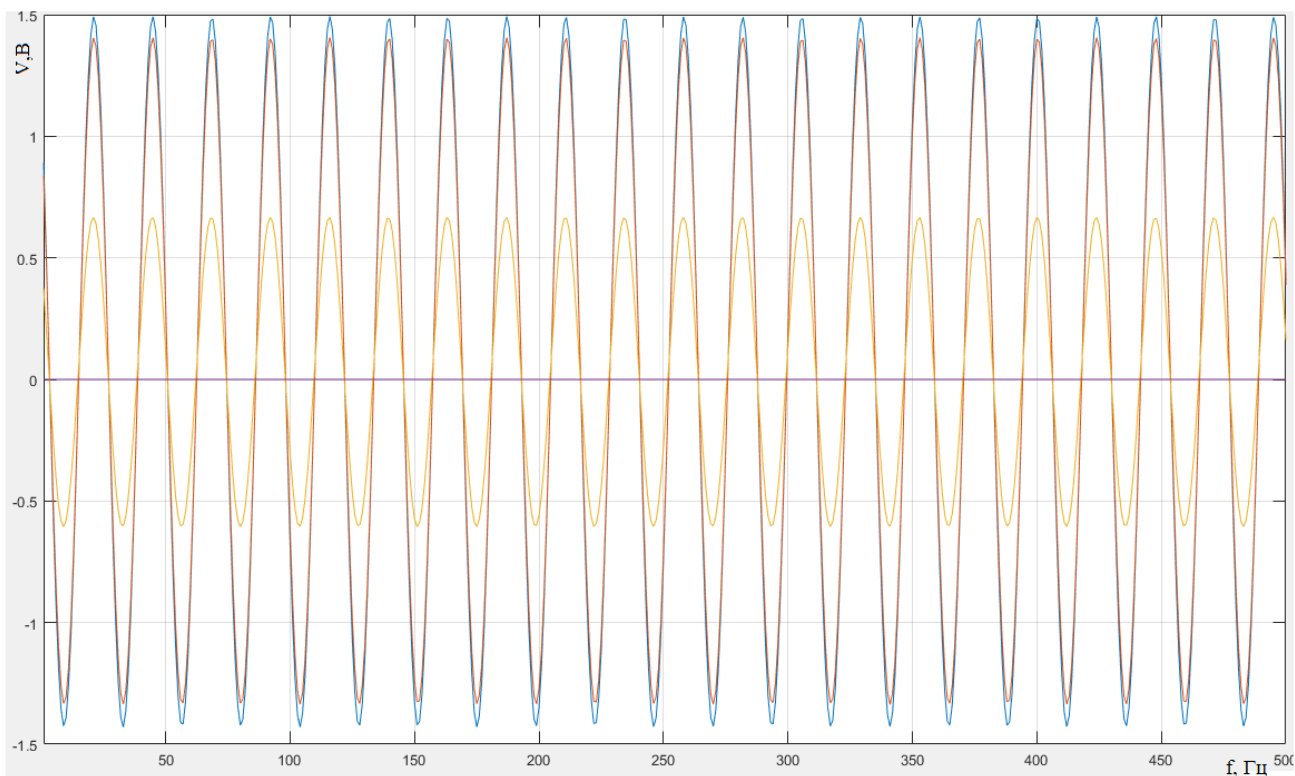


Рисунок 2.9 – Напряжение с катушек расходомера с давлением 0.8 атм. и расходом 1176 кг/ч

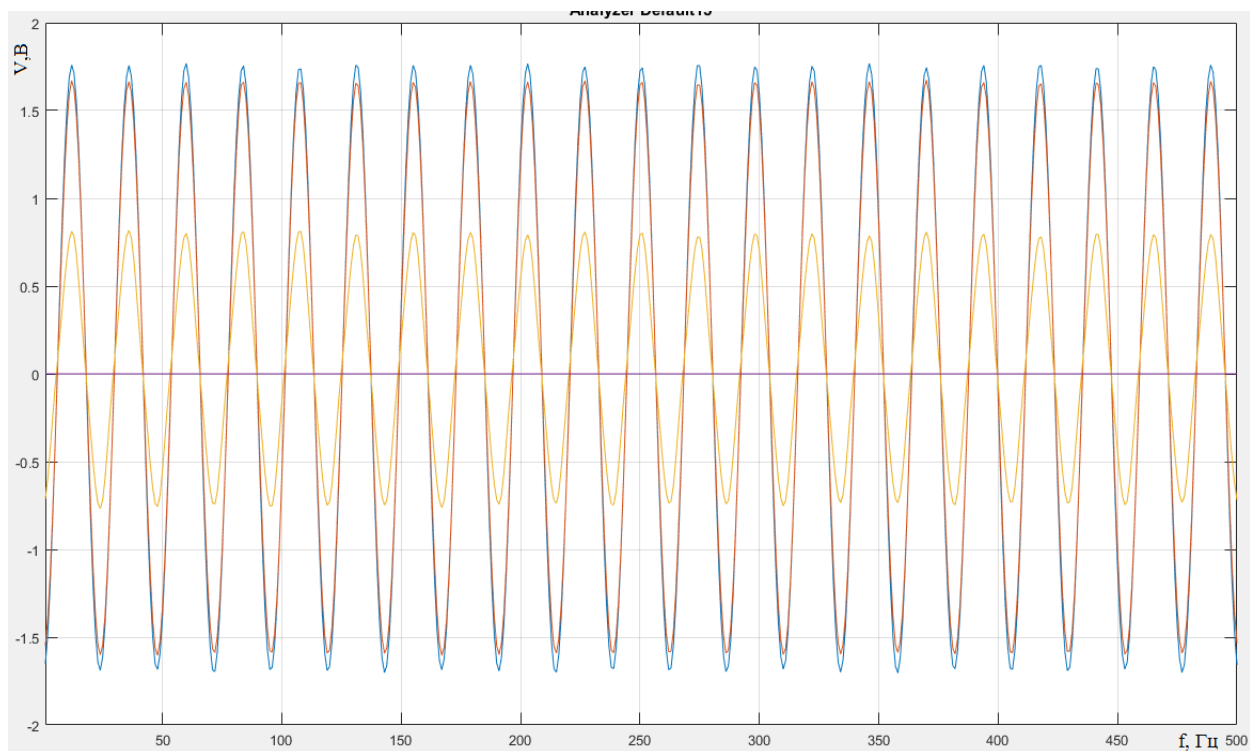


Рисунок 2.10 – Напряжение с катушек расходомера с давлением 0.8 атм. и расходом 1176 кг/ч

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

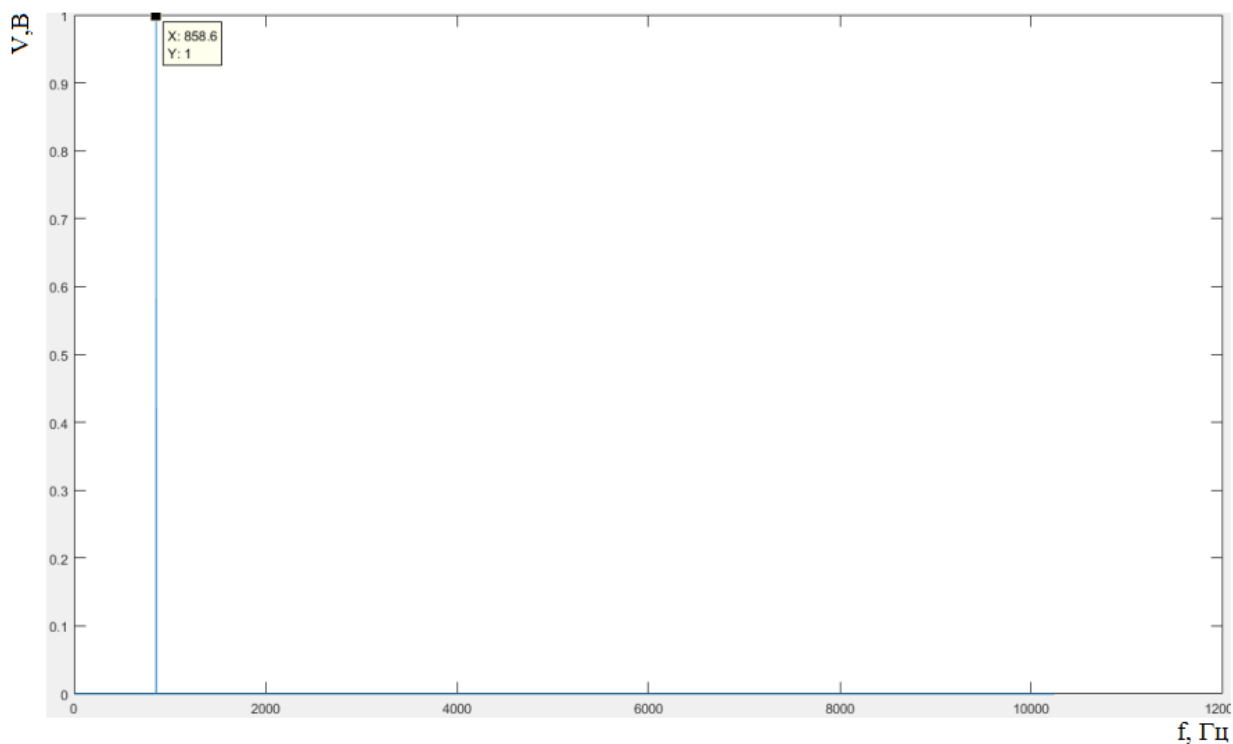


Рисунок 2.11 – Спектр (858,6) расходомера с давлением 0.8 атм. и расходом
1176 кг/ч

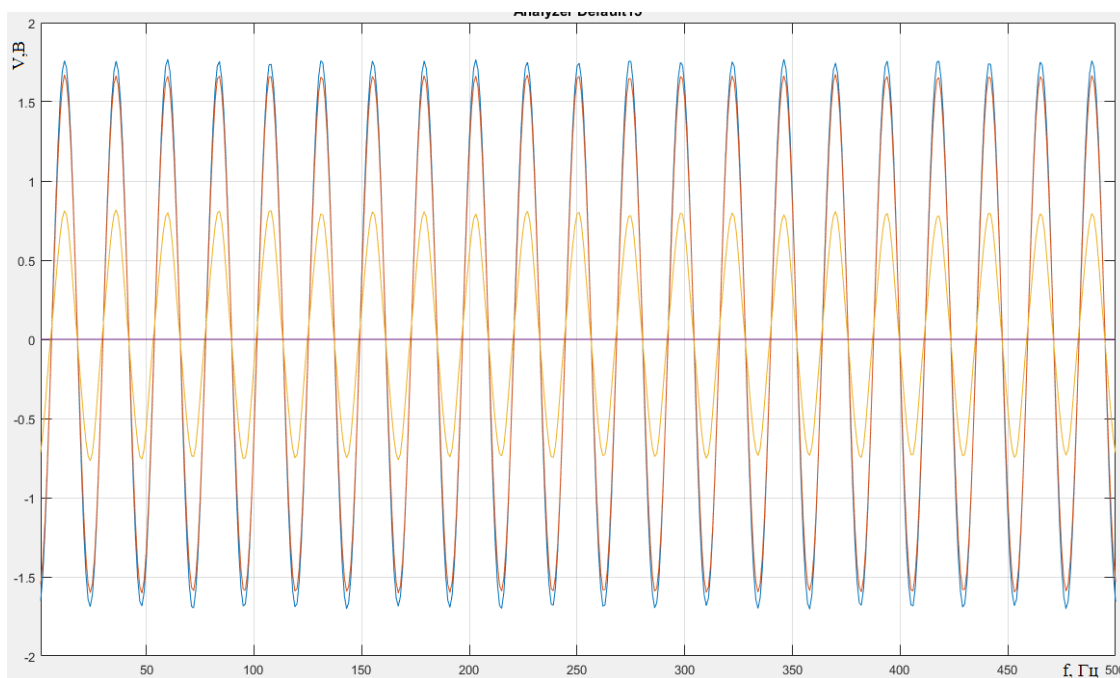


Рисунок 2.12 – Спектр (858,6) расходомера с давлением 0.8 атм. и расходом
1176 кг/ч

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

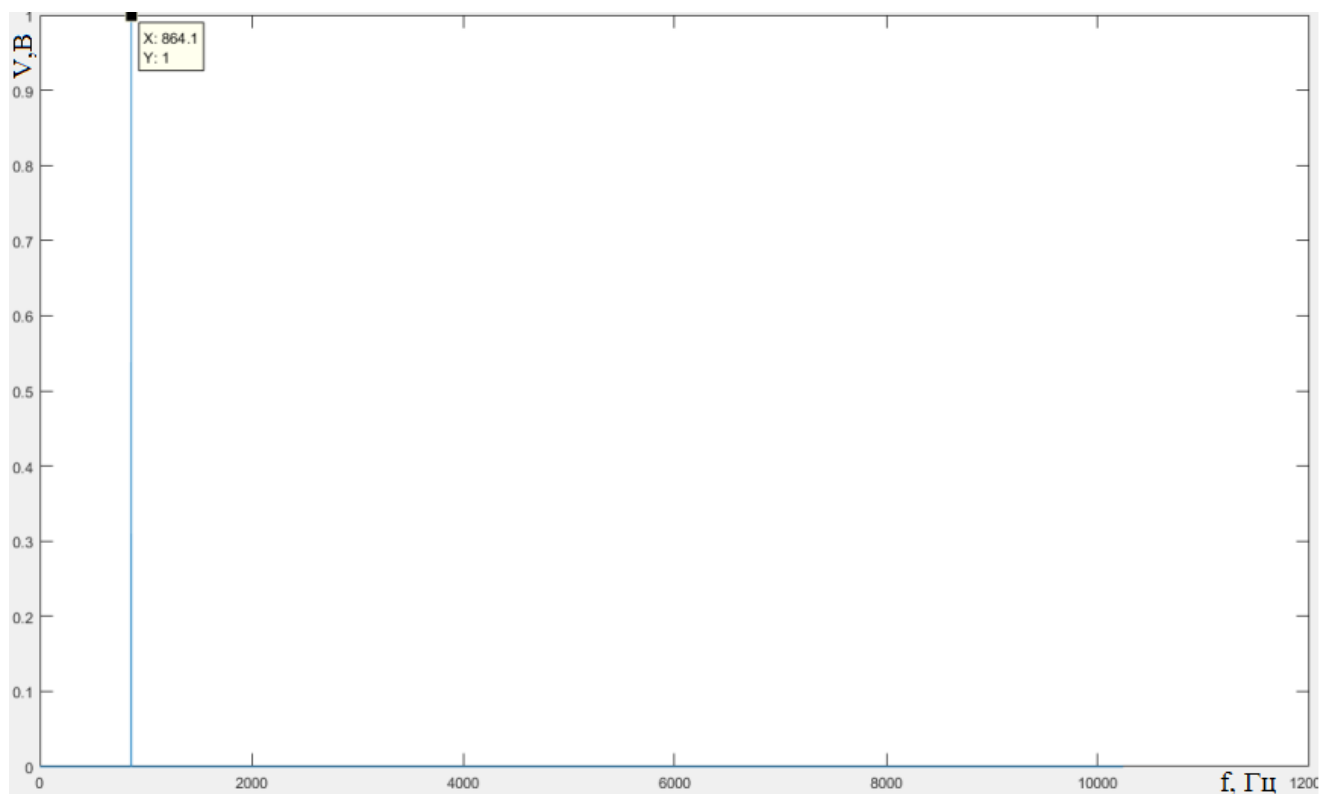


Рисунок 2.13 – Спектр (862,3) расходомера с давлением 1.3 атм. и расходом 2216 кг/ч

У каждого из векторов $Y(i)$ вычиталось среднее значение. Затем к каждой откорректированной реализации применялась операция быстрого преобразования Фурье

$$y(i) = \text{fft}(Y(i), N_{\text{fft}}), \quad (2.4)$$

где fft - процедура быстрого преобразования Фурье в среде Matlab;

$Y(i)$ - откорректированная реализация отклика преобразователя ;

N_{fft} - количество точек для расчета спектра Фурье, как показано выше для заданных параметров осциллографа эта величина составляет 2500 точек.

По полученному вектору y рассчитывалась спектральная плотность мощности P :

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

$$P(i) = \frac{y(i) \cdot y^*(i)}{Nfft}, \quad (2.5)$$

где $y(i)$ - результат быстрого преобразования Фурье временного отклика;
 $y^*(i)$ - комплексно-сопряженная величина.

Деление на количество на величину $Nfft$ в формуле (2.5) обусловлено тем, что быстрое преобразование Фурье фактически представляет собой суммирование сигнала перемноженного на ядро преобразования (комплексную экспоненту) для каждой из частот, т.е. реальный результат будет меньше полученного ровно в количество суммирований.

После этого полученные значения спектральной плотности мощности от каждой реализации суммировались и усреднялись.

2.3 Программа для работы со стендом

Разработка данного приложения осуществлялась в среде MATLAB. Это обусловлено тем, что данный пакет обладает большим набором стандартных инструментов для гибкой обработки массивов данных, в частности спектрального анализа, а также наличием специального адаптированного под пакет драйвера для осциллографа DPO 4034, позволяющего программно управлять им.

После запуска исполняющего m-файла на экране появляется главное окно программы, представленное на рисунке 2.11.

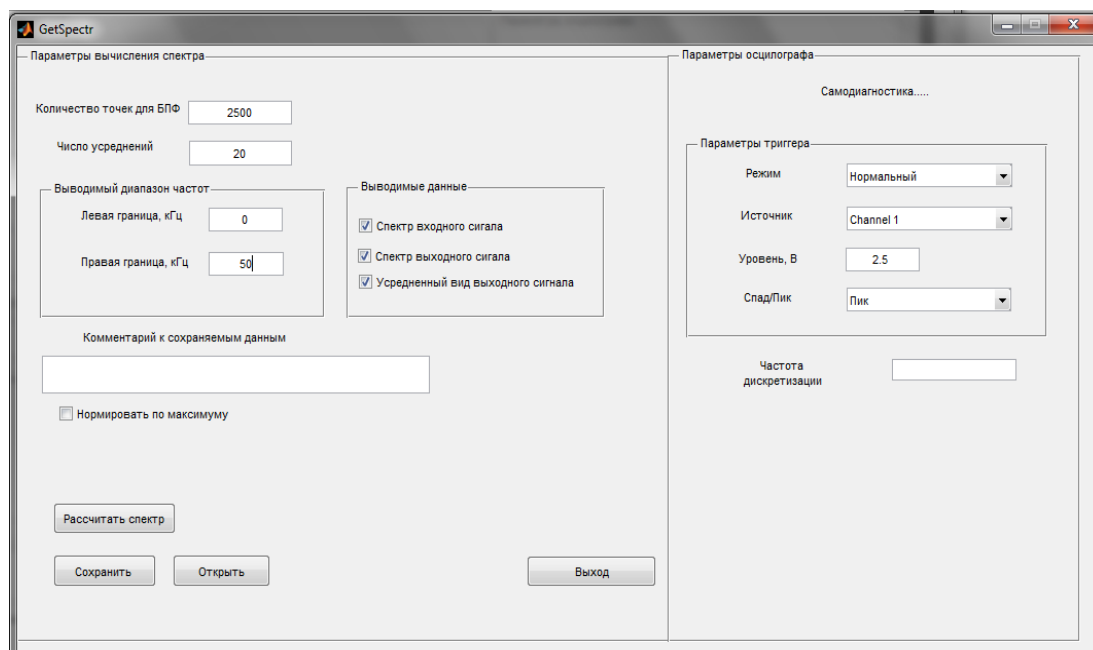


Рисунок 2.14 – Главное окно программы

Сразу после запуска программа автоматически проверяет наличие связи с осциллографом, результат его внутренней самодиагностики и в случае ошибки выдает соответствующее сообщение пользователю. После этого программа считывает параметры, установленные на осциллографе (такие, как параметры запуска триггера, частота дискретизации и т.д.) и выводит их на панель "Параметры осциллографа".

В главном окне пользователем задаются следующие параметры:

Количество точек для быстрого преобразования Фурье. Именно по этому алгоритму осуществляется расчет спектра входного и выходного сигналов;

Количество усреднений. Этот параметр определяет количество реализаций, по которым усредняется спектр выходного сигнала, а также непосредственно сам выходной сигнал во временной области;

Выводимые данные. Здесь выбираются выводимые данные: спектры входного, выходного сигналов и усредненный вид выходного сигнала;

Диапазон частот, в котором выводится спектр выходного сигнала;

Комментарий к сохраняемым данным. В данном поле пользователь может написать комментарий к данной реализации эксперимента (например, время и

дату, внешние условия, номер исследуемого преобразователя и т.д.), если это необходимо. Это описание будет сохранено со всеми остальными данными.

Для получения спектров, после того, как все параметры заданы, пользователю необходимо нажать кнопку "Рассчитать спектр". После нажатия посредством драйвера считывается осциллограмма и методом быстрого преобразования Фурье рассчитываются спектры входного и выходного сигналов, на экран выводятся указанные ранее данные в виде графиков.

Для сохранения полученных данных пользователю нужно нажать кнопку "Сохранить", после чего откроется диалоговое окно, где нужно указать путь и имя сохраняемого файла.

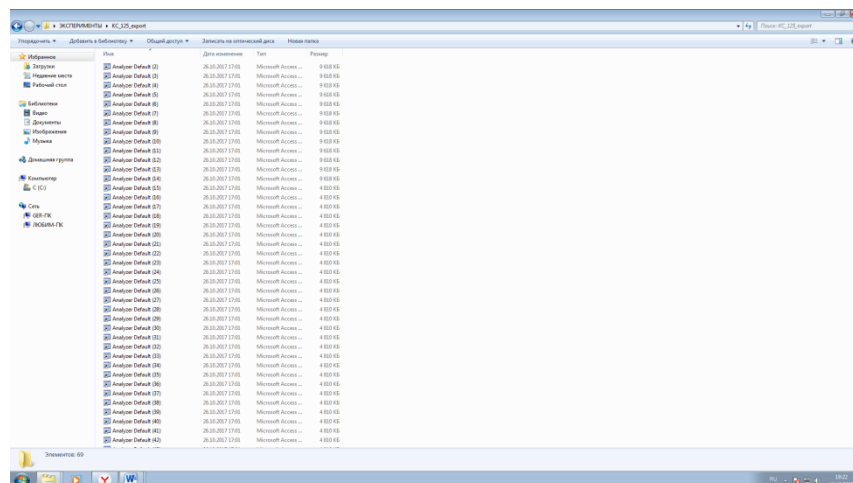


Рисунок 2.15 – Окно сохранения данных

Данные сохраняются в формате .mat (формат Matlab) и содержат в себе следующие массивы данных:

- осциллограмма выходного сигнала;
- параметры для расчета спектра;
- рассчитанный спектр выходного сигнала;
- пользовательский комментарий.

Для работы с ранее полученными данными пользователю необходимо нажать кнопку "Открыть". После этого откроется окно, представленное на рисунке 2.13

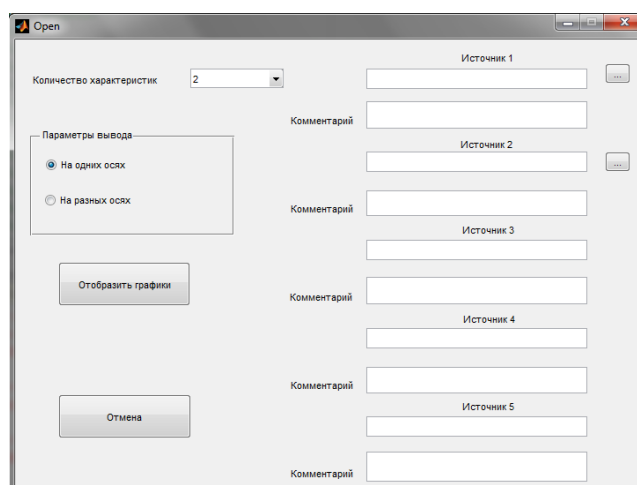


Рисунок 2.16 – Окно открытия сохраненных ранее данных

В данном окне пользователю нужно выбрать в соответствующем выпадающем меню количество характеристик, которые он хочет посмотреть. Далее необходимо указать каждый файл, нажав на кнопку "..." напротив каждого источника. После нажатия этой кнопки выводится диалоговое окно, в котором выбирается нужный файл.

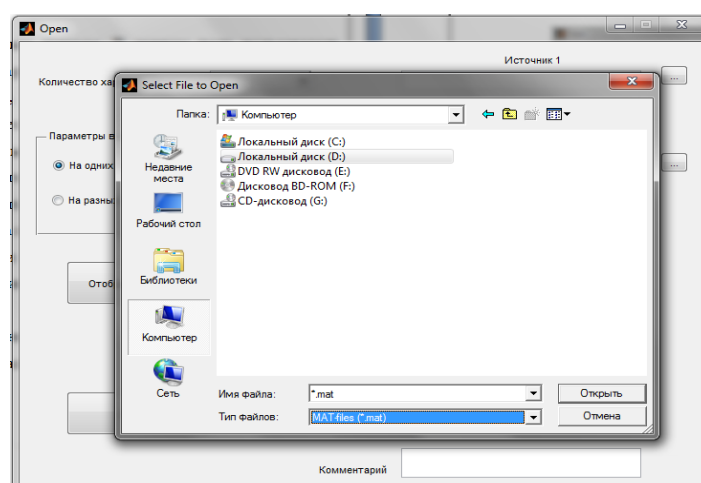


Рисунок 2.17 – Окно выбора файла

После того, как все файлы указаны, пользователь может вывести графики спектров нажав на кнопку "Отобразить графики". При этом предварительно на панели "Параметры вывода" можно указать, выводить данные на одном графике или в отдельных окнах. В первом случае графики будут отображены на одних

осях, в легенде будут указаны имена файлов (рисунок 2.11). Во втором случае каждый график будет выведен в отдельном окне.

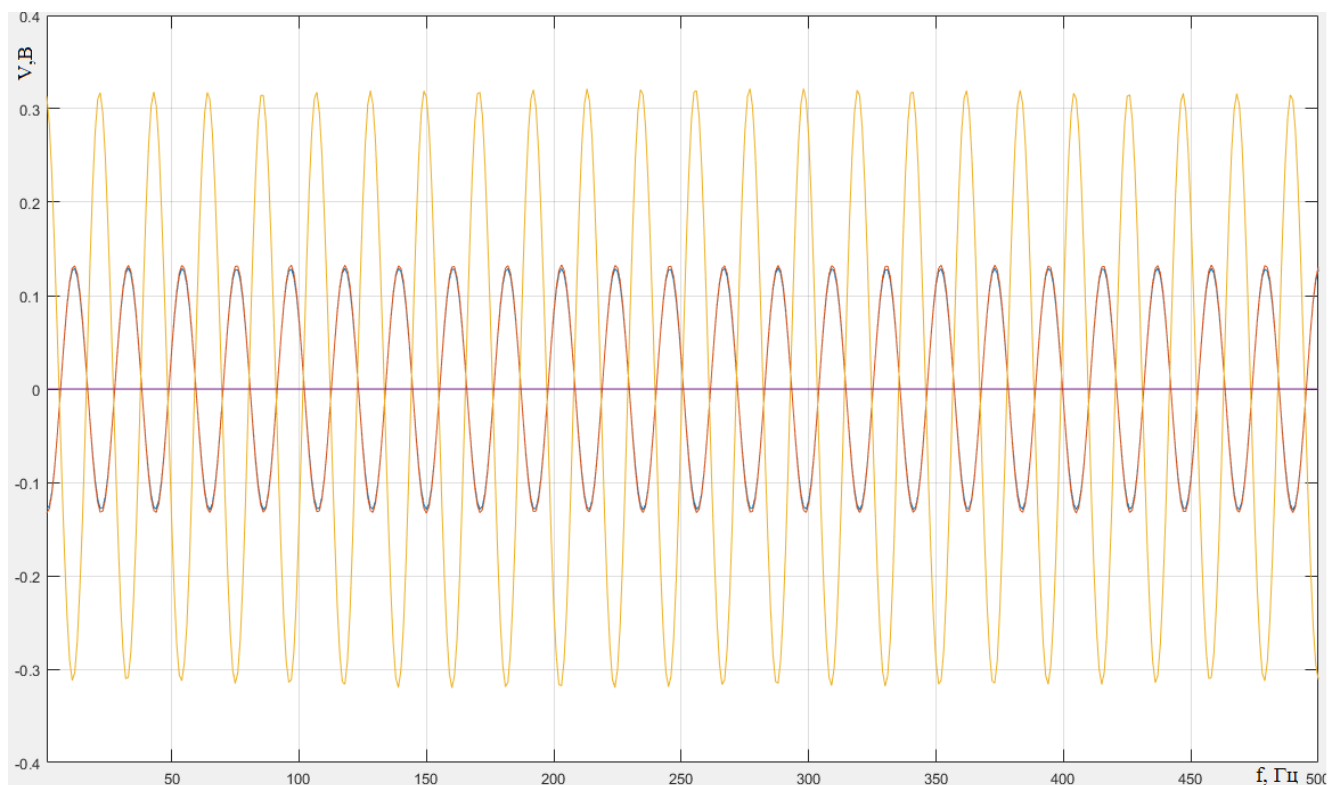


Рисунок 2.18 – спектральная характеристика (862,3) расходомера с давлением 1.3 атм. и расходом 2216 кг/ч

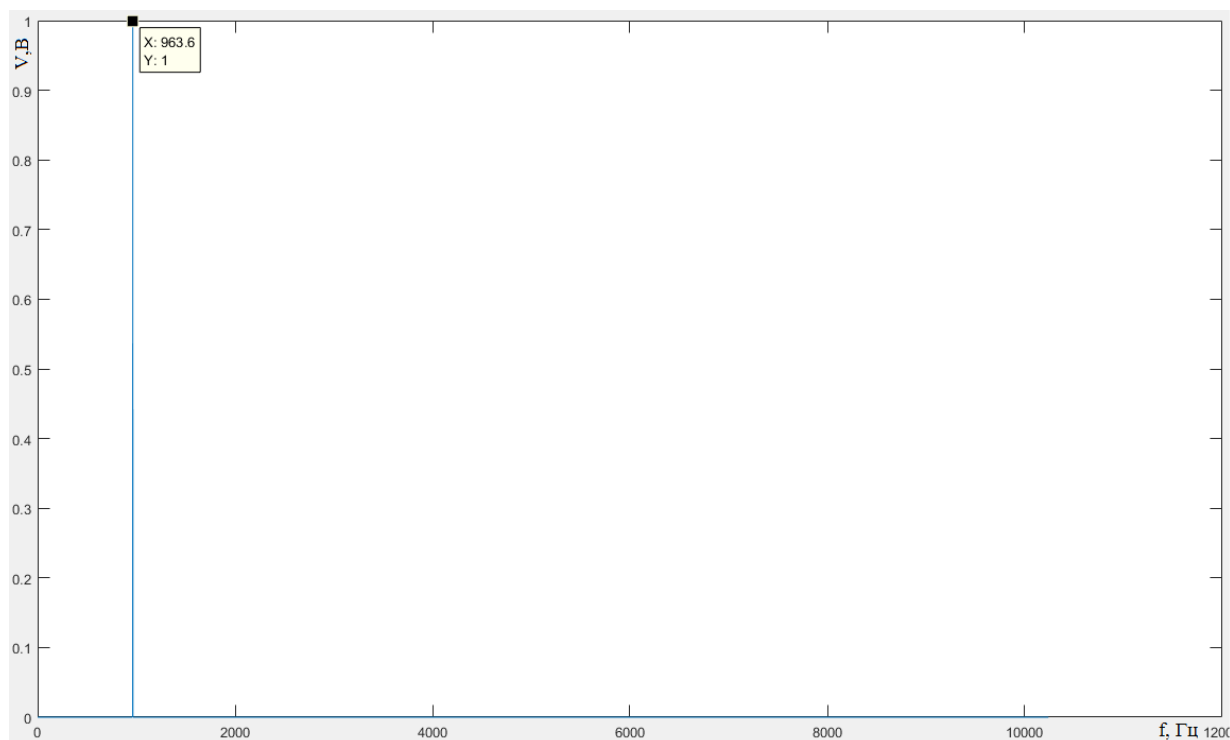


Рисунок 2.19 – Отображение открываемых данных на одних осях

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Далее графики можно обрабатывать, используя стандартные инструменты пакета Matlab.

2.4 Экспериментальные исследования

Цель эксперимента выявление зависимостей характеристик расходомера от изменения комбинаций расположения участков воздействия на расходомер, изменения давления, изменения температуры, изменения процента появления воздуха в жидкости.

Задачи эксперимента:

1. организация экспериментального стенда для измерения расхода;
2. разработка методика обработки сигналов.
3. проведение ряда экспериментальных исследований влияния внешних факторов на частотные характеристики кориолисовых расходомеров;

В данном разделе выпускной квалификационной работы описаны экспериментальные исследования влияния на частотную характеристику кориолисового расходомера внешних факторов и его результаты. Было рассмотрено влияние следующих факторов:

1. влияние закрепления корпуса на электрические характеристики кориолисового расходомера;
2. влияние налипания дополнительной массы на трубках расходомера;
3. влияние засора трубок расходомера вызывающие изменение давления на частотные характеристики кориолисового расходомера;
4. влияние появления пузырьков воздуха в жидкости на характеристики кориолисового расходомера;
5. влияние нагрева температуры на частотные характеристики кориолисового расходомера.

2.4.1 Описание эксперимента с фиксацией корпуса

Первый этап проведения эксперимента позволит оценить влияние фиксации расходомера на его частотные характеристики. Под фиксацией понимается полное закрепление расходомера в измерительной установке, как показано на рисунке 2.16



Рисунок 2.20 – Отображение расходомера в закреплённом состоянии

Второе состояние без закрепления, которое можно обозначить состоянием свободным, изображено на рисунке 2.17:

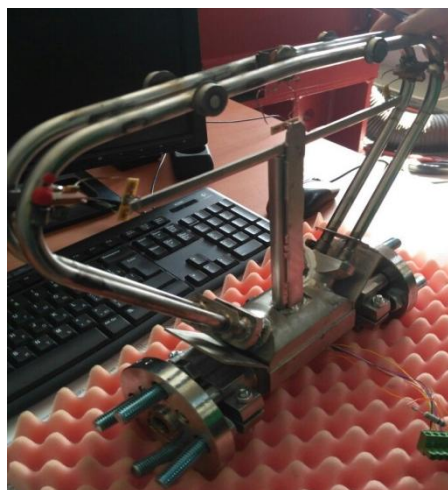


Рисунок 2.21 – Расходомер, находящийся в свободном закреплении

2.4.2 Описание эксперимента с присоединённой массой

Следующим этапом экспериментальных исследований является испытания в закреплённом состоянии. К трубкам расходомера добавляется точечная масса для

изменения баланса, влияющего на смещение нуля. Точки присоединения дополнительной массы изображены на рисунке 2.18:

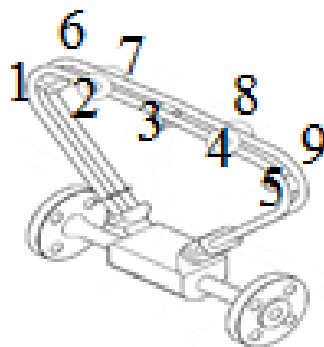


Рисунок 2.22– Точки закрепления пластилина

К трубкам расходомера прикреплялись грузы различной массы:

1. груз массой 0,3 грамма (условно назовем его "большой");
2. груз массой 0,1 грамма (условно назовем его "малый").

В таблице 2.1 и 2.2 приведены средние разности амплитуд частот в состояниях фиксации и с прикреплением дополнительной массы. Эксперимент проводился с тремя расходомерами.

Таблица 2.1 – Результаты измерения кориолисового расходомера с маленькой массой

№ эксперимента	Эксперимент с закреплением		Точки крепления дополнительной массы								
	Не закрепленный	Закрепленный без груза	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Разность фаз, град.										
1	0,03	0,04	0,02	0,019	0,016	0,017	0,115	0,01	0,012	0,018	0,015
2	0,032	0,05	0,09	0,013	0,013	0,014	0,116	0,009	0,013	0,014	0,016
3	0,031	0,04	0,04	0,015	0,015	0,015	0,113	0,006	0,012	0,015	0,012

Таблица 2.2 – Результаты измерения кориолисового расходомера с маленькой массой

№ эксперимент а	Эксперимент с закреплением		Точки крепления дополнительной массы								
	Не закрепленны й	Закрепленный без груза	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Разность фаз, град.										
1	0,03	0,04	0,02	0,019	0,016	0,017	0,115	0,01	0,012	0,018	0,015
2	0,032	0,05	0,09	0,013	0,013	0,014	0,116	0,009	0,013	0,014	0,016
3	0,031	0,04	0,04	0,015	0,015	0,015	0,113	0,006	0,012	0,015	0,012

В таблице 2.3 приведены средние разности амплитуд частот в состояниях фиксации и с прикреплением дополнительной массы с проливом воды. Эксперимент проводился с одним расходомером.

Таблица 2.3 – Результаты измерения кориолисового расходомера с добавлением точечной массы

№ эксперимента	Эксперимент с закреплением		Точки крепления дополнительной массы								
	Не закрепленный	Закрепленный без груза	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Разность фаз, град.										
1	0,04	0,05	1,21	1,217	1,235	1,243	1,243	1,234	0,212	0,018	0,315
2	0,032	0,05	0,09	0,013	0,013	0,014	0,116	0,009	0,013	0,014	0,016
3	0,031	0,04	0,04	0,015	0,015	0,015	0,113	0,006	0,012	0,015	0,012

2.4.3 Описание эксперимента с воздействием давления

В данном подразделе представлены результаты экспериментального исследования спектров выходного сигнала катушек расходомера, на которые подавалось давление, превышающее предельно допустимое значение. Целью

данного исследования является установление изменений в спектрах, которые характеризовали бы данный вид отклонения технологического процесса от нормального режима.

В таблице 2.3 приведены изменения давления с первым расходомером.

Таблица 2.4 – Давления оказывающие влияния на частотные характеристики

Изменение давления, Па	Измерение расхода, кг/с
12,1	0,295
1,3	3,843
0,8	11,301

2.4.4 Описание эксперимента с изменением содержания воздуха в измеряемой жидкости

При измерении расхода жидкости изменяется процент содержания воздуха с 0% до 25%. Записываются частоты катушек, разность фаз. На рисунке 2.19 представлены характеристики измерения.

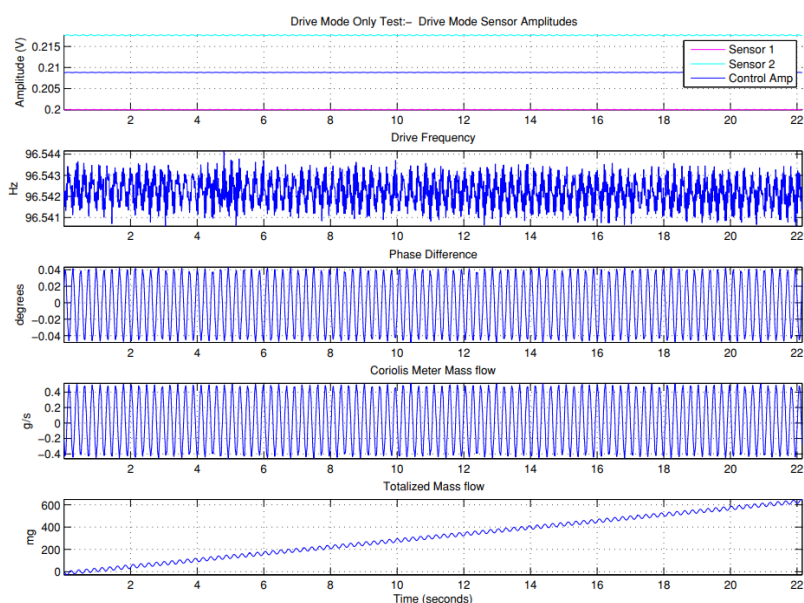


Рисунок 2.23– Измерение параметров расходомера.

На рисунке 2.20 представлены спектры измеренных сигналов.

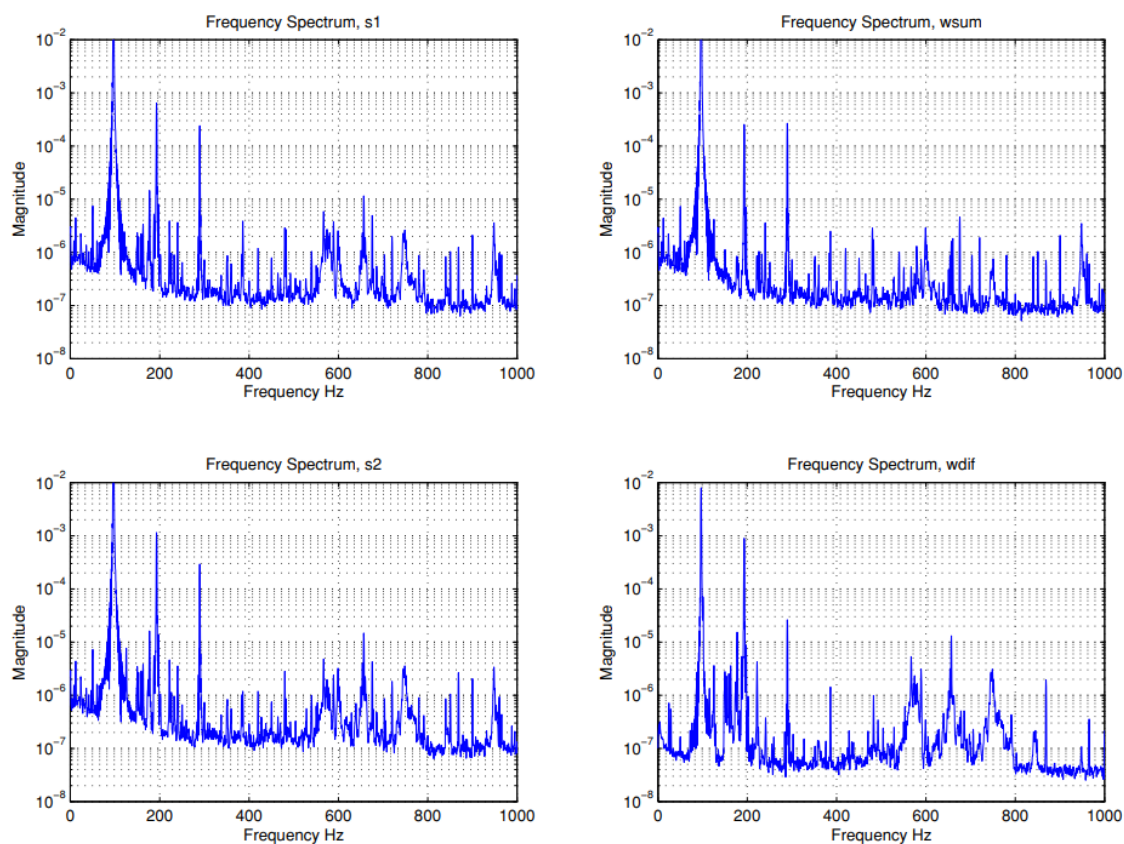


Рисунок 2.24– Спектр параметров расходомера.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСХОДОМЕРОВ

Проведенные экспериментальные исследования позволяют рассмотреть в первом приближении влияние неисправности на частотные характеристики кориолисовых расходомеров. В данном разделе будет рассматриваться влияние неисправностей на частотные характеристики расходомеров. Будет рассмотрено как закрепление, комбинация дополнительной массы, давление влияет на частотные характеристики расходомера.

На рисунке 3.1 показаны первые снятие измерительных данных с катушек расходомеров.

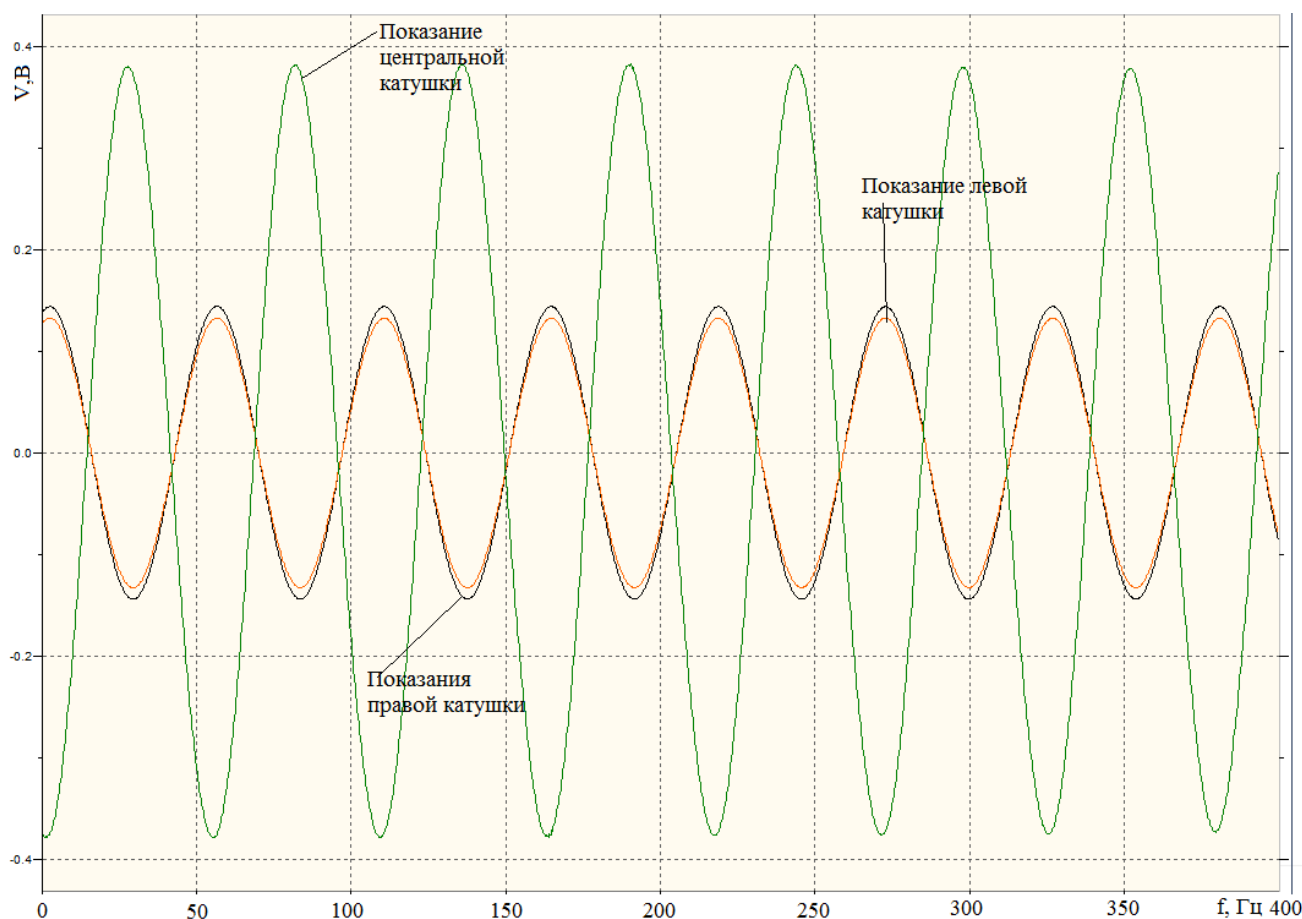


Рисунок 3.1 – Показания центральной, правой, левых катушек в измерительном комплексе LMS

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Обработка измерений проводилась с помощью программного пакета Matlab.

После проведения измерений получены сигналы с катушек для одной из точек изображенной на рисунке 3.2.

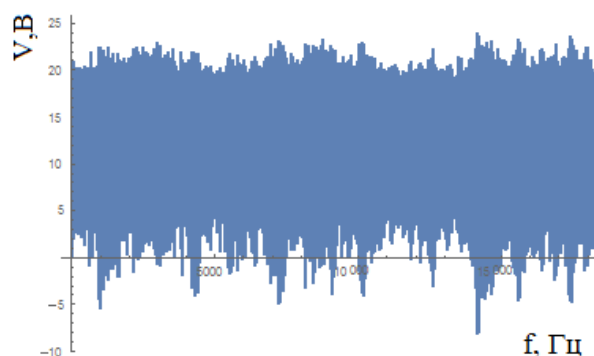


Рисунок 3.2 – Напряжение с катушек с давлением 0.8 атм. и расходом 1176 кг/ч

Обработка измерений проводилась с помощью программного пакета Matlab.

После начала генерации импульсов с осциллографа на компьютер записывались временные отклики преобразователя. Затем к каждой реализации применялась операция быстрого преобразования Фурье.

Спектры выходного сигнала рассчитывались в диапазоне от 0 до 50 кГц. Результирующее разрешение по частоте - 200 Гц.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

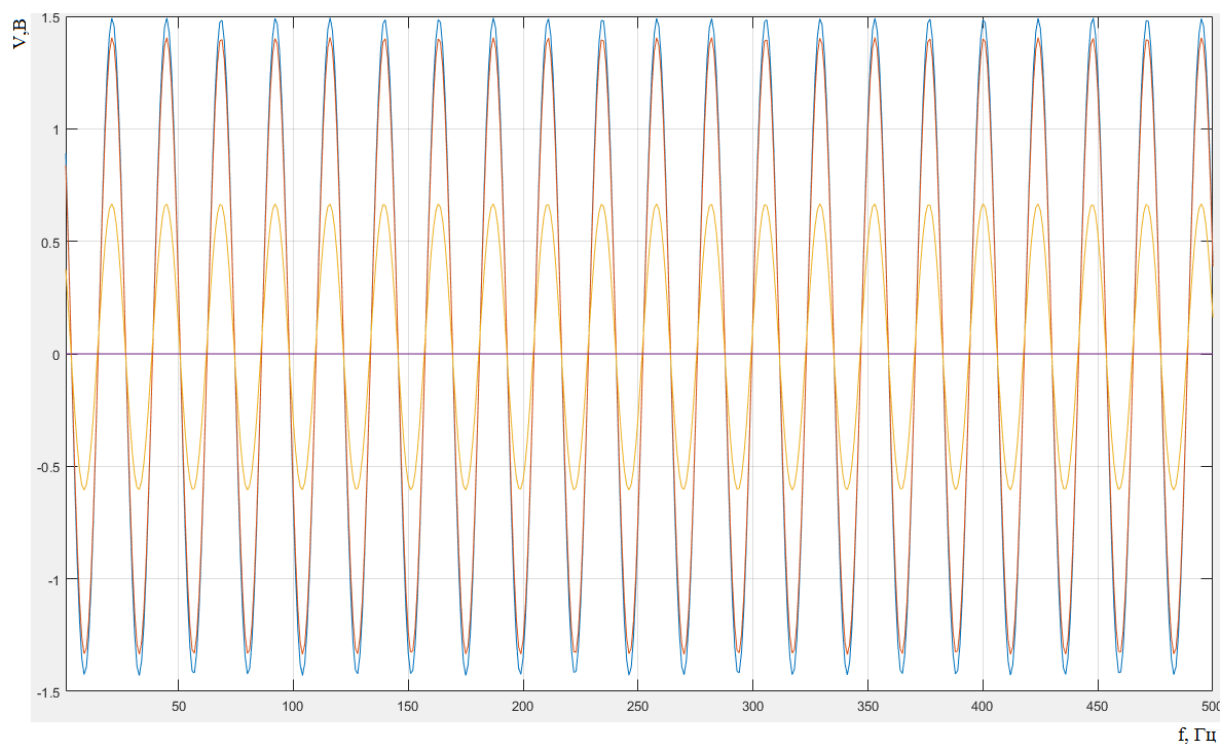


Рисунок 3.3 – Напряжение с катушек расходомера с давлением 0.8 атм. и расходом 1176 кг/ч

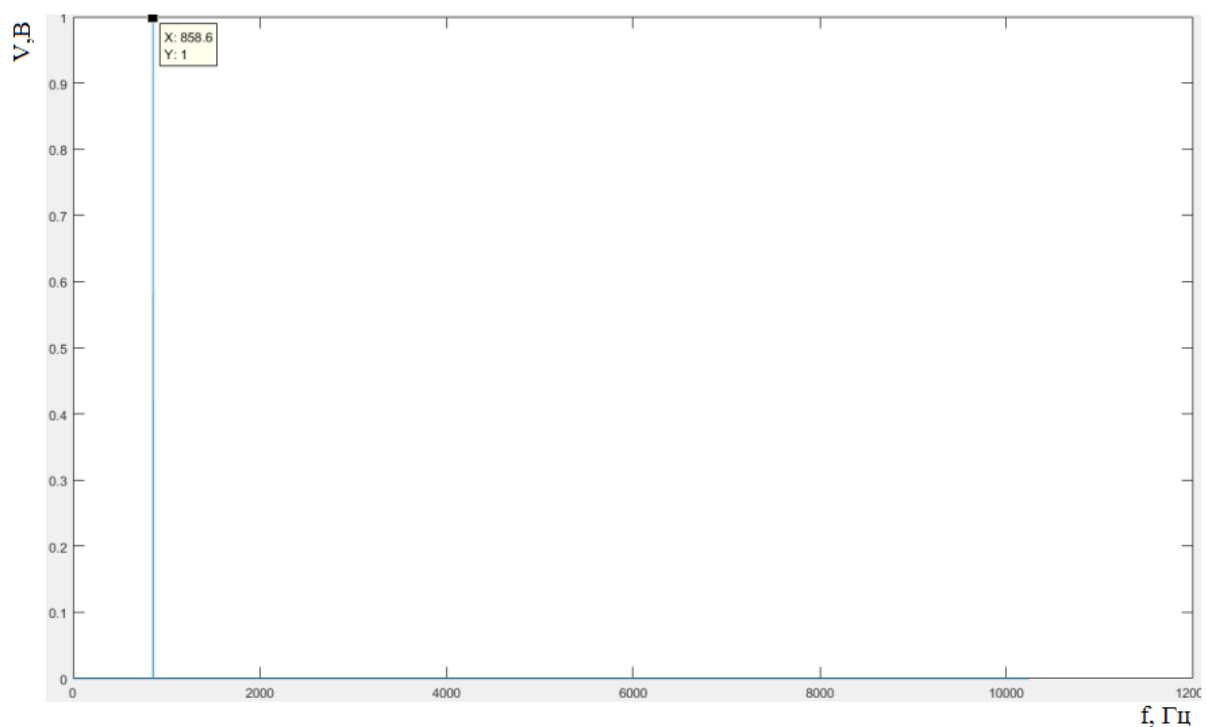


Рисунок 3.4 –Спектральные характеристики (858,6) расходомера с давлением 0.8 атм. и расходом 1176 кг/ч

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

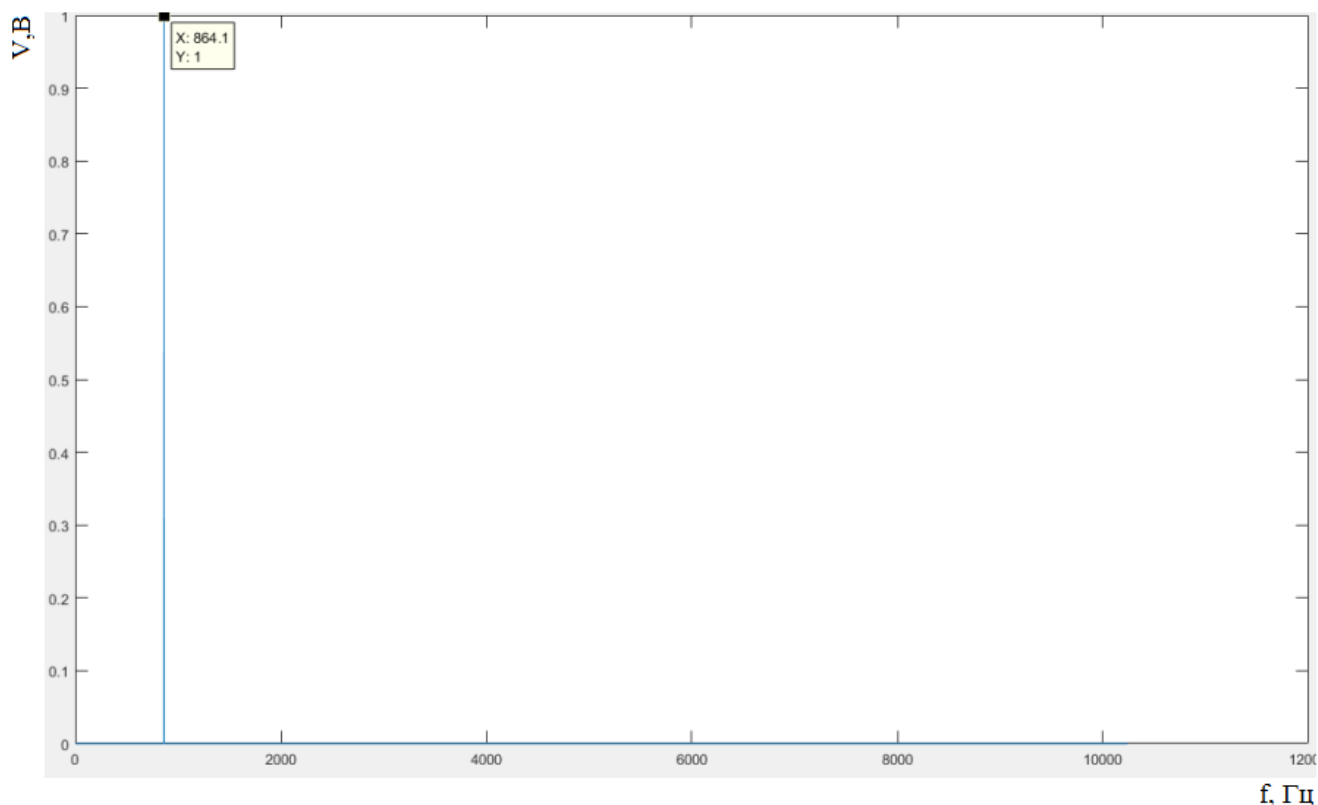


Рисунок 3.45 – Напряжение с катушек и спектр (862,3) расходомера с давлением 1.3 атм. и расходом 2216 кг/ч

3.1 Результаты эксперимента с фиксацией корпуса кориолисового расходомера

Первый этап проведения экспериментальных исследований было рассмотрение влияния закрепления расходомера на его частотные характеристики. Первые измерения расходомера проводились без фиксации условно обозначенное как свободное состояние и с фиксации, что также условно обозначилось как закрепленное состояние. В таблице 3.1 приведены результаты эксперимента с тремя расходомерами в свободном и закрепленном состоянии. На рисунке 3.5 приведён график разности фаз в разных состояниях фиксации, где разности фаз свободного закрепления существенно выше, чем в закрепленном состоянии. На рисунке видно как закрепление влияет на частотные

характеристики и оказывает существенное изменение относительно свободного состояния до 78% .

Таблица 3.1 – Результаты измерения кориолисового расходомера с маленькой массой с проливом

Расходомер	Свободное		Закрепленное	
	Разность фаз, мкс	СКО	Разность фаз, мкс	СКО
1	4,68	0,273	1,133	0,719
2	6,823	0,85	1,647	0,718
3	6,233	0,363	1,135	0,723

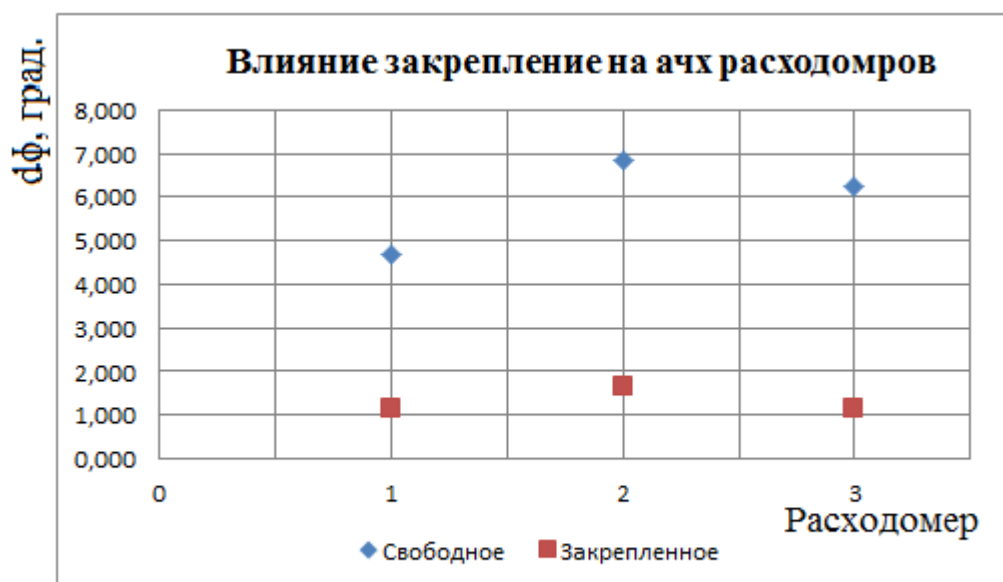


Рисунок 3.6 – Точки закрепления пластилина

Так как расход на прямо пропорционален разности фаз то можно сделать вывод, что в свободном закреплении трубки более подвижны и это приводит к показаниям расхода, поэтому, что бы уменьшить это влияние расходомер плотно фиксируется.

3.2 Результаты эксперимента с присоединённой дополнительной массой к трубкам расходомера во время пролития в нем воды

Важнейшим этапом исследования является оценка влияния прикрепления дополнительной массы на трубках расходомера.

К трубкам расходомеров прикрепляется дополнительная масса как показано на рисунке 3.6, где цифрами обозначены точки крепления.

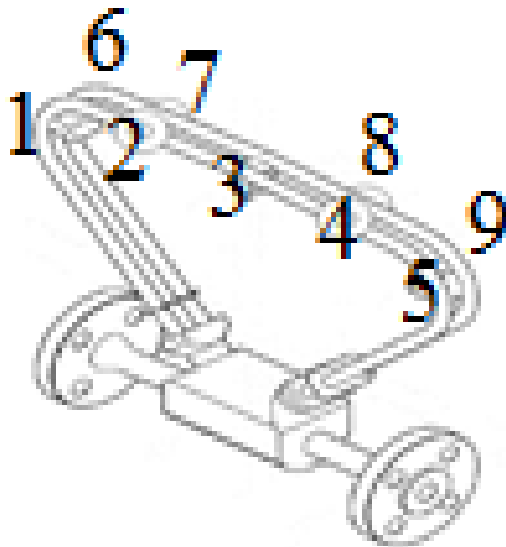


Рисунок 3.7 – Точки закрепления пластилина

В таблице 3.2 приведены результаты влияния изменения размеров дополнительной массы в расходомере с проливом воды.

Таблица 3.2 – Результаты измерения кориолисового расходомера во время пролития воды

Точки	Частоты, Гц		Отношения амплитуд	
	Большой	Маленький	левая	правая
1	86,05	86,28	0,946	0,940
2	85,86	86,24	0,945	0,940
3	85,84	86,23	0,940	0,939
4	85,84	86,21	0,934	0,938

Продолжение таблицы 3.2

5	86,00	86,23	0,933	0,938
6	85,97	86,21	0,947	0,940
7	85,81	86,18	0,945	0,940
8	85,82	86,16	0,935	0,939
9	85,98	86,17	0,934	0,939

На рисунке 3.7 показан график, на котором видно влияние изменения дополнительной массы при проливе воды. Максимальное влияние масса оказывает до 5% на частотные характеристики расходомера.

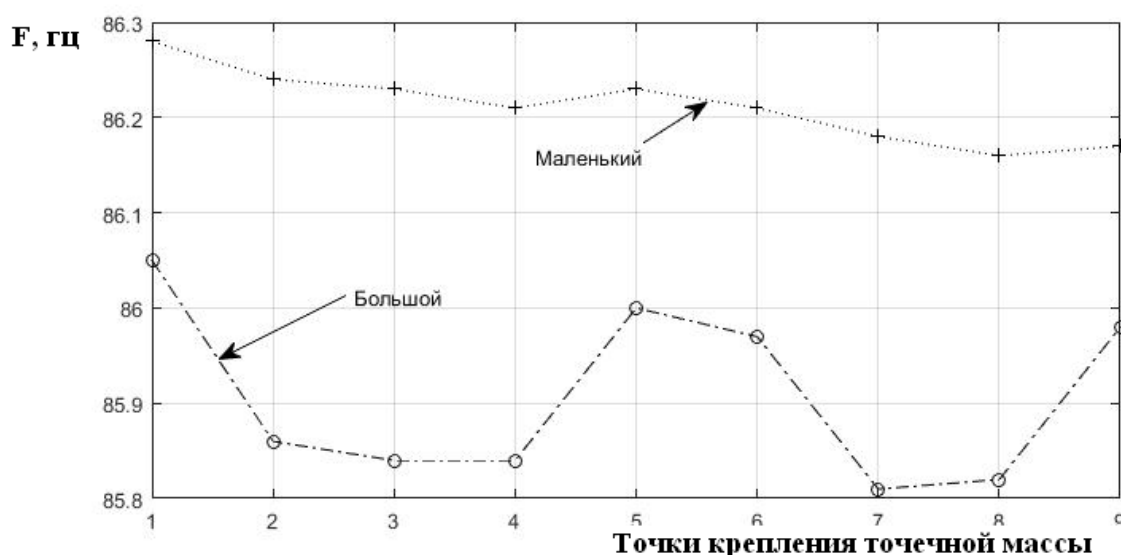


Рисунок 3.8– График влияния присоединения дополнительной массы на частоту при проливе воды

Влияние изменения массы достигает до 0,4%, построим график влияния изменения дополнительной массы на частотные характеристики.

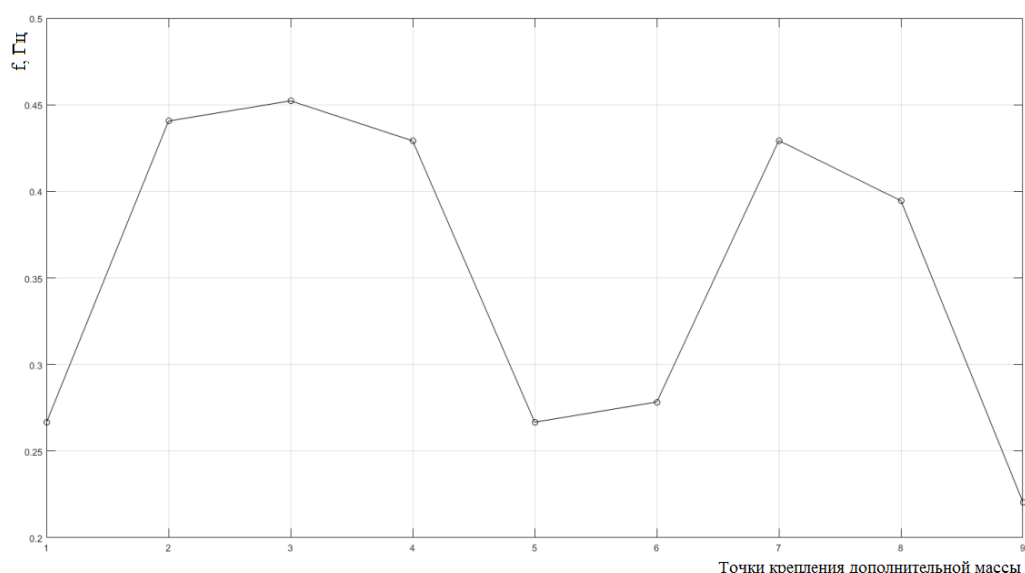


Рисунок 3.9– График влияния присоединения дополнительной массы на частоту без пролива воды в расходомере

Наибольшее влияние на изменение частоты оказывает участки, находящиеся на катушках. Влияние изменения массы достигает до 0,4%.

На рисунке 3.8 показано отношения амплитуд при изменении размера массы дополнительного груза. Максимальная разница достигает в 6 точке и составляет 7 %.

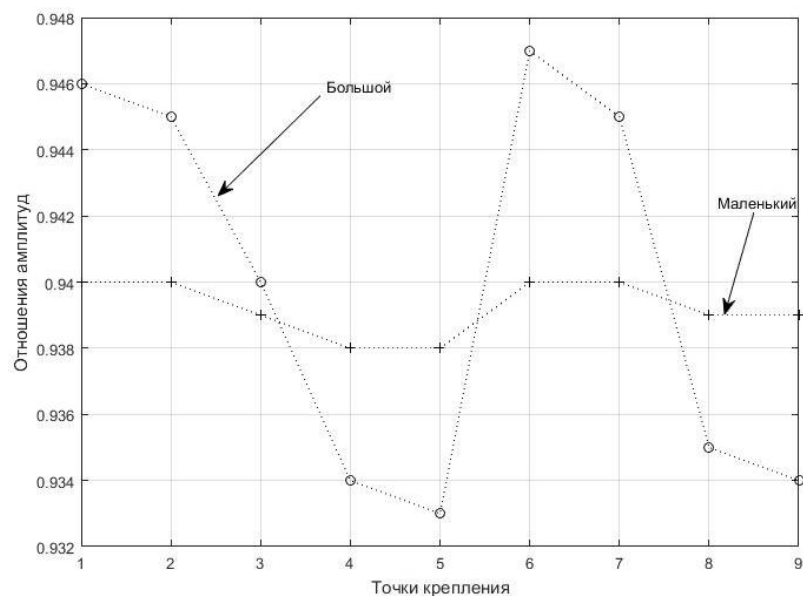


Рисунок 3.8 – Влияние изменения отношений амплитуд к изменениям веса пластилина

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Далее сравним частоты катушек расположенных на трубках с прикрепленной дополнительной массой и частоты, на трубках которых не будет, закрепляется дополнительная масса. Данным анализом можно будет оценить влияние налипания дополнительной массы на трубках расходомера в целом, как неисправность.

В таблицах 3.3 и 3.4 приведены частоты и разности амплитуд в точках с прикреплением дополнительной массы между левой и правой трубки кориолисового расходомера с маленьким и большим грузом соответственно во время пролива. К первой трубке прикреплена дополнительная масса, а ко второй нет.

Таблица 3.3 – Результаты измерения при добавлении точечной массы к правой трубке расходомера

Точки	Частота, Гц		Разности амплитуд	
	Первая	Вторая	Первая	Вторая
1	86,28	86,21	0,940	0,940
2	86,24	86,18	0,940	0,940
3	86,23	86,17	0,939	0,939
4	86,21	86,16	0,938	0,939
5	86,23	86,17	0,938	0,939

Таблица 3.3 – Результаты измерения при добавлении при добавлении точечной массы к левой трубке расходомера

Большой пластилин				
Точки	Частоты		Разности амплитуд	
	Левая	Правая	Левая	Правая
1	86,05	85,97	0,946	0,947
2	85,86	85,81	0,945	0,945
3	85,84	85,84	0,940	0,940
4	85,84	85,82	0,934	0,935
5	86,00	85,98	0,933	0,934

На рисунке 3.9 представлены влияния дополнительной массы на трубки. Коэффициент корреляции между частотами катушек равен 0,99.

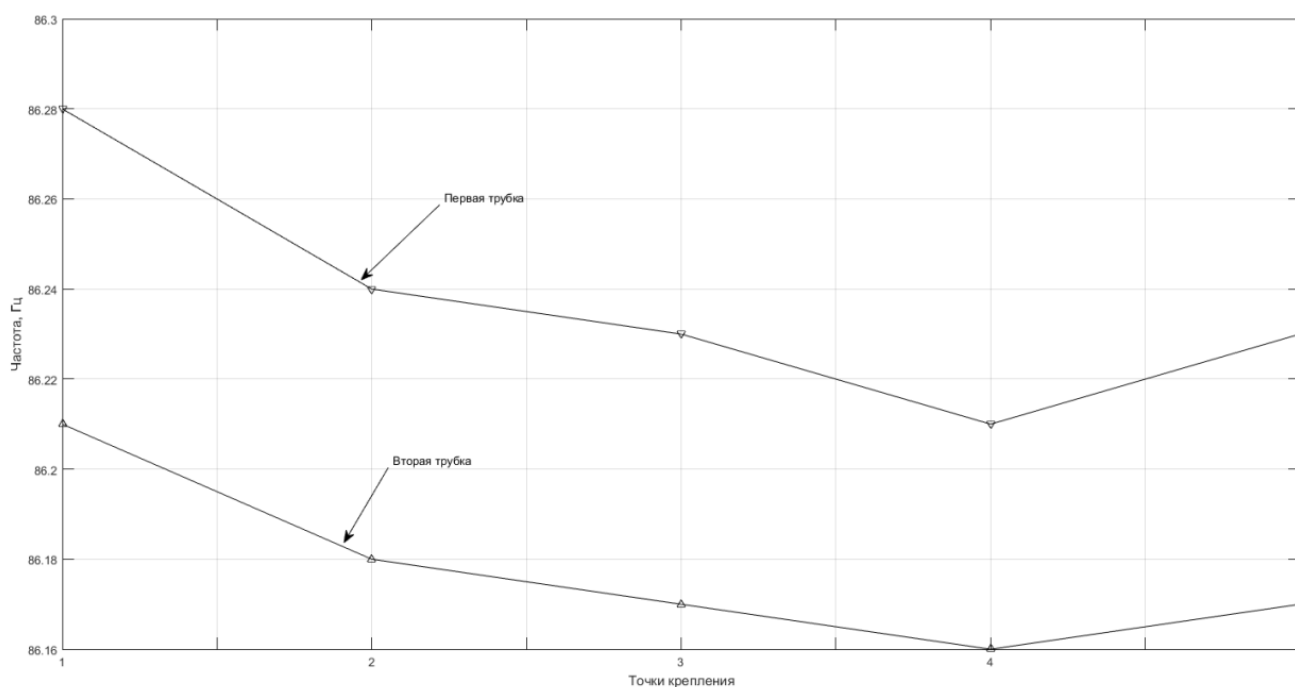


Рисунок 3.10 – Влияние изменения амплитуды на разных трубках расходомера с маленьким пластилином

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Частоты левой трубки значительно выше частот правой трубки, поэтому построим график отношений частот между правой и левой трубки представленной на рисунке 3.10

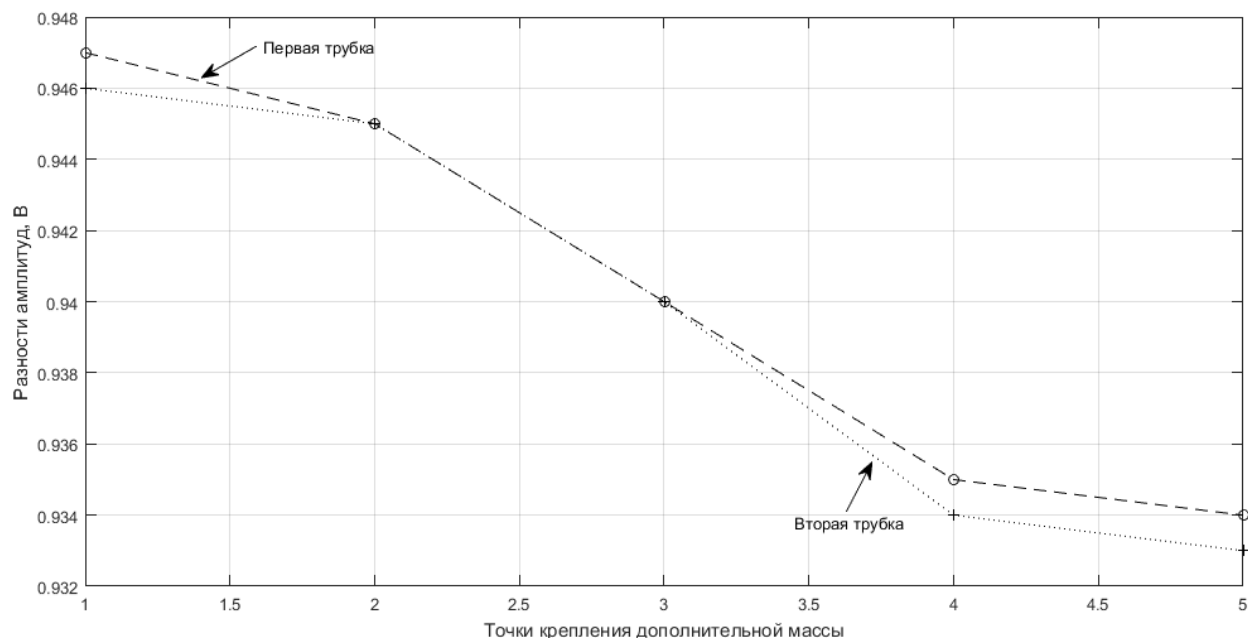


Рисунок 3.11– Влияние изменения отношения амплитуд на разных трубках расходомера маленьким пластилином

Для оценки влияния построим диаграмму изображенной на рисунке 3.11.

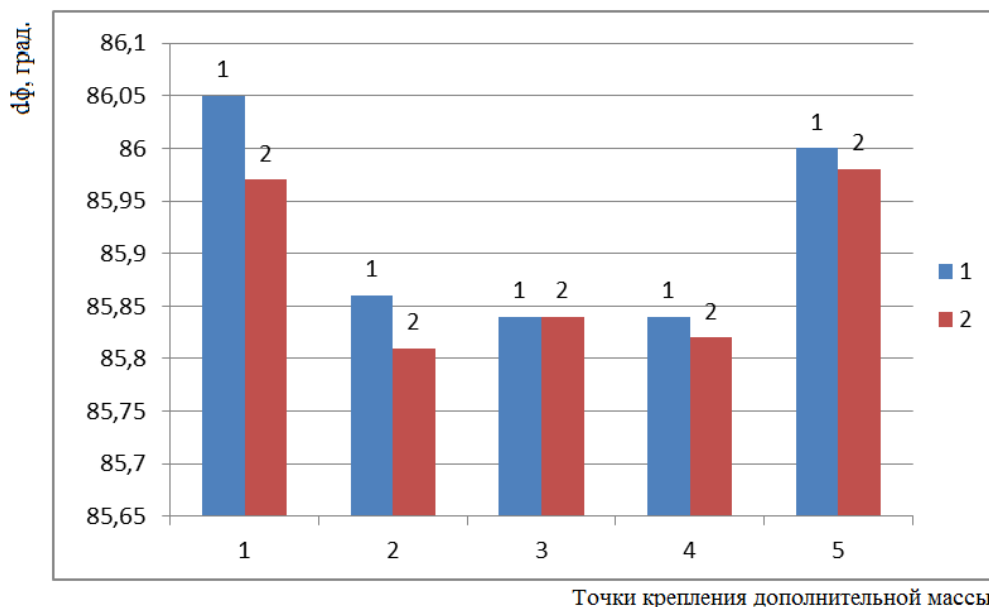


Рисунок 3.12 – Влияние прикрепления дополнительной массы к трубкам расходомера

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

На точках крепления с катушками прослеживается наиболее изменение частот.

На рисунках 3.11 и 3.12 Изображены аналогичные графики с большим грузом где так же замечается взаимосвязь между частотам на правых и левых трубках.

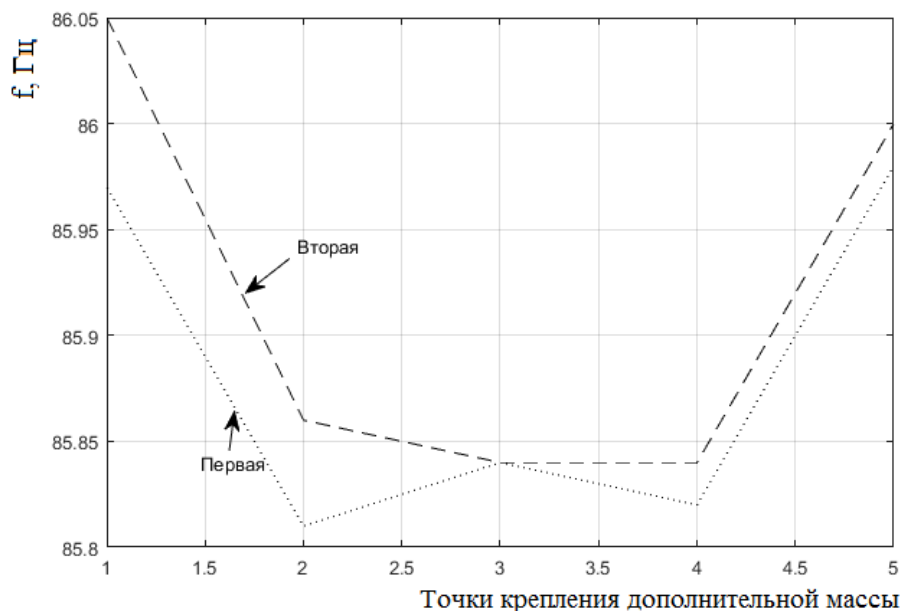


Рисунок 3.11 – Влияние изменения амплитуды на разных трубках расходомера с большим грузом во время пролива

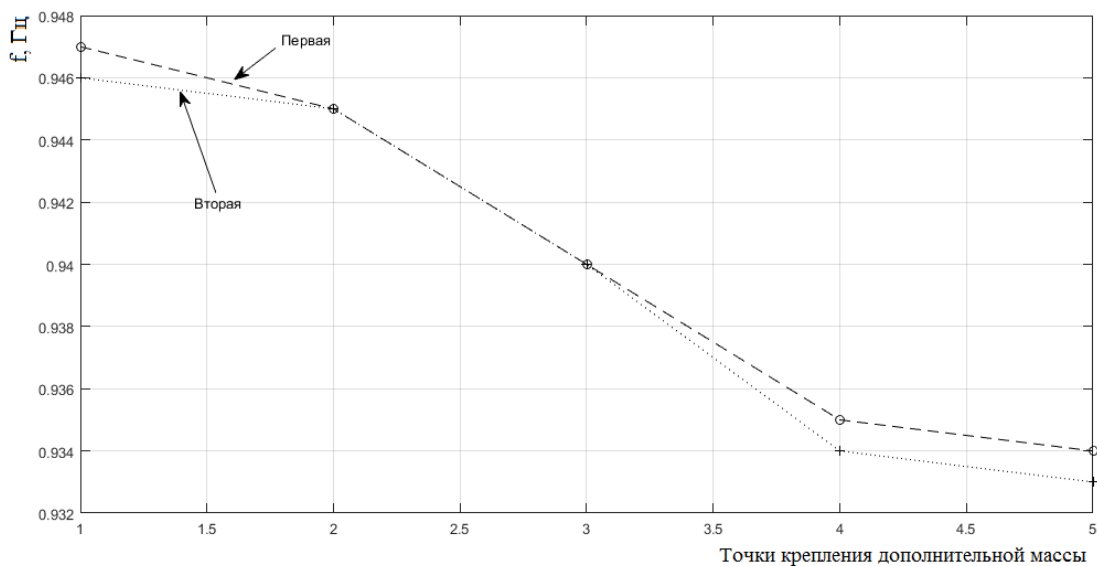


Рисунок 3.13 – Влияние изменения отношения амплитуд на разных трубках расходомера большим грузом во время пролива

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Результаты проведения эксперимента с прикреплением дополнительной массой во время пролива позволил говорить о влиянии изменения массы дополнительного груза на амплитудно частотные характеристики. Изменение массы дополнительного груза с маленькой на большую приводит к изменению частотных показателей на 5 %. Сравнение результатов влияния дополнительной массы между правой и левой трубкой не показал изменения, так как коэффициент корреляции достигал единицы.

3.3 Результаты эксперимента с присоединённой дополнительной массой к трубкам расходомера без пролития воды

В данном подразделе описывается исследование влияния дополнительной массы на амплитудно частотные характеристики катушек в точках закрепления, которые изображены на рисунке 3.2 с расходомером в закреплённом состоянии без пролива воды. В данном случае расходомер закреплён на установку и к его обозначенным точкам от 1 до 9 прикрепляется дополнительная масса, в двух вариациях как большая и как маленькая. В таблице 3.4 приведены результаты амплитудно частотных характеристик в каждой точке крепления расходомера и их отношение амплитуд.

Таблица 3.4 – Результаты измерения кориолисового расходомера в закреплённом состоянии

Точки	Амплитуда		Отношение амплитуд	
	Большой	Маленький	Большой	Маленький
1	92,50	92,51	0,918	0,940
2	92,40	92,37	0,920	0,947
3	92,40	92,23	0,923	0,945
4	92,50	92,18	0,924	0,940
5	92,50	92,28	0,924	0,935
6	92,40	92,37	0,923	0,934

Продолжение таблицы 3.4

7	92,60	92,24	0,921	0,936
8	92,60	92,23	0,921	0,944
9	92,60	92,18	0,921	0,940

На рисунке 3.13 и 3.14 приведены графики амплитуды и отношения амплитуд между частотами при изменении двух дополнительных масс.

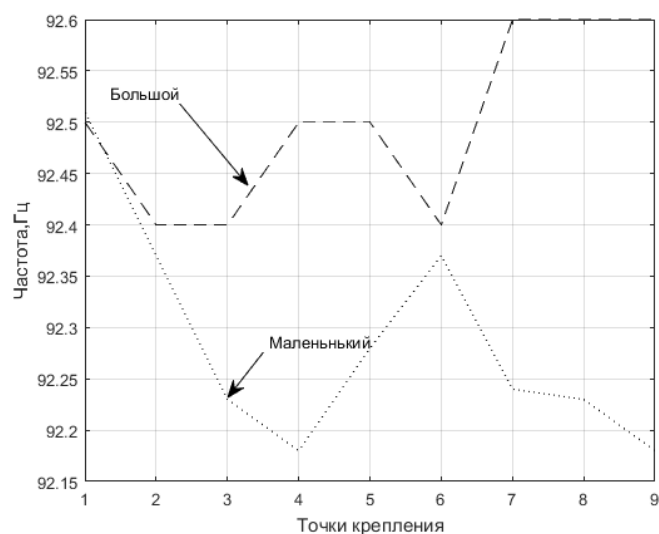


Рисунок 3.14 – Влияние изменения амплитуд при изменении массы пластилина

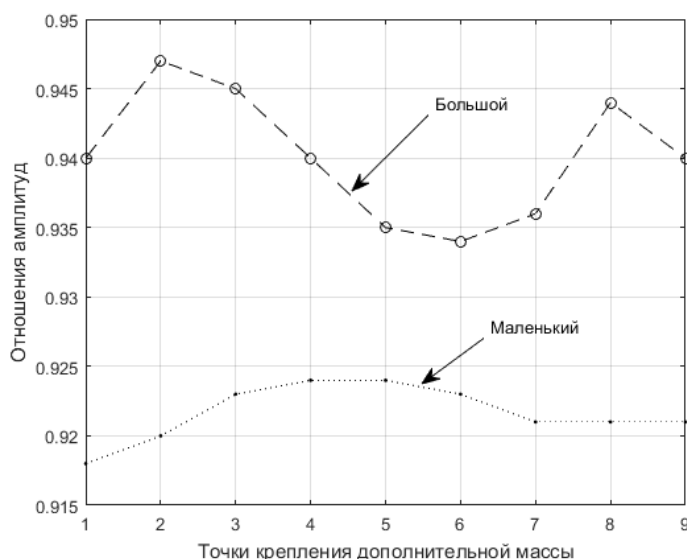


Рисунок 3.15 – Влияние изменения отношения амплитуд на разных трубках расходомера в закрепленном состоянии при изменении массы пластилина

Из графика видно как большой пластилин изменяет частотные характеристики катушек. Максимальное изменение достигает 60%.

В таблице 3.11 приведены результаты измерения частот правой и левой трубок с маленькой массой.

Таблица 3.11 – Результаты измерения кориолисового расходомера в закрепленном состоянии правой и левой трубки с маленьким пластилином.

Точки	Амплитуды, Гц		Отношение амплитуд	
	Левая	Правая	Левая	Правая
1	92,51	92,37	0,940	0,934
2	92,37	92,24	0,947	0,936
3	92,35	92,23	0,945	0,945
4	92,36	92,23	0,940	0,944
5	92,28	92,18	0,935	0,940

На рисунке 3.14 изображены отношения амплитуд точек присоединения дополнительной массы между правой и левой катушкой.

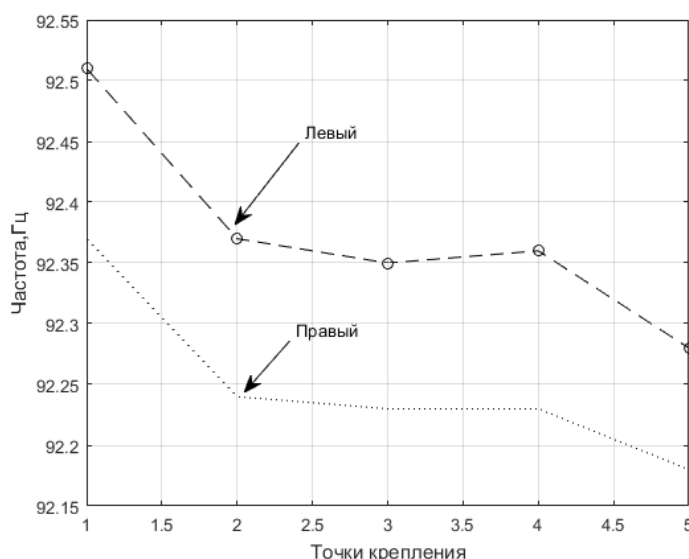


Рисунок 3.16– Влияние изменения отношения амплитуд на разных точках трубок расходомера в закрепленном состоянии при изменении массы маленького пластилина

Коэффициент корреляции между частотами в точках крепления дополнительной массы равен 0,97. В таблице 3.12 приведены результаты измерения частот правой и левой трубок с большой массой.

Таблица 3.12 – Результаты измерения кориолисового расходомера в закрепленном состоянии правой и левой трубки с большим пластилином

Точки	Амплитуды, Гц		Отношение амплитуд	
	Левая	Правая	Левая	Правая
1	92,50	92,40	92,50	0,918
2	92,40	92,60	92,40	0,920
3	92,40	92,40	92,40	92,40
4	92,50	92,60	92,50	92,50
5	92,50	92,60	92,50	92,50

На рисунке 3.16 изображено отношения амплитуд между точками крепления дополнительной массы между двумя трубками с большим пластилином

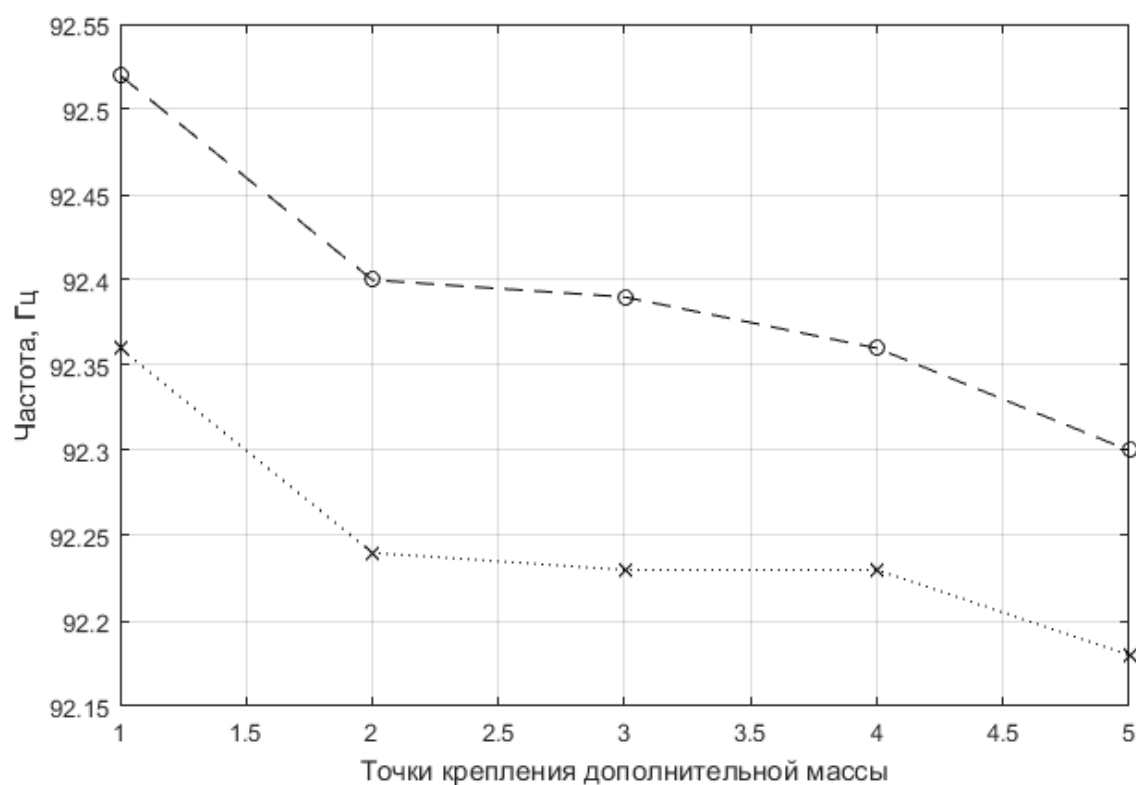


Рисунок 3.17 – Влияние изменения амплитуд на разных трубках расходомера в закрепленном состоянии с большим пластилином

Коэффициент корреляции между частотами в точках крепления дополнительной массы равен 0,97.

3.4 Оценка влияния факторов на частотные параметры кориолисового расходомера

На рисунке 3.17 приведены результаты отношений частот правой и левой катушек для измерения с потоком, с закреплением и свободном состоянии.

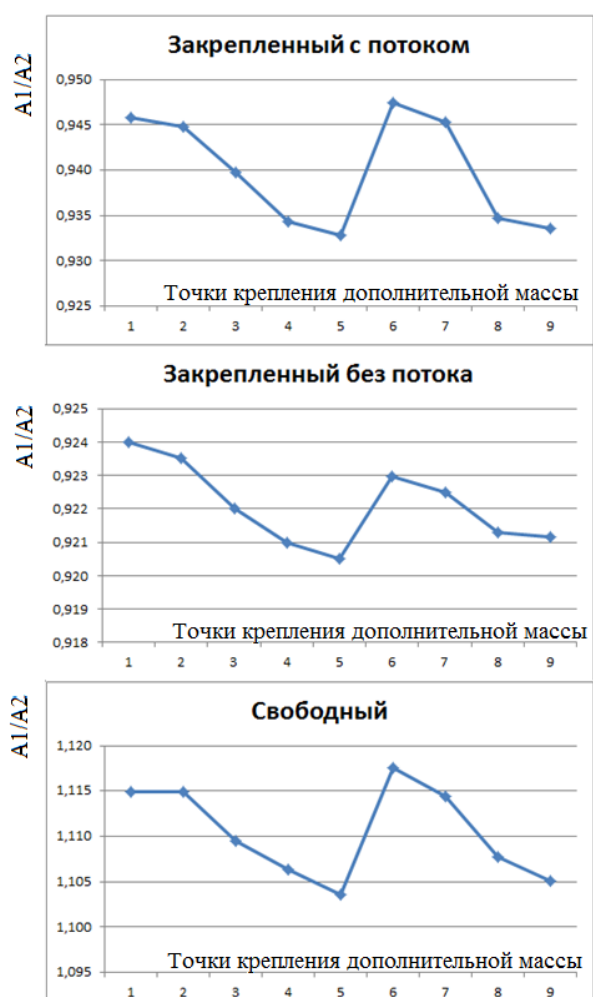


Рисунок 3.18 – Влияние изменения амплитуд на разных трубках расходомера с потоком, закрепленном состоянии и свободном с большим пластилином

На рисунке 3.17 видно как прослеживается взаимосвязь между тремя видами экспериментов. Таким образом, можно сделать вывод что Особенности закрепления груза оказывает влияние на электрические характеристики контрольного канала передачи информации, что подтверждается возникновением, изменения разности фаз. Это позволяет говорить о контроле состояния расходомера путем отслеживания изменения параметров передаточной функции, что может свидетельствовать о тех или иных неисправностях в расходомере.

Таким образом, цикл исследований подтвердил возможность контроля текущего состояния, разработанная передаточная функция позволяет говорить об обеспечении контроля технического состояния путем отслеживания изменения её ключевых параметров.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

4 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ВОЗДУХА В ЖИДКОСТИ НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРИОЛИСОВОГО РАСХОДОМЕРА

Проведенные экспериментальные исследования позволяют рассмотреть в первом приближении влияние неисправности на частотные характеристики кориолисовых расходомеров. В данном разделе будет рассматриваться влияние неисправностей на частотные характеристики расходомеров. Будет рассмотрено влияние изменения расхода и газовой фракции на частотные характеристики кориолисового расходомера.

После начала генерации импульсов с осциллографа на компьютер записывались временные отклики преобразователя. Затем к каждой реализации применялась операция быстрого преобразования Фурье

Рассмотрим испытание кориолисового расходомера при массовом расходе 0,3 кг/с и нулевой объемной доли воздуха в жидкости.

На рисунке 4.1 показаны первые снятие измерительных данных с катушек расходомеров.

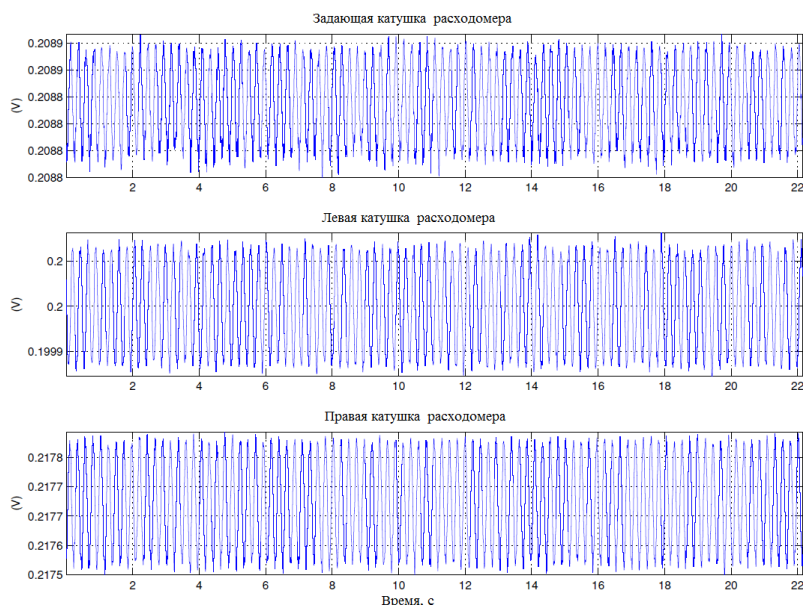


Рисунок 4.1– Показания центральной, правой, левых катушек в измерительном комплексе LMS

Обработка измерений проводилась с помощью программного пакета Matlab.

После проведения измерений получены сигналы с катушек для одной из точек изображенной на рисунке 4.2.

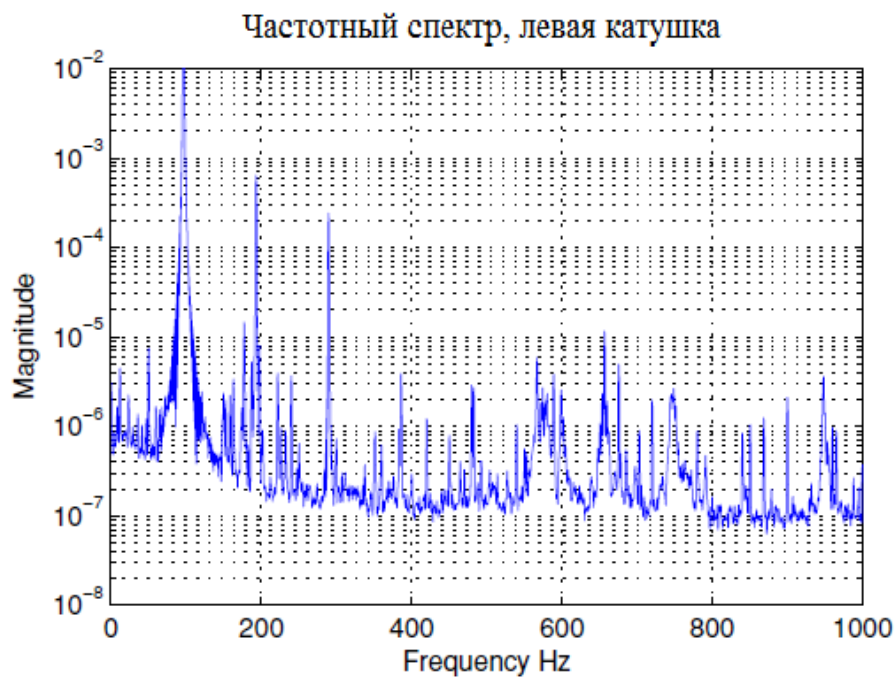


Рисунок 4.2 – Спектр сигнала катушек с 0 объемом содержания воздуха и расходом 0,3 кг/с

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

В процессе обработке сигнала определим параметры расходомера, а именно разность фаз, СКО разности фаз, рабочая частота, СКО частоты. Присутствуют три вида данных. Одни, прошли фильтрацию, другие без фильтрации и данные, полученные через электронику Оксфорда. В таблице 4.1 рассмотрены параметры, полученные тремя разными способами.

Таблица 4.1 – Параметры расходомера, полученные при измерении расхода 0,3 кг/с при нулевом объеме воздуха в жидкости расходомера

Способ расчета параметров расходомера	Разность фаз, градусы	СКО разности фаз, градусы	Частота, Гц	СКО частоты, Гц
Без фильтрации	0,497	0,108	89,980	0,052
С фильтрацией	0,497	0,040	89,973	0,040
С электроники	0,497	0,049	89,981	0,016

В данной главе будет рассмотрена оценка влияния изменения объема воздуха в жидкости на частотные характеристики расходомеров, а именно на рабочую частоту и разность фаз.

4.1 Сравнение способов обработки экспериментальных исследований.

Возникает вопрос, в какой мере отличаются три вида данных друг от друга. В таблице 3.1 приведены результаты эксперимента с тремя способами обработки данных без фильтрации, с фильтрацией, с электроники поливочного стенда в лаборатории Оксфорда. Сравнение результатов измерений при фиксированном объеме и изменении расхода. На рисунке 4.1, 4.2 приведён график разности фаз, частот и их СКО в разных способах обработки при нулевом и 10 проценте объема воздуха. На графиках видны отклонения по частоте.

Таблица 4.2 – Результаты обработки эксперимента тремя способами при изменении расхода, но фиксированном объеме воздуха в жидкости расходомера

0.000%	без фильтрации				с фильтрацией				электроника			
Расход	dFi	СКО dFi	F	СКО F	dFi	СКО dFi	F	СКО F	dFi	СКО dFi	F	СКО F
0,300	0,497	0,108	89,980	0,052	0,497	0,040	89,973	0,040	0,497	0,049	89,981	0,016
0,500	0,835	0,234	89,984	0,074	0,833	0,041	89,970	0,018	0,833	0,057	89,983	0,023
0,600	0,999	0,206	89,977	0,128	0,999	0,077	89,970	0,135	0,994	0,112	89,975	0,047
0,800	1,329	0,374	89,961	0,253	1,331	0,107	89,955	0,060	1,325	0,140	89,963	0,062
1.000%												
0,300	0,484	0,401	90,079	0,159	0,486	0,061	90,072	0,120	0,487	0,059	90,079	0,097
0,500	0,849	0,337	90,059	0,149	0,823	0,055	90,049	0,081	0,824	0,059	90,062	0,081
0,600	0,971	0,675	90,086	0,277	0,985	0,094	90,079	0,159	0,983	0,104	90,086	0,142
0,800	1,355	1,292	90,116	0,431	1,324	0,131	90,107	0,087	1,322	0,116	90,115	0,086
2.000%												
0,300	0,453	0,544	90,253	0,250	0,468	0,082	90,250	0,301	0,470	0,081	90,253	0,192
0,500	0,815	0,501	90,165	0,208	0,812	0,071	90,158	0,132	0,814	0,074	90,172	0,131
0,600	0,947	0,772	90,151	0,313	0,984	0,104	90,147	0,131	0,983	0,097	90,156	0,130
0,800	1,355	1,292	90,116	0,431	1,324	0,131	90,107	0,087	1,322	0,116	90,115	0,086
3.000%												
0,300	0,547	1,134	90,442	0,381	0,467	0,103	90,428	0,189	0,466	0,108	90,437	0,189
0,500	0,815	0,572	90,268	0,245	0,809	0,083	90,263	0,148	0,810	0,090	90,277	0,148
0,600	0,956	0,877	90,227	0,331	0,978	0,093	90,230	0,333	0,974	0,093	90,231	0,104
0,800	1,341	1,978	90,542	0,800	1,306	0,263	90,538	0,123	1,294	0,218	90,546	0,127
4.000%												
0,300	0,547	1,134	90,442	0,381	0,467	0,103	90,428	0,189	0,466	0,108	90,437	0,189
0,500	0,818	0,972	90,364	0,371	0,791	0,131	90,371	0,158	0,788	0,132	90,378	0,156
0,600	0,942	1,062	90,317	0,385	0,969	0,118	90,307	0,110	0,968	0,109	90,317	0,110
0,800	1,341	1,978	90,542	0,800	1,306	0,263	90,538	0,123	1,294	0,218	90,546	0,127
5.000%												
0,300	0,439	1,101	90,467	0,392	0,467	0,112	90,472	0,353	0,467	0,116	90,475	0,209
0,500	0,825	1,177	90,478	0,424	0,774	0,150	90,471	0,166	0,768	0,157	90,478	0,167
0,600	0,913	1,231	90,408	0,450	0,956	0,131	90,404	0,102	0,953	0,127	90,414	0,101
0,800	1,341	1,978	90,542	0,800	1,306	0,263	90,538	0,123	1,294	0,218	90,546	0,127
10.000%												
0,300	0,255	1,289	90,895	0,572	0,462	0,173	90,885	0,232	0,464	0,227	90,894	0,241
0,500	0,711	1,434	90,954	0,582	0,749	0,304	90,950	0,208	0,727	0,385	90,958	0,229
0,600	0,835	1,904	90,885	0,721	0,920	0,371	90,873	0,183	0,884	0,405	90,885	0,209
0,800	1,416	3,561	91,165	1,495	1,273	0,717	90,944	0,275	1,180	0,789	90,936	0,343
15.000%												
0,300	0,260	1,410	91,338	0,729	0,464	0,274	91,321	0,424	0,467	0,374	91,329	0,450
0,500	0,911	1,838	91,264	0,781	0,758	0,444	91,290	0,442	0,724	0,598	91,292	0,374
0,600	0,914	2,577	91,354	1,045	0,918	0,568	91,223	0,284	0,869	0,670	91,221	0,329
0,800	1,327	5,651	91,855	2,597	1,295	1,359	91,305	0,520	1,235	1,653	91,297	0,722
20.000%												
0,300	0,501	1,477	91,616	0,859	0,449	0,336	91,597	0,563	0,458	0,460	91,601	0,603
0,500	0,814	2,274	91,629	1,007	0,769	0,545	91,543	0,469	0,732	0,735	91,541	0,483
0,600	0,906	3,487	91,677	1,527	0,939	0,839	91,599	0,444	0,882	1,060	91,607	0,540
0,800	1,214	8,208	92,140	3,831	1,269	2,096	91,601	0,846	1,231	2,662	91,623	1,224
25.000%												
0,300	0,509	1,485	91,812	0,950	0,445	0,365	91,819	0,695	0,456	0,499	91,824	0,748
0,500	0,899	2,937	91,828	1,368	0,750	0,659	91,762	0,514	0,717	0,843	91,761	0,600
0,600	1,129	4,127	92,196	1,918	0,933	1,044	91,877	0,562	0,871	1,304	91,861	0,705
0,800	0,484	14,107	92,064	4,751	1,284	2,751	91,914	1,142	1,234	3,557	91,890	1,629

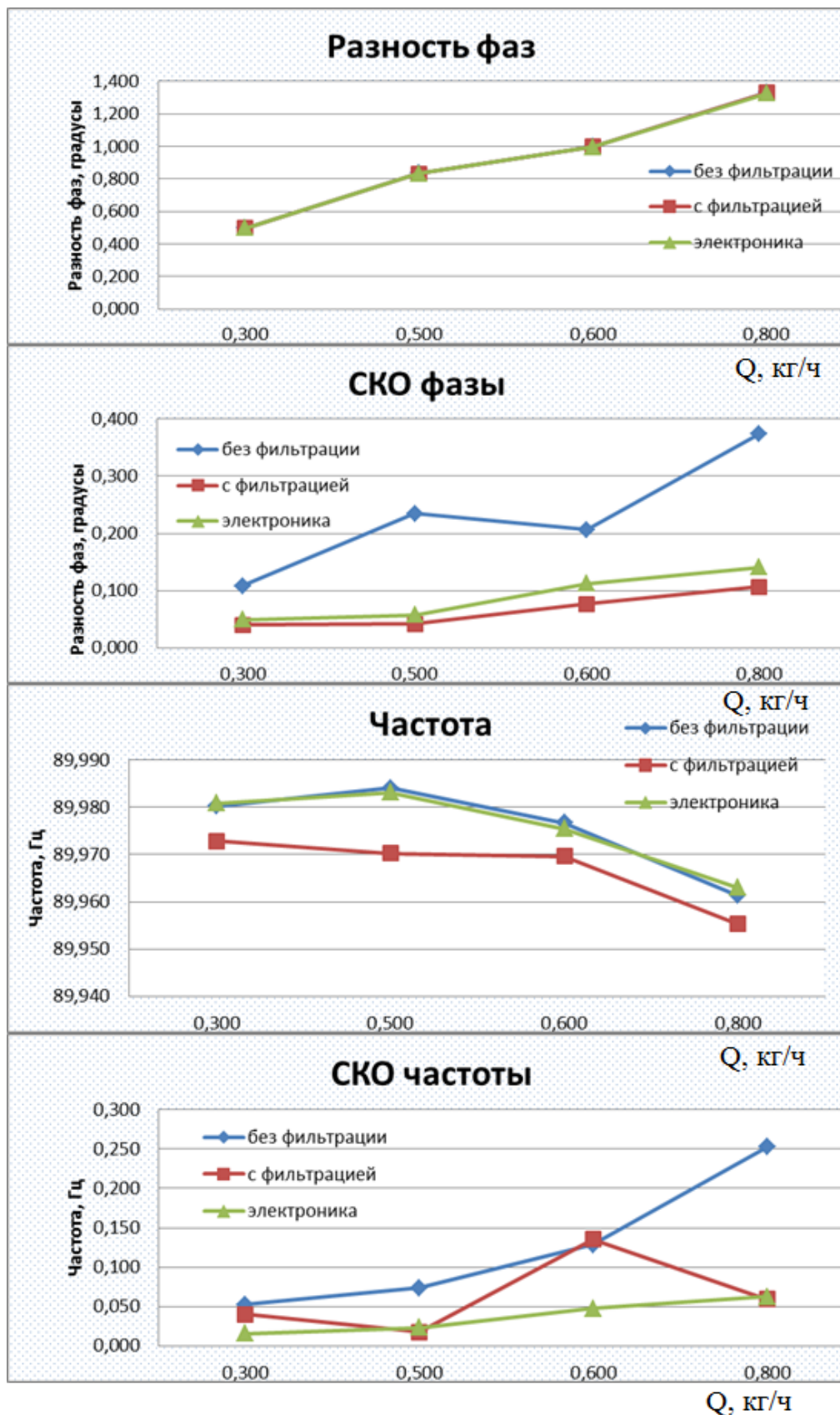


Рисунок 4.3 – Результаты обработки при 0% объема воздуха

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

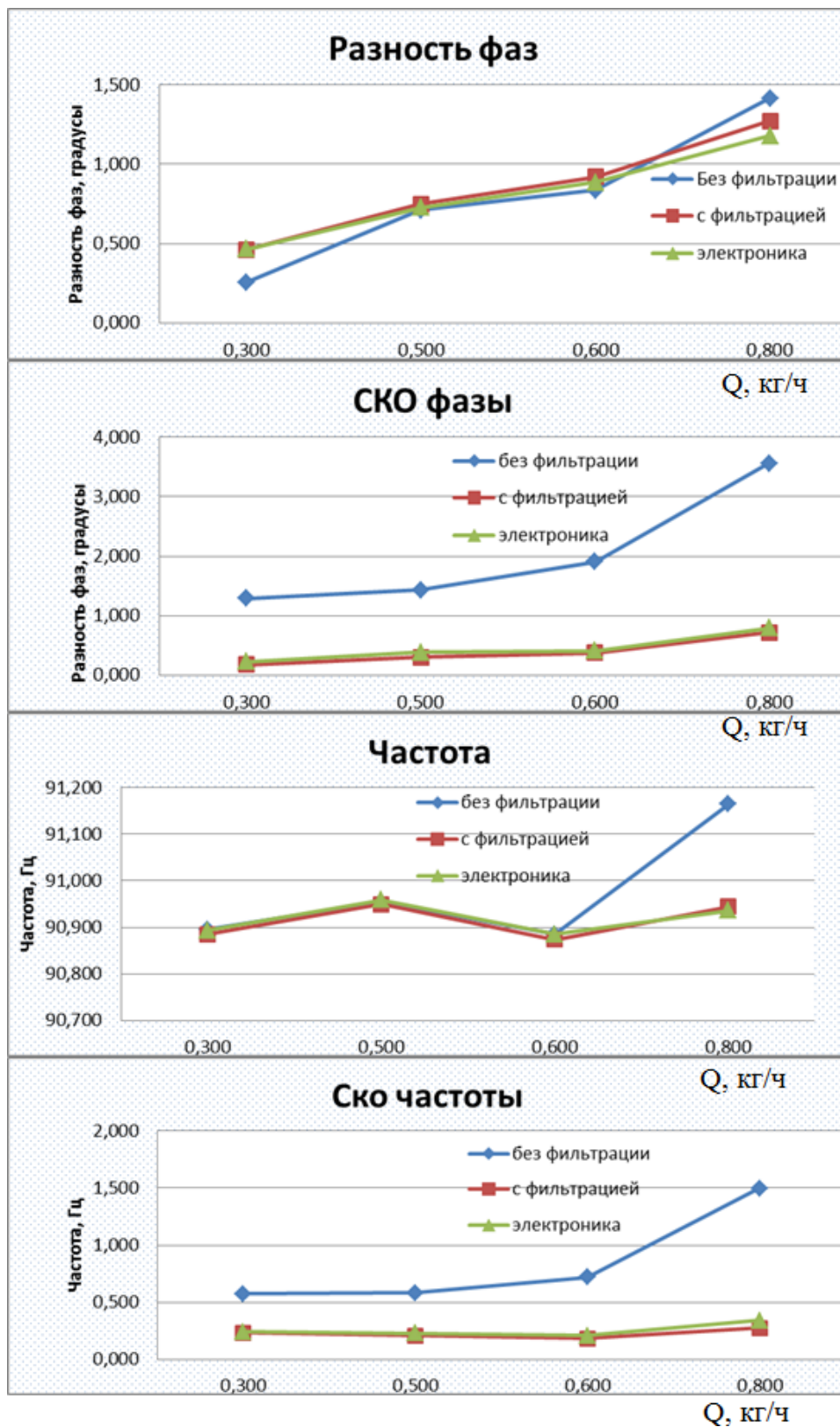


Рисунок 4.4 – Результаты обработки при 10% объема воздуха

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

На приведенных графиках заметно отклонения друг от друга, что бы определить степень отклонений построим гистограммы, которые будут показывать разницу в тех или иных точках на графике.

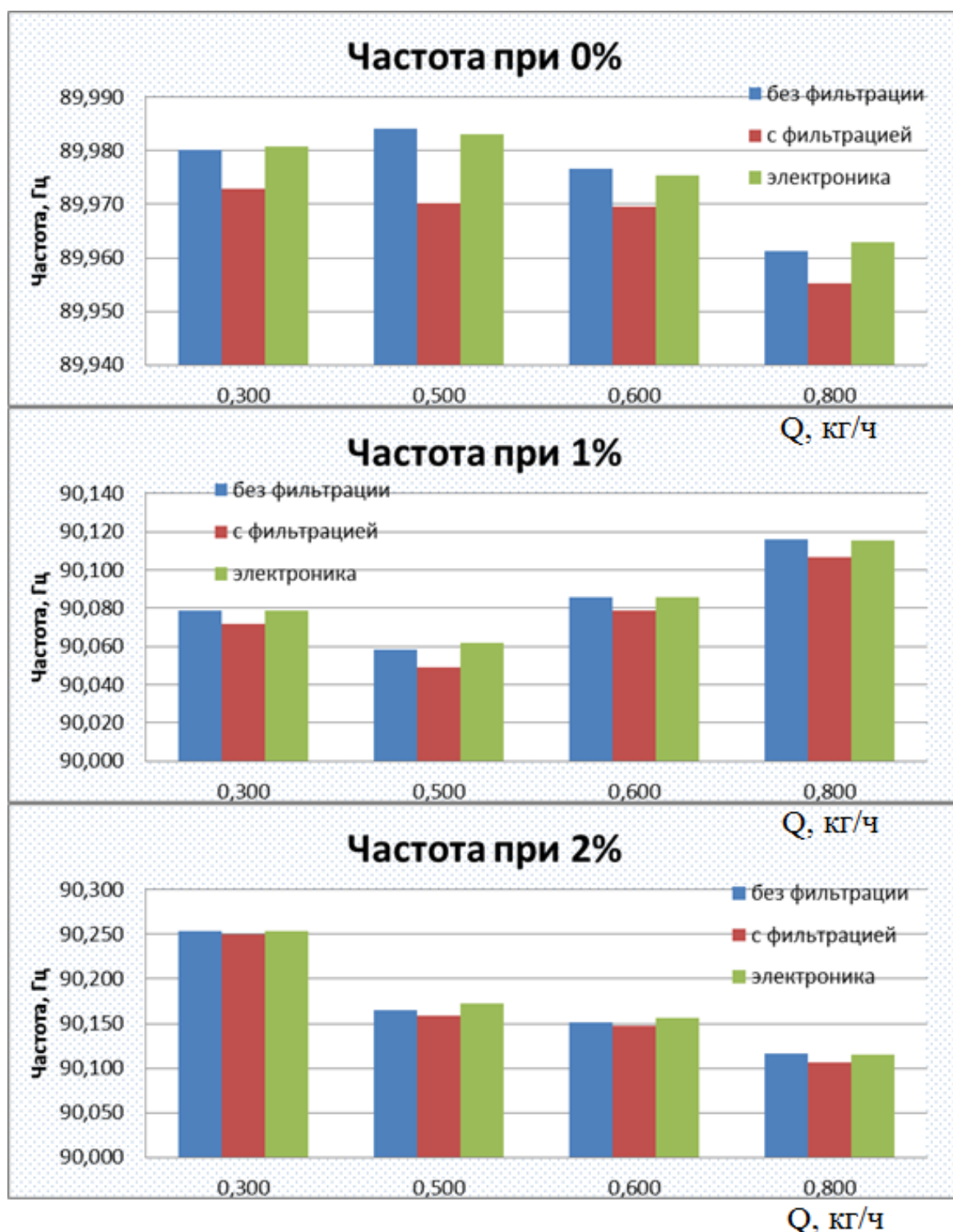


Рисунок 4.5 – Результаты обработки сигнала с изменением заданной объемной доли воздуха с 0% до 2%

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

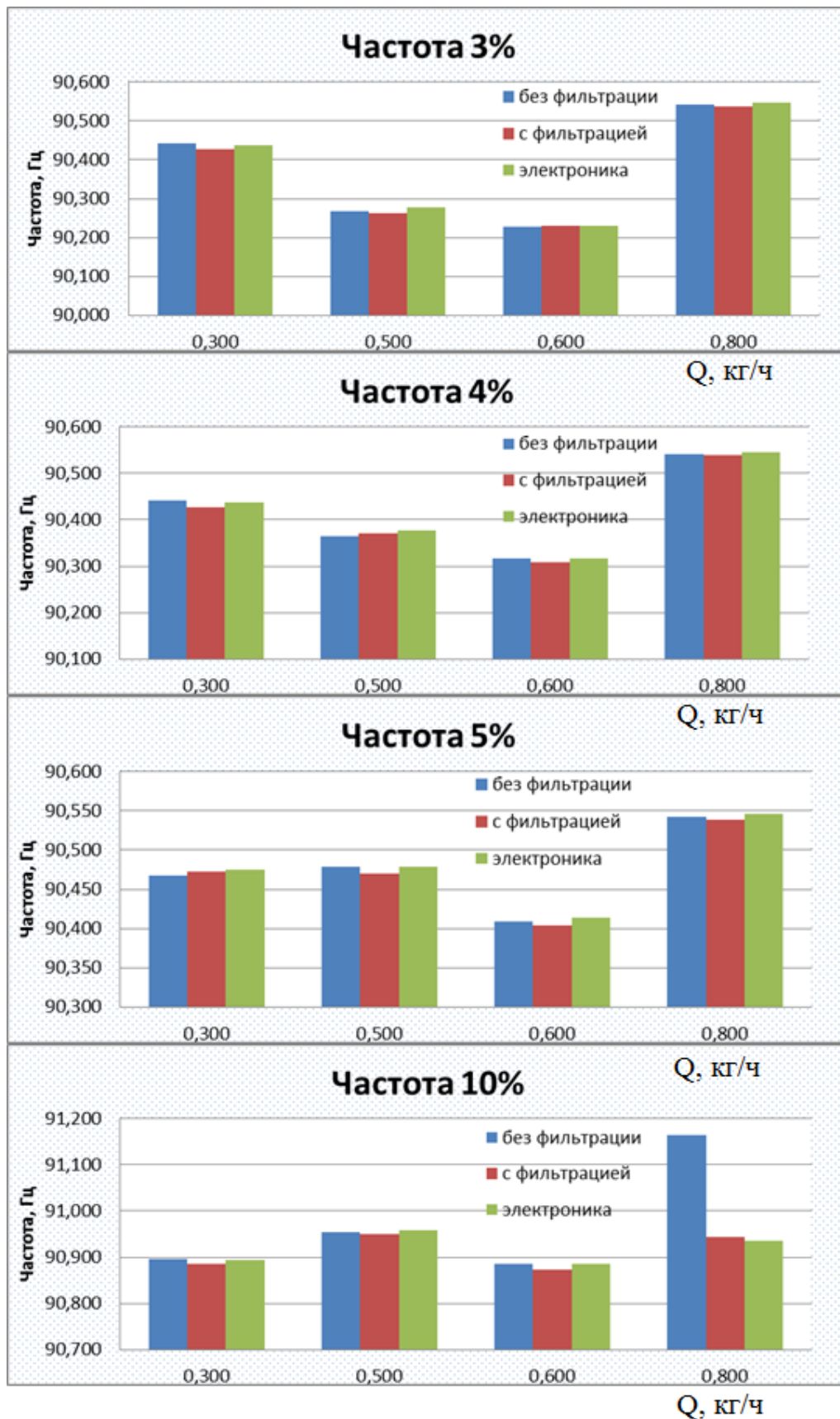


Рисунок 4.6 – Результаты обработки сигнала с изменением заданной объемной доли воздуха с 3% до 10%

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

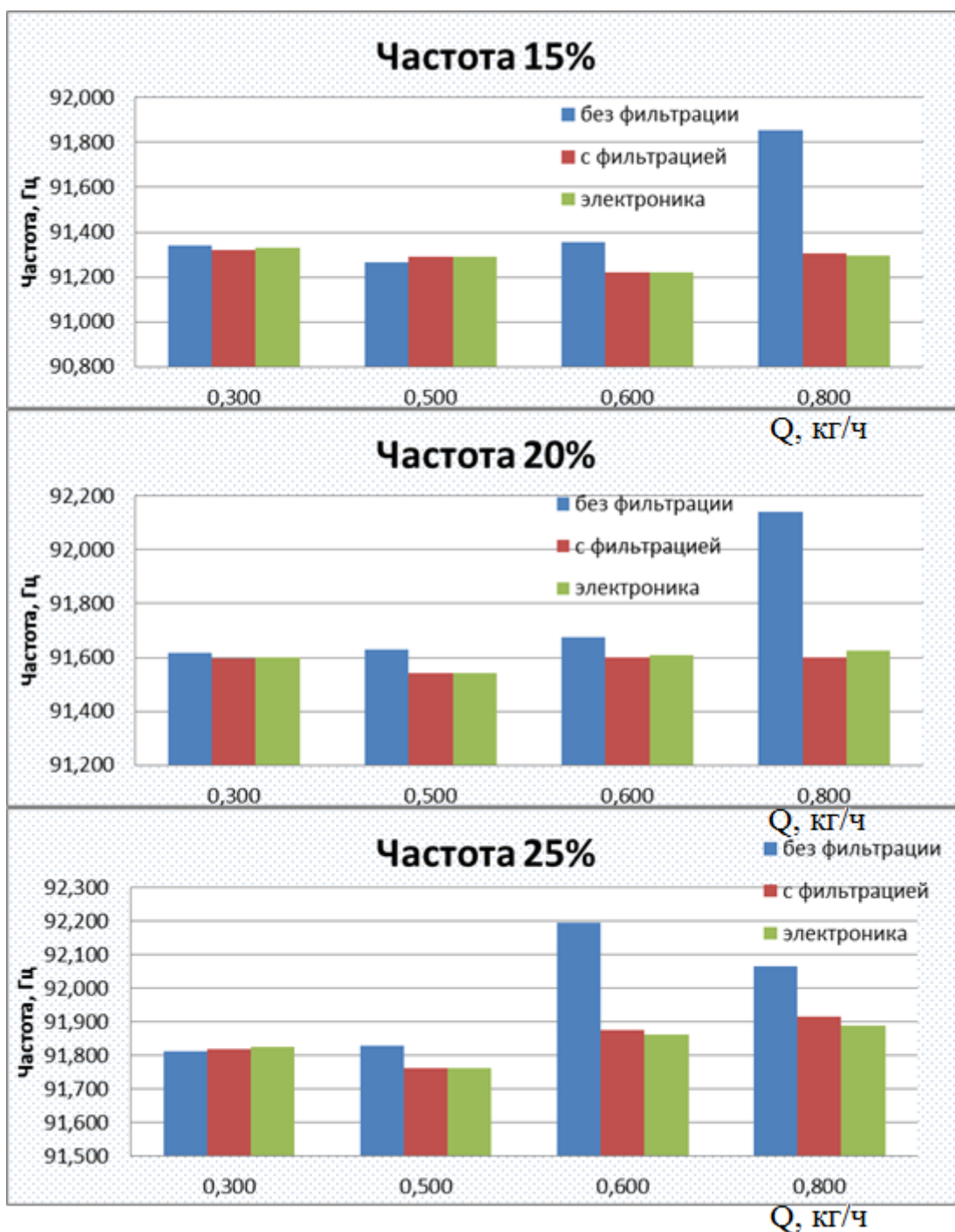


Рисунок 4.7 – Результаты обработки сигнала с изменением заданной объемной доли воздуха с 0% до 25%

Сигнал, не прошедший фильтрацию, достигает отклонений до 2%. Отклонения между отфильтрованным сигналом и сигналом, обработанным, непосредственно, с электроники в ходе эксперимента достигают в среднем до 0,01%, следовательно, это говорит о правильности обработки сигнала.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

4.2 Результаты эксперимента с изменением объема воздуха при постоянном расходе.

Рассмотрим рисунок 4.1 показывающий, отклонение частоты при изменении процента воздуха в трубках расходомера.

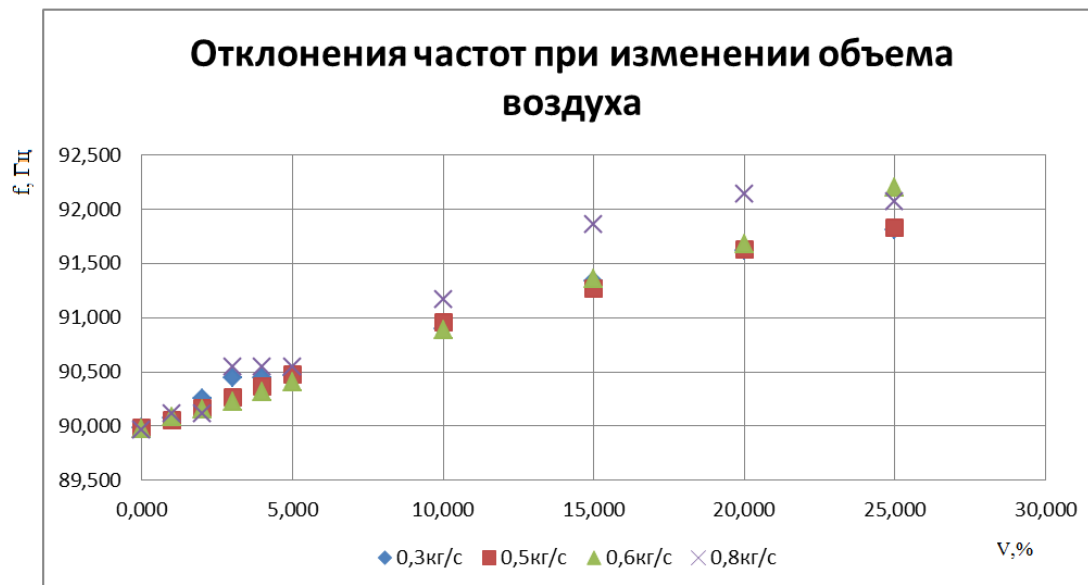


Рисунок 4.8 – Гистограмма частот расходомера при измерении расхода 0,3кг/с при изменении процента содержания воздуха

Рассмотрим рисунок, где изображена гистограмма частот при изменении процента содержания воздуха и при расходе 0.3 кг/с.

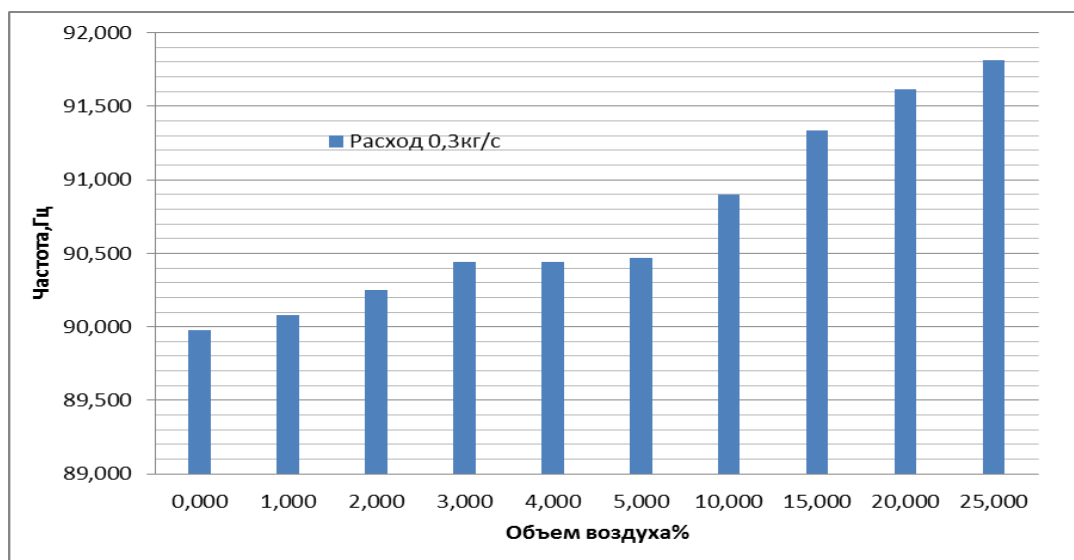


Рисунок 4.9 – Гистограмма частот расходомера при измерении расхода 0,3кг/с при изменении процента содержания воздуха

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

На графике видны увеличения частот при увеличении газовой фракции. При 0 проценте частоты составили 89Гц, а при максимальном до 92 Гц отклонение составляет 2 процентов.

Рассмотрим рисунок, где изображена гистограмма частот при изменении процента содержания воздуха и при расходе 0.5 кг/с.

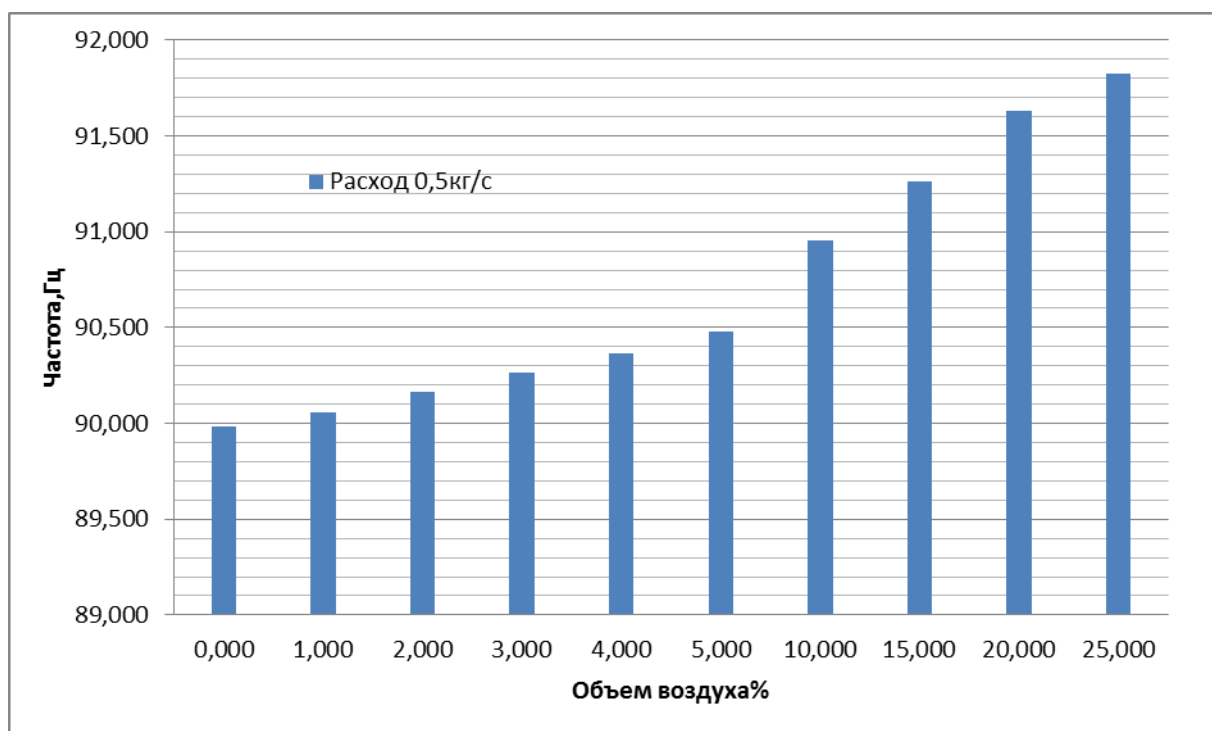


Рисунок 4.10 – Гистограмма частот расходомера при измерении расхода 0,5кг/с при изменении процента содержания воздуха

На графике видны увеличения частот при увеличении газовой фракции. При 0 проценте частоты составили 89Гц, а при максимальном до 92 Гц отклонение составляет 2 процентов.

Рассмотрим рисунок, где изображена гистограмма частот при изменении процента содержания воздуха и при расходе 0.5 кг/с.

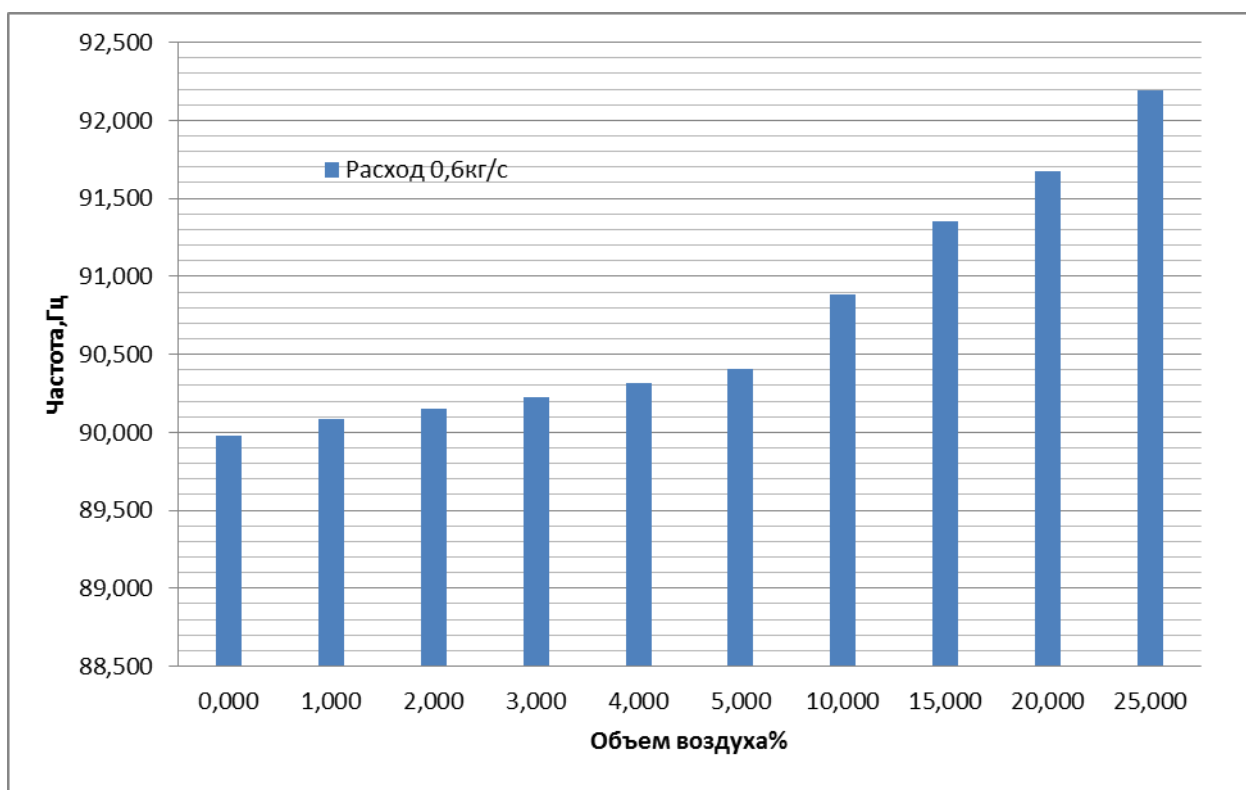


Рисунок 4.11 – Гистограмма частот расходомера при измерении расхода 0,6кг/с при изменении процента содержания воздуха

На графике видны увеличения частот при увеличении газовой фракции. При 0 проценте частоты составили 89Гц, а при максимальном до 92 Гц отклонение составляет 2 процентов.

Рассмотрим рисунок, где изображена гистограмма частот при изменении процента содержания воздуха и при расходе 0.5 кг/с.

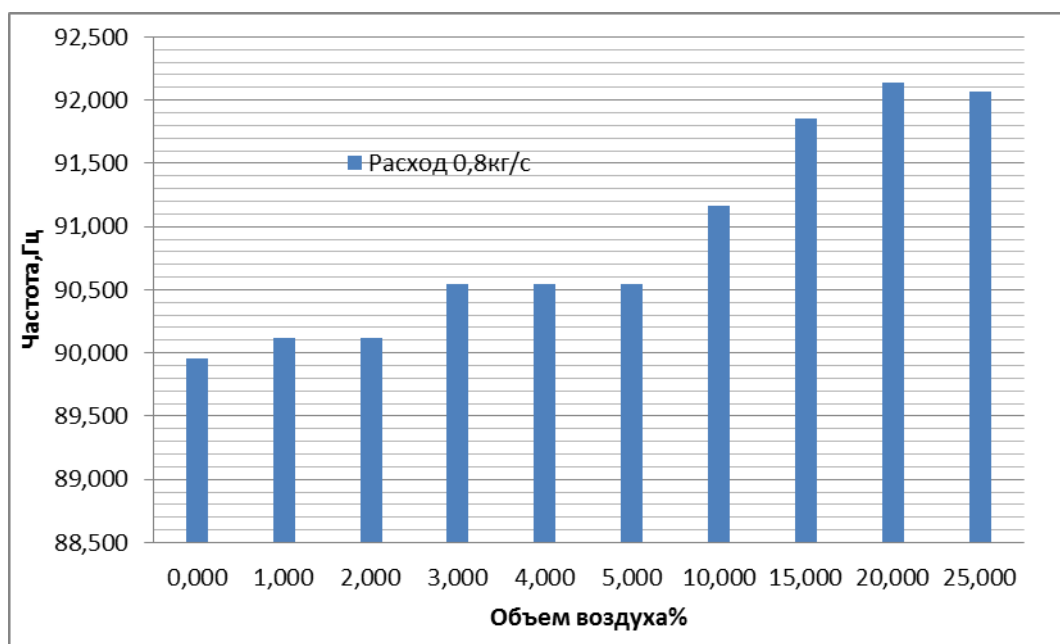


Рисунок 4.12 – Гистограмма частот расходомера при измерении расхода 0,6кг/с при изменении процента содержания воздуха

На графике видны увеличения частот при увеличении газовой фракции. При 0 проценте частоты составили 89Гц, а при максимальном до 92 Гц отклонение составляет 2 процентов.

Рассмотрим рисунок, где изображена гистограмма частот при изменении процента содержания воздуха и при расходе 0.5 кг/с.

Для того чтобы оценить влияние изменения объема воздуха рассмотрим таблицу 4.3 где показаны результаты измерения частоты при изменении процента содержания воздуха.

Таблица 4.3– Частоты сигнала с катушек при изменении процента воздуха и постоянном расходе.

Расход кг/с	V,0%	V,1%	V,2%	V,3%	V,4%	V,5%	V,10%	V,15%	V,20%	V,25%	Отл., %
0,300	89,980	90,079	90,253	90,442	90,442	90,467	90,895	91,338	91,616	91,812	1,995
0,500	89,984	90,059	90,165	90,268	90,364	90,478	90,954	91,264	91,629	91,828	2,008
0,600	89,977	90,086	90,151	90,227	90,317	90,408	90,885	91,354	91,677	92,196	2,407
0,800	89,961	90,116	90,116	90,542	90,542	90,542	91,165	91,855	92,140	92,064	2,283

4.3 Результаты эксперимента при изменении расхода и изменении процента содержания воздуха в жидкости кориолисового расходомера.

Для оценки возникшей неисправности, а именно появления газовой фракции в жидкости, проведено исследование частотных характеристик при изменении расхода и появления воздуха в трубках расходомера, где протекает измеряемая жидкость. Рассмотрим случай, когда расходомер измеряет расход жидкости, в которой отсутствует заданная объемная доля в жидкости и тогда, когда в жидкости заданная объемная доля возрастает с 0 до 3 процентов. График с частотными характеристиками изображен на рисунке 4.11. Где синяя функция это частота при изменении процента содержания воздуха с 0% до 3%, а синяя это функция частоты при 0% воздуха.

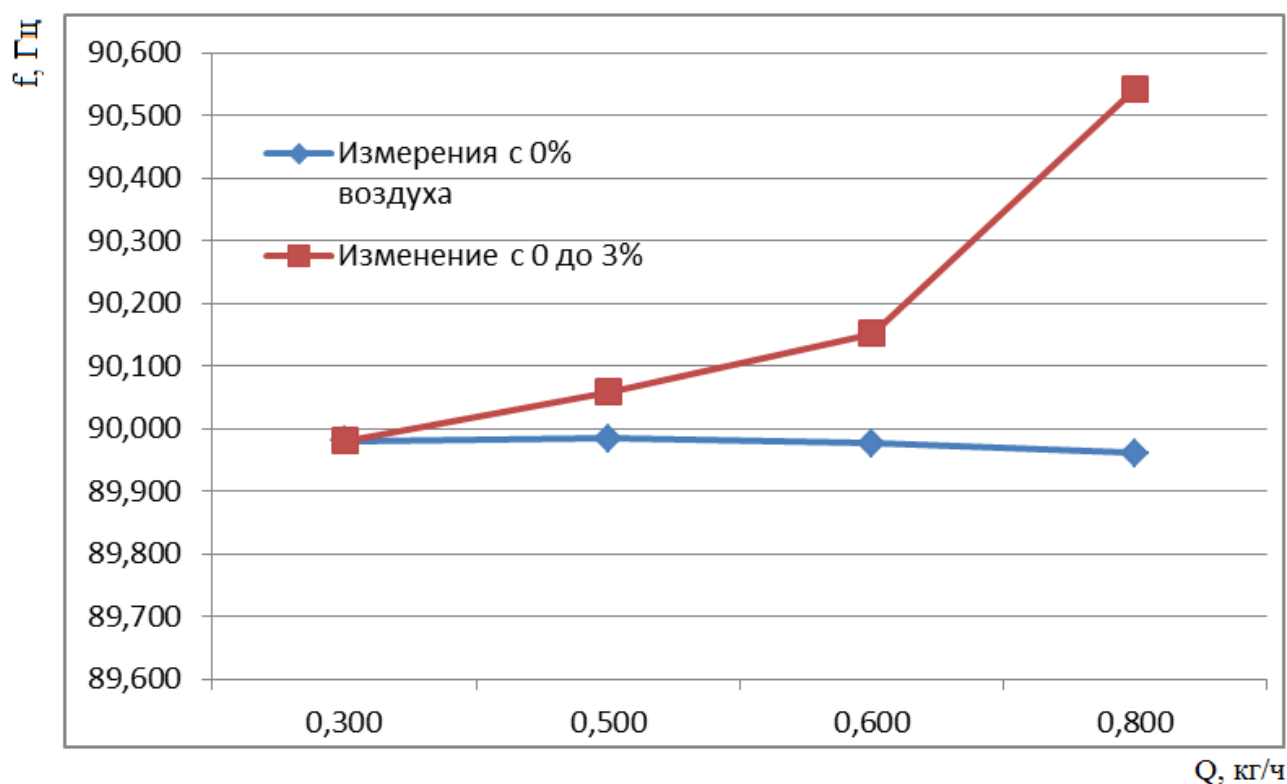


Рисунок 4.13– График частот при изменении расхода и изменении процента содержания воздуха.

Для наглядной разницы частот построим диаграмму частот при изменении расхода на рисунке 4.12.

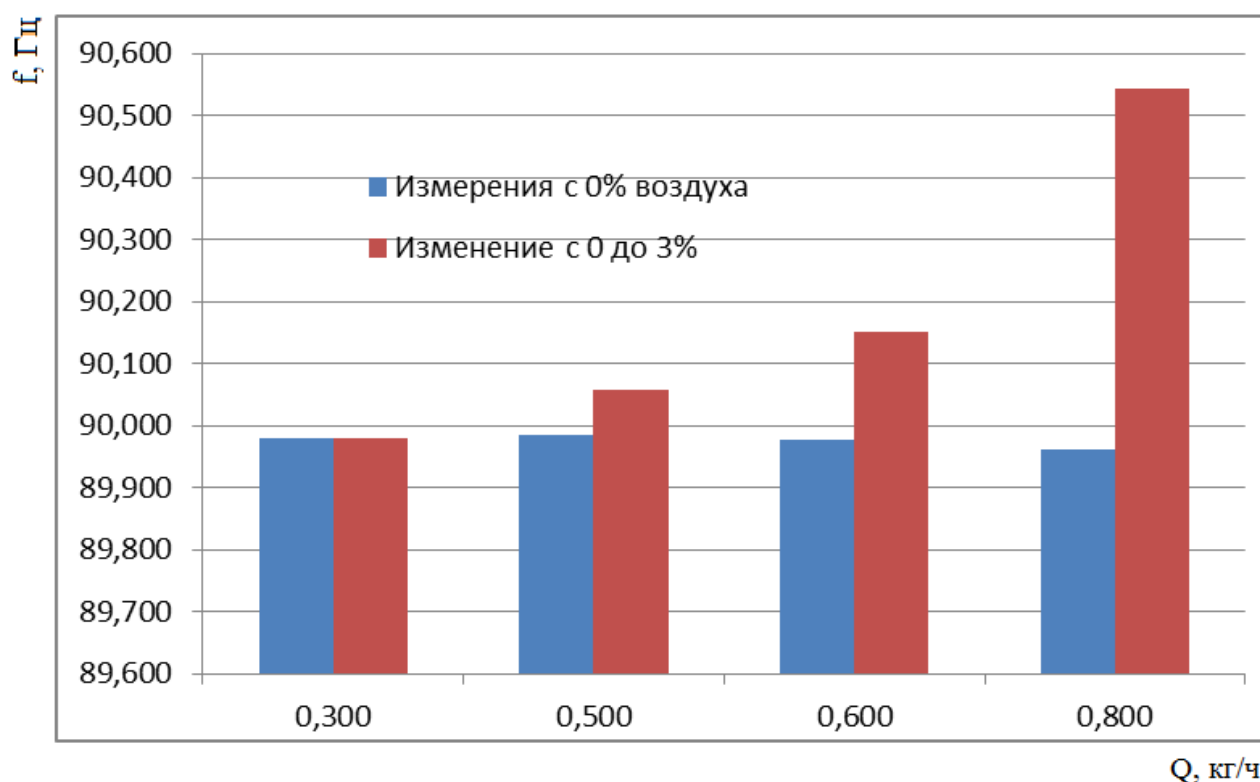


Рисунок 4.14– Диаграмма частот при изменении расхода и изменении процента содержания воздуха.

Рассмотрим таблицу разности частот при изменении заданного объема воздуха с 0% до 3%.

Таблица 4.4– Частоты сигнала с катушек при изменении процента воздуха и изменении расхода.

Расход, кг/с	Частота при V воздуха при 0%	Частота при V воздуха с 0% до 3%	Разница частот, Гц
0,3	89,980	90,442	0,000
0,5	90,059	90,478	0,074
0,6	90,151	90,885	0,174
0,8	90,542	91,855	0,581

Погрешность между нулевым процентом и 1% объема составила 0,083%, а при 2 процентах воздуха 0,2%, при 3 процентах 0,641.

Рассмотрим случай, когда расходомер измеряет расход жидкости, в которой отсутствует заданная объемная доля в жидкости и тогда, когда в жидкости заданная объемная доля возрастает с 4 до 15 процентов. График с частотными характеристиками изображен на рисунке 4.41. Где синяя функция это частота при изменении процента содержания воздуха с 4% до 15%, а синяя это функция частоты при 0% воздуха.

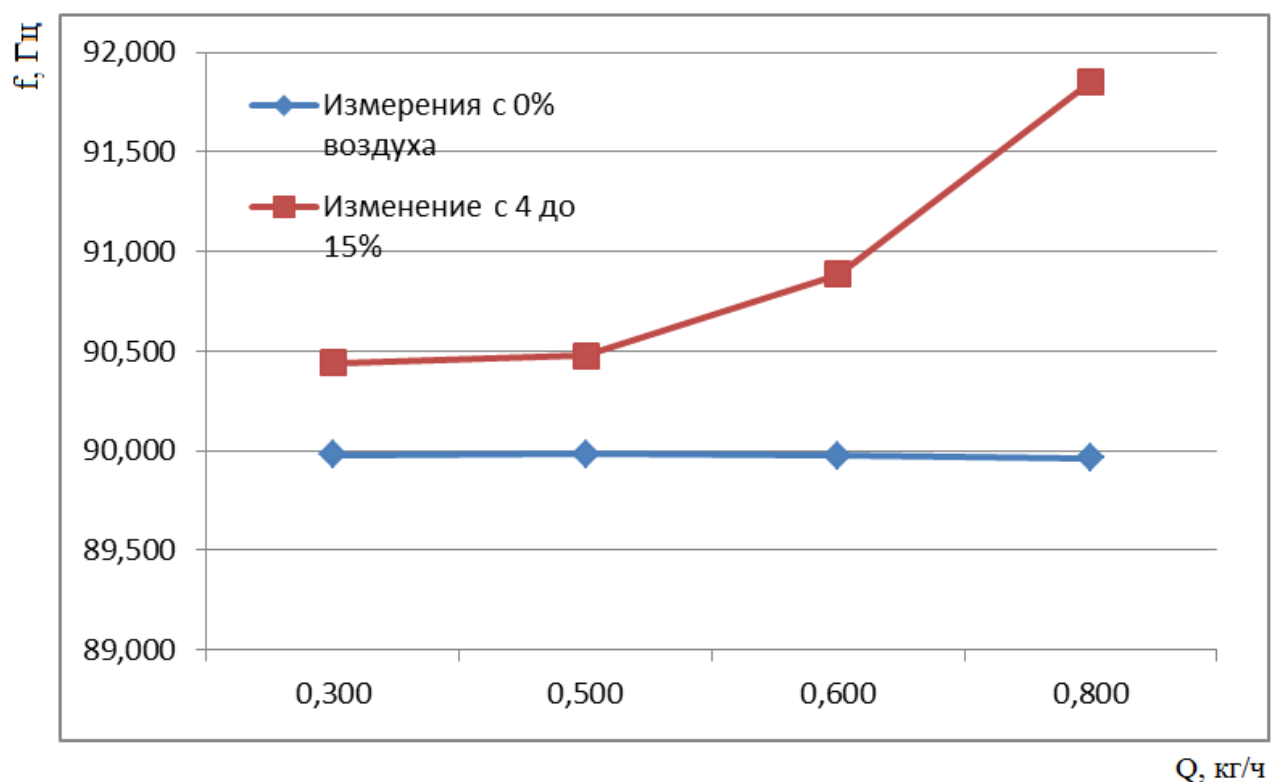


Рисунок 4.15– График частот при изменении расхода и изменении процента содержания воздуха.

Для наглядной разницы частот построим диаграмму частот при изменении расхода на рисунке 4.15.

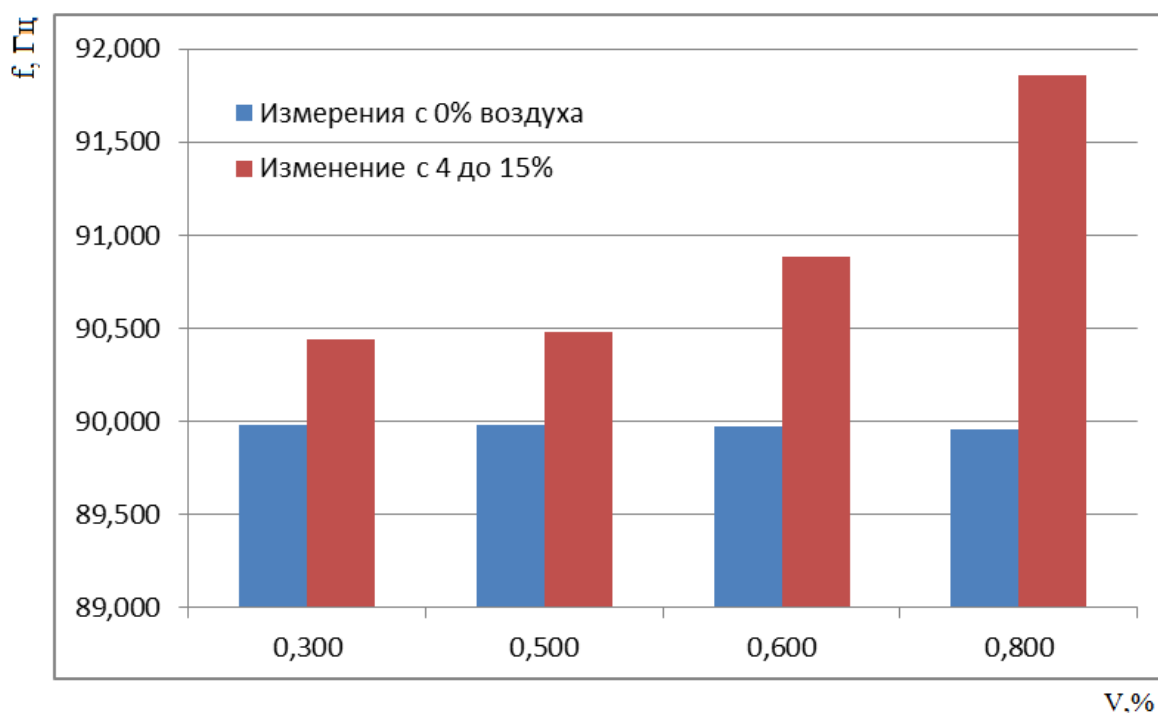


Рисунок 4.16– Диаграмма частот при изменении расхода и изменении процента содержания воздуха.

Рассмотрим таблицу разности частот при изменении заданного объема воздуха с 4% до 15%.

Таблица 4.5– Частоты сигнала с катушек при изменении процента воздуха и изменении расхода.

Расход	Частота при V воздуха при 0%	Частота при V воздуха с 4% до 15%	Разница частот
0,300	89,980	90,442	0,461
0,500	90,059	90,478	0,494
0,600	90,151	90,885	0,908
0,800	90,542	91,855	1,894

Погрешность между нулевым процентом и 4% объема составила 0,510%, а при 5 процентах воздуха 0,546%, при 10 процентах 1%, при 15 процентах содержания объема воздуха погрешность между нулевым процентом воздуха достигла 2%.

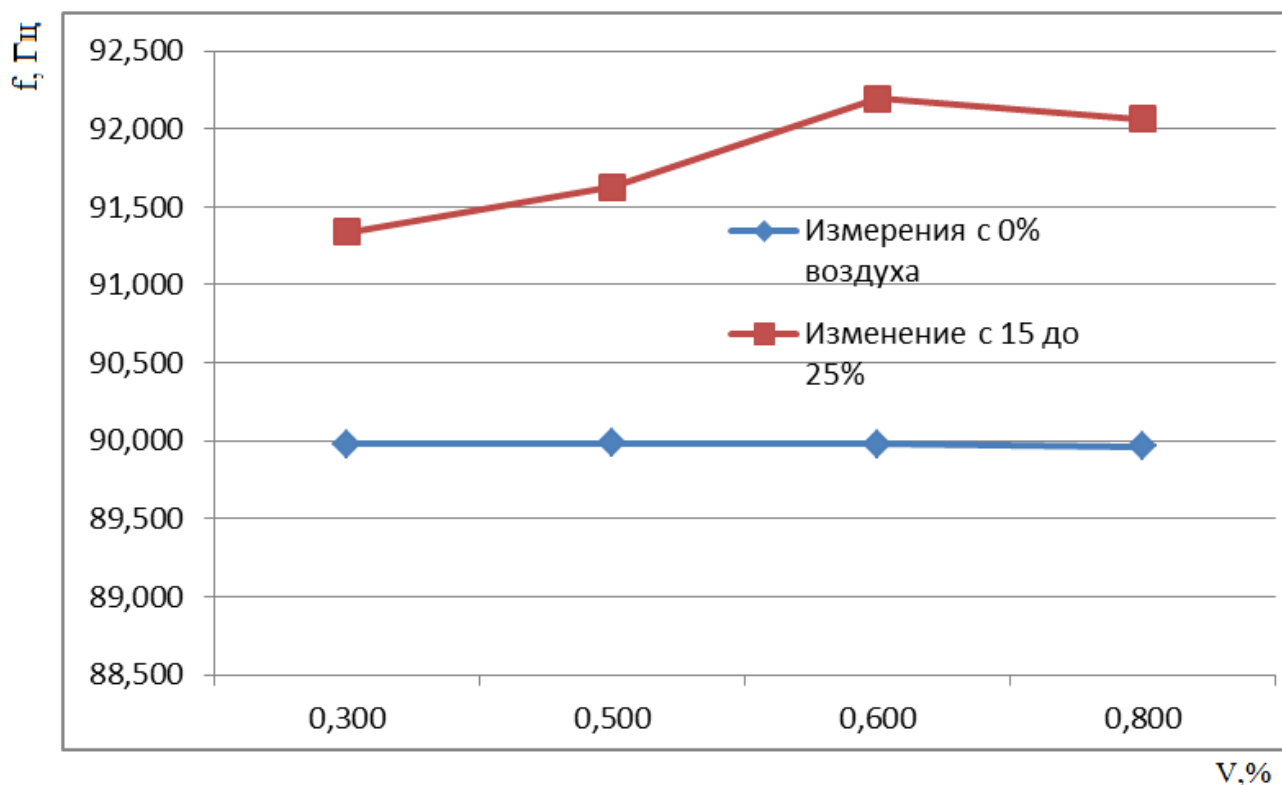


Рисунок 4.17– График частот при изменении расхода и изменении процента содержания воздуха.

Для наглядной разницы частот построим диаграмму частот при изменении расхода на рисунке 4.17.

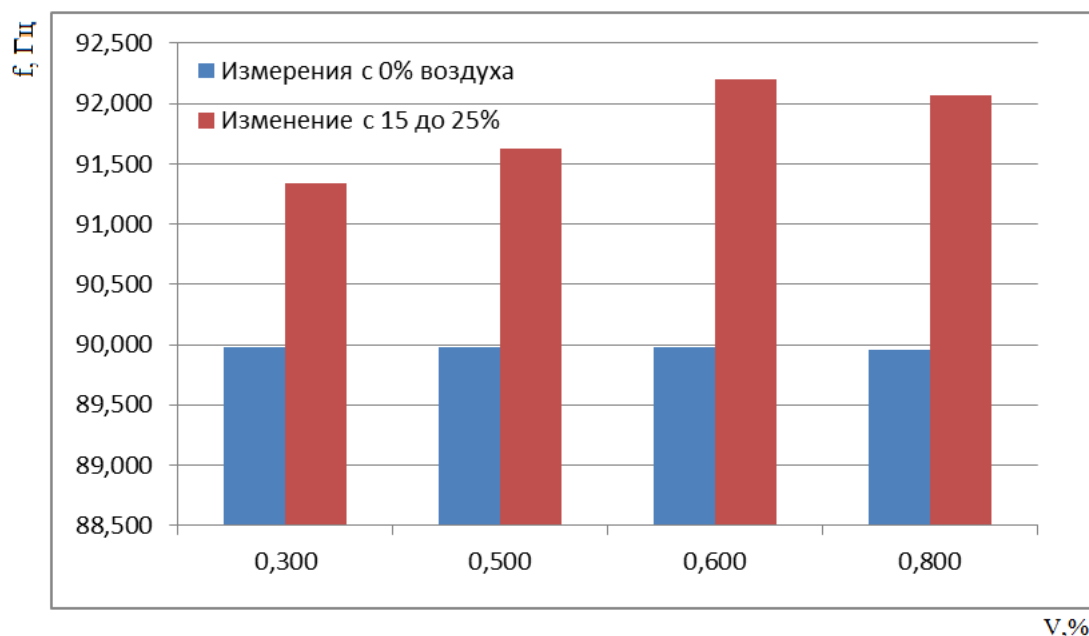


Рисунок 4.18– Диаграмма частот при изменении расхода и изменении процента содержания воздуха.

Таблица 4.6 – Частоты сигнала с катушек при изменении процента воздуха и изменении расхода.

Расход кг/ч	Частота при объеме воздуха при 0%, Гц	Частота при объеме воздуха с 15% до 25%, Гц	Разница частот, Гц
0,3	89,980	91,338	1,358
0,500	90,059	91,629	1,644
0,600	90,151	92,196	2,219
0,800	90,542	92,064	2,219

Погрешность между нулевым процентом и 15% объема составила 1,486%, а при 20 процентах воздуха 1,795%, при 25 процентах 2,407% и 2,283%.

Рассмотрим случай резкого скачка увеличения процента содержания воздуха, с целью исследования неисправности возникшей не равномерно, как это было до этого. В начале измерения заданный процент содержания воздуха в жидкости нулевой, в середине возрастает с 10% до 25%. Рассмотрим рисунок 4.18, на котором изображен данный случай. Мы видим две функции частот, у одной из которых резкое увеличение частоты, для более наглядного представления рассмотрим диаграмму частот.

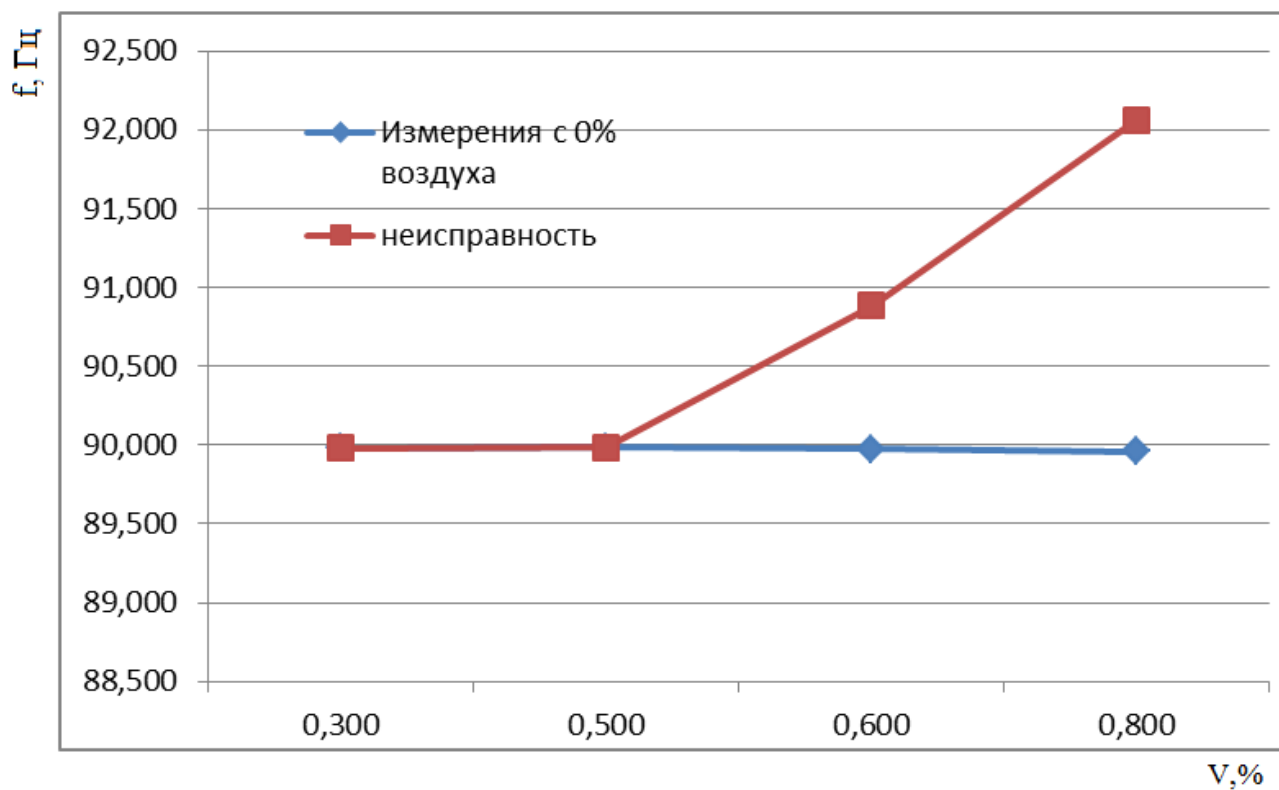


Рисунок 4.19 – График частот при изменении расхода и изменении процента содержания воздуха

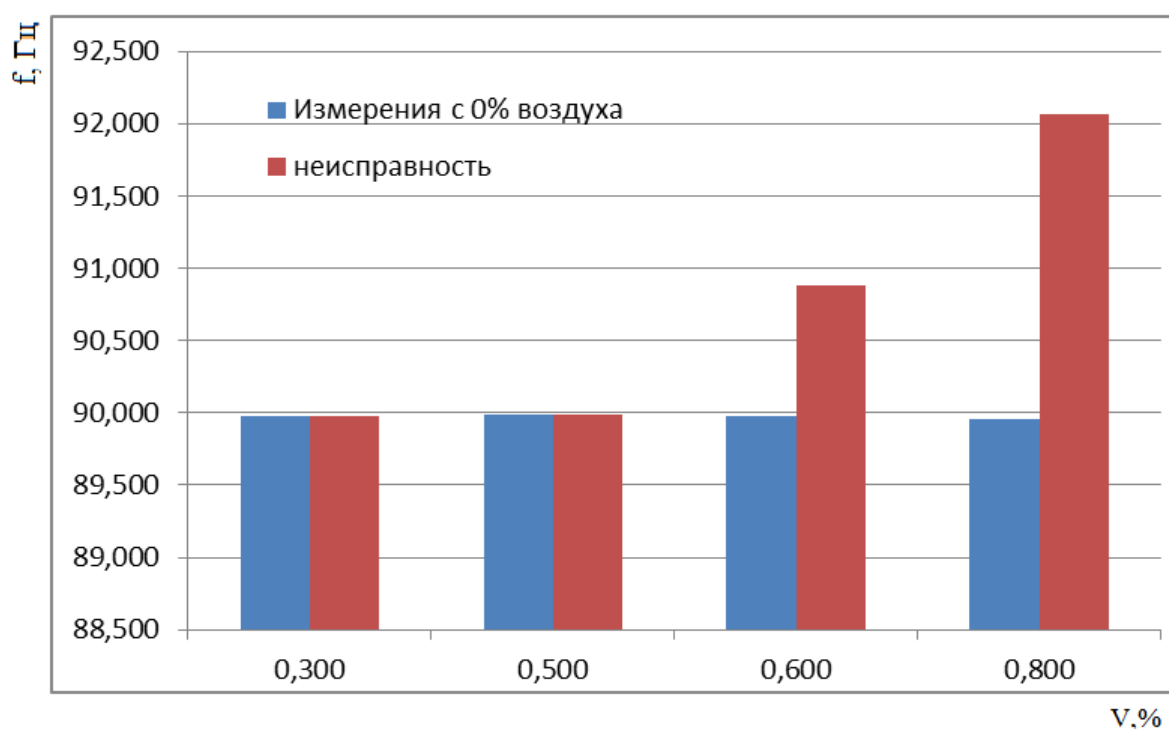


Рисунок 4.20 – Диаграмма частот при изменении расхода и изменении процента содержания воздуха

Таблица 4.7 – Частоты сигнала с катушек при изменении процента воздуха и изменении расхода

Расход кг/ч	Частота при объеме воздуха при 0%, Гц	Частота при изменении объема воздуха, Гц	Разница частот, Гц
0,300	89,980	89,980	0,000
0,500	90,059	89,984	0,000
0,600	90,151	90,885	0,908
0,800	90,542	92,064	2,102

Погрешность при возрастании объема изменилась с 0 до 2,5%

Построим таблицу погрешностей на рисунке видно, возрастание погрешности при изменении объема содержания воздуха. Выделяется зависимость, чем выше процент заданной газовой фракции, чем выше отклонение частот. Так, например при 3% объема, погрешность равна 0,6%, а при 25% достигает 2,5%

Таблица 4.8 – Погрешности между нулевым заданным процентом содержания воздуха и изменением процента содержания воздуха в жидкости

Расход, кг/с	Объем(0;3)%	Объем (4;15)%	Объем (15;25)%	Погрешность, %
0,300	0,000	0,510	1,486	0,000
0,500	0,083	0,546	1,795	0,000
0,600	0,193	0,999	2,200	0,999
0,800	0,641	2,061	2,400	2,283

Рассмотрим график изменения погрешностей при изменении процента содержания воздуха изображенный на рисунке 4.20

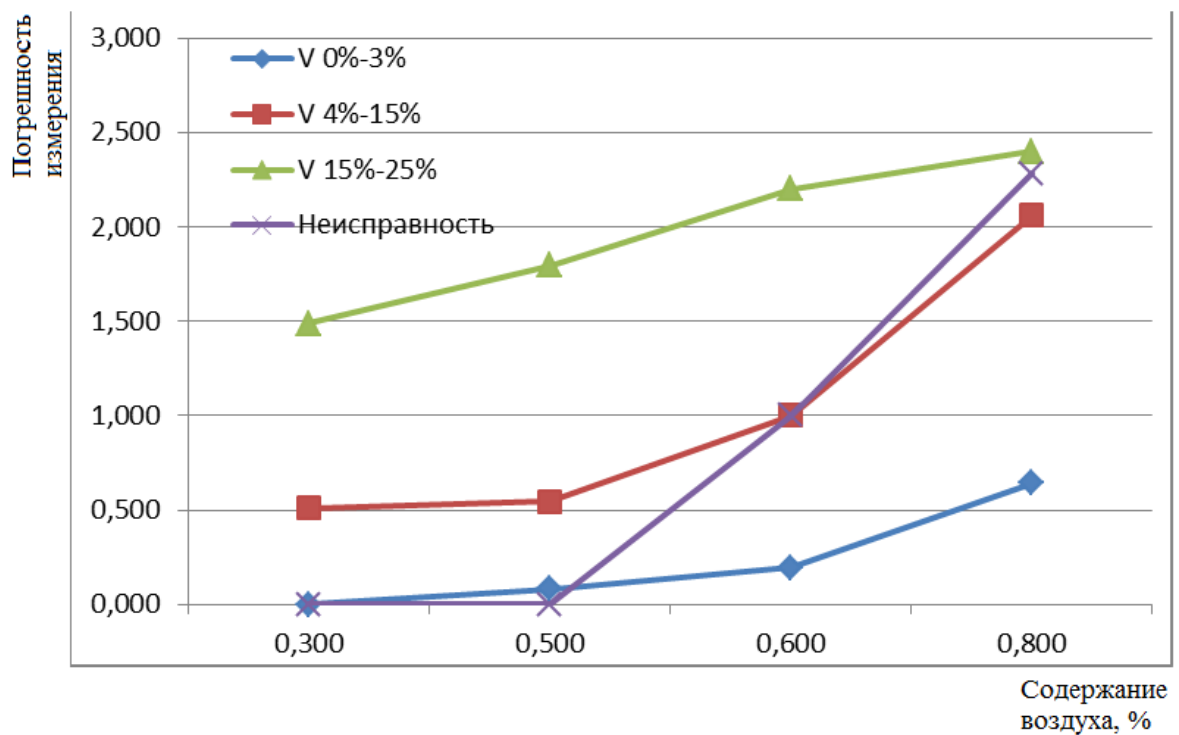


Рисунок 4.21 – График изменения погрешностей частот при изменении процента содержания воздуха

Была проведена оценка влияния внешних факторов на амплитудные характеристики для диагностики технического состояния кориолисового расходомера. Проведен анализ современных подходов к оценке технического состояния кориолисовых расходомеров. Разработаны экспериментальные исследования влияния внешних факторов на частотные характеристики кориолисового расходомера. Оценены результаты экспериментального исследования влияния внешних факторов на частотные характеристики расходомера. Определено влияние двухфазного потока на частотные характеристики кориолисового расходомера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведен анализ, в ходе которого были выделены основные источники погрешностей и причины выхода из строя расходомеров.

Проведены экспериментальные исследования влияния внешних факторов на измерения расходомеров.

Оценено влияние внешних факторов на частотные характеристики расходомера. Изменение массы балансировочных грузов на $\pm 10\%$ приводит к линейному изменению собственных частот первых десяти ненулевых форм собственных колебаний. Увеличение массы грузов на 10% приводит к снижению «рабочей» частоты на $0,87\%$. Уменьшение массы грузов на 10% приводит к увеличению «рабочей» частоты колебаний на $0,88\%$.

Изменение процента содержания воздуха в жидкости оказывает влияние на частотные характеристики расходомера. Процент отклонения частот достигает $2,5\%$.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		94

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев, К.А. Вейвлет-ряды в задаче оценивания собственных частот датчиков / К.А. Алексеев // Датчики и системы. – 2001. – № 12. – С. 5-7.
2. Алексеев, К.А. Задача идентификации полных и частных динамических характеристик высокочастотных пьезоэлектрических датчиков переменных давлений / К. А. Алексеев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2000. – № 7. – С. 663-667.
3. Андреева, Л.Е. Упругие элементы прибора / Л. Е. Андреева. – М.: Машгиз, 1962. – 469 с.
4. Багдатыев, Е.Е. Идентификация преобразователей переменных давлений / Е.Е. Багдатыев, А.А. Ефимова // Измерительная техника. – 1986.– № 6. – С. 18–29.
5. Багдатыев, Е.Е. Импульсная установка для идентификации датчиков переменных давлений / Е.Е. Багдатыев, А.А. Ефимова, Э.Б. Санина //Измерительная техника. – 1989. – № 3. – С. 23–25.
6. Бакшеева, Ю.В. Резистивные датчики температуры с метрологическим самоконтролем / Ю.В. Бакшеева, К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов // Датчики и системы. – 2011. – № 4. – С. 62-70.
7. Бакшеева, Ю.В. Организация метрологического самоконтроля в датчиках с упругими чувствительными элементами / Ю.В. Бакшеева, К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов // Девятая международная научная школа «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов», 26–30 октября 2009 г. – СПб. – 2010. – № 1. – С. 12–17.
8. Белозубов, Е.М. Моделирование деформаций мембран датчиков давления / Е.М. Белозубов, В.А. Васильев, П.С. Чернов // Измерительная техника. – 2009. – № 3. – С. 33–36.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		95

9. Беляков, А.О. Определение моментов инерции крупногабаритных тел по колебаниям в упругом подвесе: дисс. на соискание ученой степени к.ф.-м. наук / А.О. Беляков. – М., 2005. – 215 с.

10. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

11. Богуш, М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков с использованием конечно-элементных математических моделей / М.В. Богуш, Э. М. Пикалев // Приборы. – 2007. – №8. – С. 32–39.

12. Богуш, М.В. Анализ функции преобразования пьезоэлектрических датчиков давления методом конечных элементов / М.В. Богуш, Э.М. Пикалев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – №2. – С. 74–84.

13. Браилов, Э.С. Определение погрешности измерения температуры встроенными термоэлектрическими термометрами / Э.С. Браилов,

14. Бушев, В.В. Серия микроэлектронных датчиков давления МИДА / В.В. Бушев, О.Л. Николайчук, В.М. Стучебников // Датчики и системы. – 2000. – № 1. – С. 21–22.

15. Васильев, В.А. Принципы построения моделей измерительных приборов и систем / В.А. Васильев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 6. – С. 40–45.

16. Воронин, В.В. Множество возможных дефектов и виды технических состояний / В.В. Воронин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – № 6. – С. 41–44.

17. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / Генкин М.Д., Соколова А.Г. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

18. Генри, М. Самоаттестующиеся датчики / М. Генри // Датчики и системы. – 2002. – № 1. – С. 12–20.

19. Гудков, К.В. Обработка результатов измерений кориолисова расходомера / К.В. Гудков, Л.В. Куц, А.А. Кузнецов // Труды международной научно-

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		96

технической конференции «Современные информационные технологии». – Пенза: ПГТА, 2010. – С. 45–47.

20. Дружинин, И.И. Контроль метрологических характеристик, встраиваемых в агрегаты вихретоковых преобразователей / И.И. Дружинин, В.В. Кочугуров // Измерительная техника. – 1988. – № 11. – С. 37–38.

21. Дружинин, И.И. Метрологический самоконтроль в интеллектуальных датчиках удельной электрической проводимости жидкости // Материалы II российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (теория, методы, алгоритмы, исследования и разработки)». Тезисы докладов. ИПУ РАН. – М., 2010. – С. 422–429.

22. Евтюшенков, А.М. Исследование метрологических характеристик преобразователя давления «САПФИР-22Д» / А.М. Евтюшенков, Ю.Ф. Кияченко, А.В. Крюков // Измерительная техника. – 1989. – № 2. – С. 67–80.

23. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

24. Ибряева, О.Л. Оптимизация частоты дискретизации сигнала при использовании метода Прони / О.Л. Ибряева, А.С. Семенов, А.Л. Шестаков // Доклады 13-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA–2011», Москва. – 2011. – Вып. XIII, Т. 1. – С. 108–110.

25. Иванов, Ю.В. Установка для анализа ударного спектра виброударных импульсов / Ю.В. Иванов, В.П. Трофимов // Измерительная техника. – 1985. – № 3. – С. 23–26.

26. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учебное пособие / В.А. Бруйка. – Самара: СГУ, 2010. – 271 с.

27. Иосифов, В.П. Алгоритм Берга в задачах спектрального оценивания коротких откликов датчиков / В.П. Иосифов, К.А. Алексеев // Приборы и системы управления. – 1999. – № 7. – С. 28.

					ИОУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		97

28. Исмибейли, Р.Э. Моделирование магнитных элементов и устройств методом конечных элементов / Р.Э. Исмибейли // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 4. – С. 21–27.
29. Катус, Г.П. Массовые расходомеры. /Г.П. Катус. – М.: Энергия, 2003. – 85 с.
30. Каюков, И.В. Сравнительный анализ различных методов оценки частоты сигнала / И.В. Каюков, В.Б. Манелис // Радиоэлектроника. – 2006. – № 7. – С. 190–198.
31. Кирюшин, О.В. Управление техническими системами: курс лекций / О.В. Кирюшин. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. – 80 с.
32. Козлов, А.И. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Одномембранные преобразователи / Козлов А.И., Пирогов А.В., Стучебников В.М. // Датчики и системы. – 2008. – № 1. – С. 6–11.
33. Юрманов, В.А. Математическое моделирование Кориолисова расходомера / В.А. Юрманов, К.В. Гудков, А.В. Люсев. – Пенза: ПГТА, 2011. – 129с.
34. Amadi-Echendu, J.E. Analysis of signals from vortex flowmeters / J. E. Amadi-Echendu, H. Zhu, E. H. Higham // Flow Meas. Instrum. – 1993. – № 4. – pp. 225–231.
35. Amadi-Echendu, J.E. Signal analysis applied to detect blockages in pressure and differential pressure measurement systems / J.E. Amadi-Echendu, H. Zhu, E.H. Higham // IMTC '94 May 10-12, Hamamatsu. – 1994. – № 3. – P. 741–744.
36. Baksheeva, Yu. Metrological Self-Check of Platinum Resistance Thermometer / Yu. Baksheeva, K. Sapozhnikova, R. Taymanov // The 8th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia, 27–30 April, 2011. – P. 141–144.
37. Barberree, D. Dynamically self-validating contact temperature sensors / D. Barberree // Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry. AI Conference Proceedings. Ripple D. C. – № 7. – 2003. – P. 1097–2001.
38. Beard, R.V. Failure accomodation in linear systems through self-reorganisation: Technical Report / R.V. Beard. – Cambridge: Man Vehicle Lab, 1971. – 315 p.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		98

39. Beeby, S.P. Microprocessor implemented self-validation of thickfilm PZT/silicon accelerometer / S. P. Beeby, N. J. Grabham, N. M. White // Sensors and Actuators A: Physical. – 2001. – № 92. – P. 243–249.

40. Buimistriuck, G. Y. Intelligent fiber optic pressure sensor for measurements in extreme conditions / G.Y. Buimistriuck, A.M. Rogov // 1st International Conference ‘Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurements Methods and Applications’. ANIMMA, Marseille: France, 7–10 June 2009, P. 224–229.

41. Clark, R. A simplified instrument detection scheme. / R. Clark // IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems. – 1990. – № 14. – P.18–20.

42. Clarke, D.W. Model-based validation of a DO_x sensor / D.W. Clarke, P.M.A. Fraher // Control Engineering Practice. – 1996. – № 9. – P. 1313–1320.

43. Ding, E.L. Model-based diagnosis of sensor faults for ESP systems / E.L. Ding, H. Fennel, S.X. Ding // Control Engineering Practice. – 2004. – № 12. – P. 17–25.

44. Ding, S.X. (2000). A unified approach to the optimisation of fault detection systems. / S.X. Ding, T. Jeansch, P.M. Frank, E.L. Ding // Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing. – 2000. – № 14. – P. 725–745.

45. Du, Z. Detection and diagnosis for sensor fault in HVAC systems / Z. Du, X. Jin // Energy Conversion and Management. – 2007. – № 48. – P. 48.

46. Du, Z. Fault diagnosis for temperature, flow rate and pressure sensors in VAV systems using wavelet neural network / Z. Du, X. Jin, Y. Yang // Applied Energy. – 2009. – № 86. – P. 1624–1631.

47. Du, Z. Multiple faults diagnosis for sensors in air handling unit using Fisher discriminant analysis / Z. Du, X. Jin // Energy Conversion and Management. – 2008. – № 49. – P. 439–478.

48. Edwards, C. Sensor fault tolerant control using sliding mode observers / C. Edwards, C. P. Tan // Control Engineering Practice. – 2006. – № 14 – P. 98–101.

49. Jevtic, M.M. Diagnostic of silicon piezoresistive pressure sensors by low frequency noise measurements / M.M. Jevtic, M.A. Smiljanic // Sensors and Actuators A: Physical. – 2008. – № 144. – P. 18–30.

					ИОУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		99

50. Jevtic, M.M. Diagnostic of flowmeters / M.M. Jevtic, M.A. Smiljanic // Sensors and Actuators A: Physical. – 2008. – № 145. – P. 36–39.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		100

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Спектральный анализ

```
function [sp,ffs] = spfft (fs,signal,fig_mode)
% spfft FFT with required parameters
%   spfft (fs,signal,fig_mode)
%
%   Inputs:
%   fs      - sampling frequency
%   signal  - signal to analyze, must be a column, if signal is a
%            matrix, then fft will be applied to each coloumn
%   fig_mode - variable that tells whether to plot or not to plot
%            if fig_mode=0, then it does not plot a graph, in other case
%            it plots on figure(fig_mode)
%
%   Outputs:
%   sp      - Square of FFT spectrum of a signal (y-axis)
%   ffs     - Frequencies (x-axis)

qwe=signal;
[a,b]=size(qwe); % a is number of rows, b is number of columns
% each column should be an observation of the signal
% a is number of samples of each observation
meanqwe=mean(qwe);
for k=1:b
    qwe(:,k)=qwe(:,k)-meanqwe(1,k); % delete mean
end

Nfft = a; % must be even

y=fft(qwe,Nfft);
Pyy = y.* conj(y)/Nfft;
ff = (fs*(0:(Nfft-1))/Nfft)';

sp=Pyy(1:Nfft/2,:);
ffs=ff(1:Nfft/2);

if fig_mode~=0
    spnorm=zeros(size(sp));
    spmax=max(sp);
    for k=1:size(sp,2)
        spnorm(:,k)=sp(:,k)/spmax(1,k);
    end
    figure(fig_mode);
    plot(ffs,spnorm);
    %xlim([1 200]);
end
end
```

					ИОУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		101

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Программа работы с проливочным стендом

```
clear all
close all

A=cell(1,15);

num=15;
delay=zeros(1,num);

    for n=1:num

        if n==1
            filename = 'Nol_1';
        else
            filename = sprintf('Analyzer Default (%d)', n);
        end

        str1=strcat('C:\Users\Oleg\Documents\MATLAB\222\',filename,'.mat');
        load(str1);

        R=C5_Coil_Right.y_values.values;
        L=C6_Coil_Left.y_values.values;
        C=C7_Coil_Central.y_values.values;

        a=zeros(length(R),1); % zero-line
        figure (n); plot(1:5000, [R(1:5000),L(1:5000),a(1:5000)]); xlim([1 500]);
        grid on; title(filename);

        A{n}=[R,L,C];

        %str2=strcat('For ', filename, '\n x1 = ');
        %x1=input(str2);

        %
        %       for k=50:150
        %
        %           if R(k)*R(k+1)<0
        %               x1=k;
        %           end
        %       end
        %       x2=x1+1;
        %
        %       delay(n)=(L(x1)*x2-L(x2)*x1)/(L(x1)-L(x2))- (R(x1)*x2-R(x2)*x1)/(R(x1)-
        R(x2))

        end

fs=20480; for n=1:15 [spR(:,n),ffs]=spfft(fs,A{n}(:,1), n+100); end
load('C:\Users\Oleg\Documents\MATLAB\222\nol2real.mat');
R=C5_Coil_Right.y_values.values;
L=C6_Coil_Left.y_values.values;
C=C7_Coil_Central.y_values.values;
A{16}=[R,L,C];
fs=20480; for n=16 [spR(:,n),ffs]=spfft(fs,A{n}(:,1), n+100); end
fs=20480; for n=1:16 [spL(:,n),ffs]=spfft(fs,A{n}(:,2), n+200); end
for n=1:16 allR(n)=A{n}(:,1); end
for n=1:16 allR(:,n)=A{n}(:,1); end
```

					ИОУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		102

```

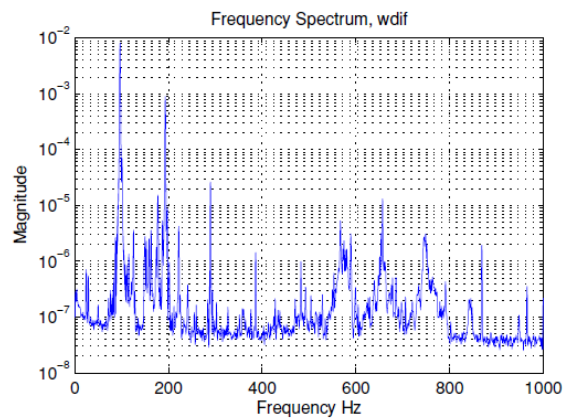
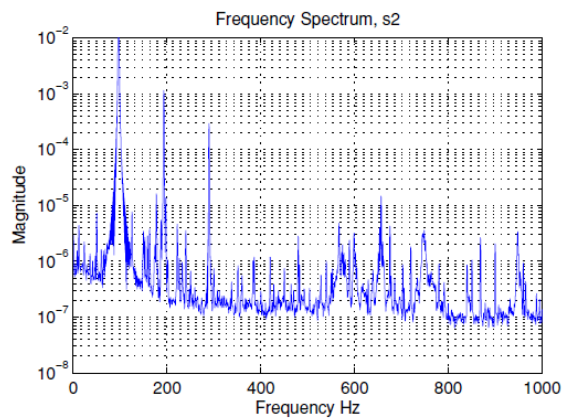
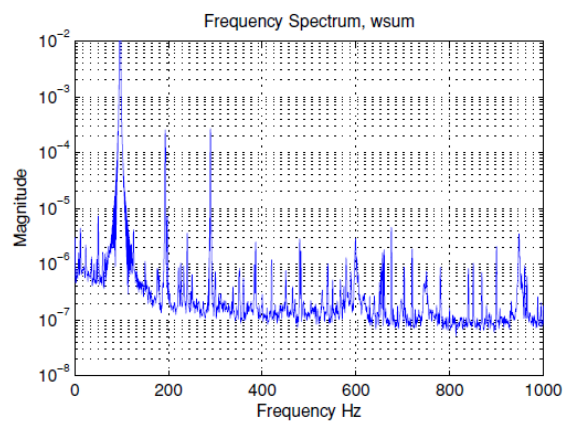
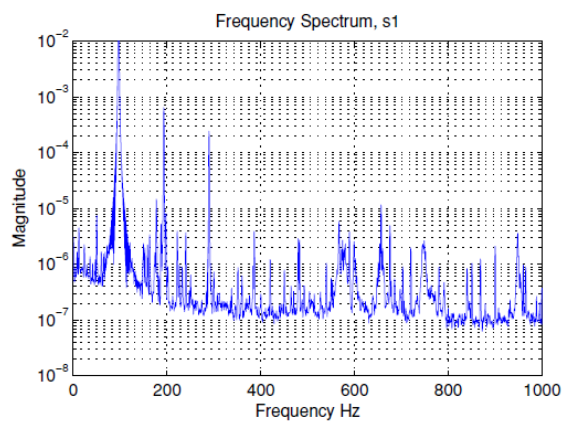
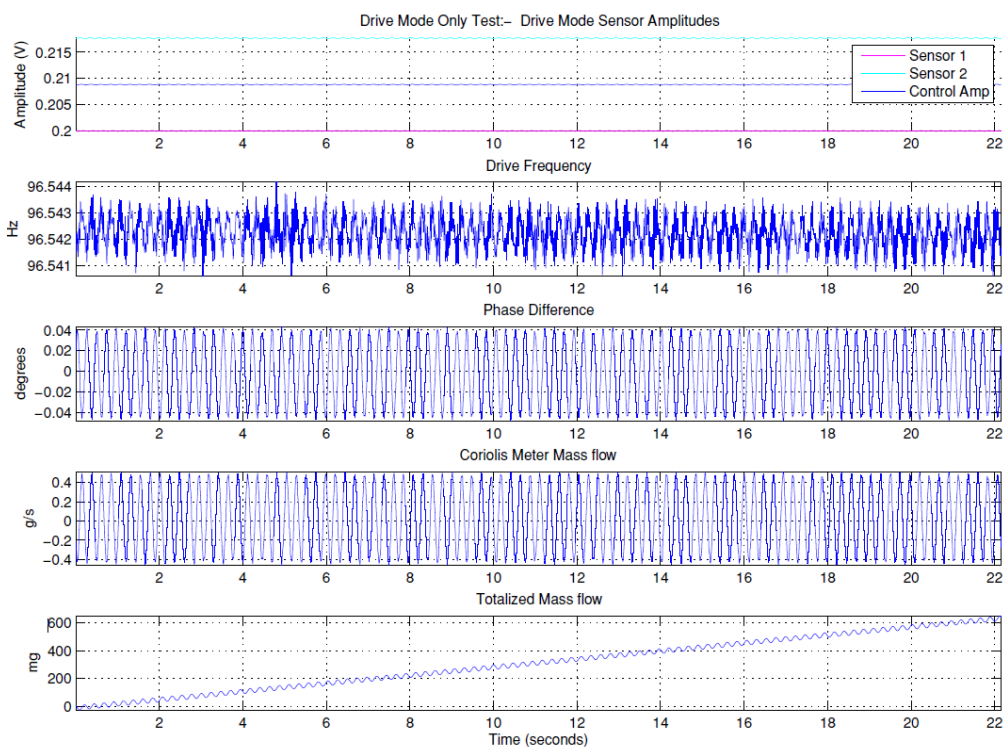
for n=1:16 allL(:,n)=A{n}(:,2); end
for k=1:204800 x(k)=(k-1)/fs; end
x=x';
a=zeros(204800,1); % zero-line
figure (100); plot(1:204800, [allR(:,2),allL(:,2),a]); xlim([1 5000]); grid on;
figure (101); plot(1:204800, [allR(:,2),allL(:,2),a]); xlim([1 5000]); grid on;
phiL=[];for n=1:16 ii=0; for k=1:204799 if (allL(k,n)*allL(k+1,n)<=0 &
allL(k+1,n)~=0) ii=ii+1; phiL(ii,n)=(x(k)*allL(k+1,n)-
x(k+1)*allL(k,n))/(allL(k+1,n)-allL(k,n)); end; end; end
phiR=[];for n=1:16 ii=0; for k=1:204799 if (allR(k,n)*allR(k+1,n)<=0 &
allR(k+1,n)~=0) ii=ii+1; phiR(ii,n)=(x(k)*allR(k+1,n)-
x(k+1)*allR(k,n))/(allR(k+1,n)-allR(k,n)); end; end; end
delay=phiR-phiL;
mcsdelay=delay*1000000;
m=mean(abs(mcsdelay));
save mcsdelay
csvwrite('mcsdelay.csv',mcsdelay)

```

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		103

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Программа обработки экспериментальных данных



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-522.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		105