

На правах рукописи

БУЯНОВ Сергей Игоревич

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИССЛЕДОВАНИЙ И
НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ АНЕМОМЕТРОВ И
СПИРОМЕТРОВ

Специальность: 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель к.т.н., доц. Калашников Е.А.

Москва 2026

Оглавление

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТОЯНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ.....	9
1.1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ АНЕМОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ.....	9
1.2. ОБЗОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СКОРОСТЕЙ ПОТОКОВ.....	11
1.3. АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ПОТОКОВ.....	14
1.4. ПЕРСПЕКТИВЫ И ЗАДАЧИ АКУСТИЧЕСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ.	17
2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ АНЕМОМЕТРОВ, РАБОТАЮЩИХ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ	21
2.1. МОДЕЛЬ РАБОТЫ АКУСТИЧЕСКОГО АНЕМОМЕТРА В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	21
2.1.1. <i>Фазовый метод измерения скорости потока.....</i>	<i>21</i>
2.1.2. <i>Распространение акустической волны в анемометрическом канале в непрерывном режиме излучения</i> 23	
2.2. ПОГРЕШНОСТИ ФАЗОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА	29
2.2.1. <i>Погрешности, связанные с изменением скорости звука</i>	<i>29</i>
2.3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДОВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА В АНЕМОМЕТРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ.....	31
2.3.1. <i>Распространение импульса в бесконечном цилиндрическом волноводе.....</i>	<i>31</i>
2.3.2. <i>Распространение импульса, отраженного от концов волновода.</i>	<i>37</i>
2.4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО АНЕМОМЕТРА.	40
2.5. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИЁМНИКА ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО АНЕМОМЕТРА.....	43
3. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ АНЕМОМЕТРОВ, РАБОТАЮЩИХ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ	46
3.1. БЛОК АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ СИГНАЛА АСНИ.	47
3.2. БЛОК АКУСТИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА АСНИ.	51
3.3. БЛОК АНЕМОМЕТРИЧЕСКОГО КАНАЛА АСНИ.	52
4. ПРИМЕНЕНИЕ АСНИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АКУСТИЧЕСКОГО АНЕМОМЕТРА И СПИРОМЕТРА.	54
4.1. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ АНЕМОМЕТРОВ/СПИРОМЕТРОВ.	54
4.2. ИССЛЕДОВАНИЯ АЧХ И ФЧХ КОЛЕЦ ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ВЛАЖНОСТИ.	60
4.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ИЗЛУЧАТЕЛЯ	70
4.4. СИГНАЛ НА ПРИЕМНИКЕ, КАК ФУНКЦИЯ ВРЕМЕНИ	77
5. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО АНЕМОМЕТРА, РАБОТАЮЩЕГО В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ИЗЛУЧЕНИЯ	85

5.1.	ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ..	85
5.2.	СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРИБОРА.	91
5.3.	ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ АКУСТИЧЕСКОГО АНЕМОМЕТРА, РАБОТАЮЩЕГО В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ИЗМЕРЕНИЯ.	92
5.4.	РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ	97
5.5.	ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА НА ФАЗУ ПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА.	100
5.6.	<i>Погрешности импульсного метода измерения.</i>	<i>103</i>
5.6.1.	<i>Погрешность, связанная с реализацией схемотехнических решений.</i>	<i>103</i>
5.6.2.	<i>Погрешности метода измерения, связанные с неодновременностью прозвучивания канала в разные стороны.....</i>	<i>103</i>
5.6.3.	<i>Погрешность, вызывающая дрейф нуля.</i>	<i>106</i>
5.7.	ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНЕМОМЕТРА	107
5.7.1.	<i>Переходные характеристики анемометра</i>	<i>107</i>
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		109
ЛИТЕРАТУРА.		110
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ.		120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ О ВНЕДРЕНИИ		121
ПРИЛОЖЕНИЕ В. СВИДЕТЕЛЬСТВО ОБ УТВЕРЖДЕНИИ ТИПА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ.		122
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ПРОГРАММА ПРИЁМА ДАННЫХ, КОНТРОЛЯ И НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ ДАТЧИКОВ, РАБОТАЮЩИХ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ.		129

Введение

Актуальность работы

Измерение скоростей газоздушных потоков является актуальной задачей в различных отраслях жизнедеятельности человека: проветривание помещений, вентилирование рабочего пространства, проветривание подземных предприятий, медицина, промышленность, метеорология. Современные требования к техническим характеристикам измерительных приборов требуют новые решения для обеспечения номенклатуры приборов и соответствие их требованиям заказчика.

Для различных целей требуются различные по характеристикам и геометрическим размерам приборы. Диапазон применения анемометров и спирометров очень большой. Для одних целей необходимы приборы с широким динамическим диапазоном измерения такие как анемометры, контролирующие вентиляцию в шахтах или с небольшим динамическим диапазоном, но высокими точностными характеристиками, например, в промышленном производстве [8], где-то нужны большого размера приборы, а где-то наоборот малый размер имеет большое значение. Приборы могут использоваться как анемометры в открытом пространстве, например, в метеорологии или как расходомер в спирометрах, где прибор измеряет расход газоздушной смеси в трубе.

Приборы различаются по принципу действия: тахометрические, термоанемометры, анемометры, измеряющие разность статического и динамического давления в потоке, оптические, корреляционные, акустические. Сравнительный анализ показал, что наиболее перспективным является акустический принцип измерения скоростей. Это связано с простотой в использовании, долговечностью, компактностью, высокой точностью, надежностью, безынерционностью акустических анемометров. Кроме того, акустика даёт возможность измерять среднюю по пути акустического луча скорость потока.

Основным недостатком акустических измерений является зависимость параметров акустического сигнала от изменений параметров среды: температуры, влажности, давления, состава газа. Однако современные алгоритмы и методы обработки информации при измерении скорости потока акустическим методом позволяют устранить зависимости показаний прибора от данных параметров. Поэтому разработка автоматизированной системы проектирования и настройки акустических анемометров является актуальной научной задачей.

Цель работы заключается в создании инструмента исследования модового распространения акустических колебаний внутри волновода-воздуховода, возникающих в анемометрическом канале при импульсном способе измерения и проектирование с его помощью широкого спектра различных приборов.

Для реализации поставленной **цели** потребовалось решить следующие **задачи**:

- найти оптимальный способ излучения акустического сигнала, позволяющий разделить по времени прихода различные гармонические составляющие сигнала – моды, а также прямой и отраженный сигналы, что позволит повысить точность измерения.
- Построить математическую модель модового распространения акустических колебаний в импульсном режиме измерения.
- Разработать аппаратно-программный комплекс для автоматизированной системы научного исследования акустических анемометров и спирометров.

Объект исследования – процесс распространения акустических колебаний внутри волновода-воздуховода в анемометрах/спирометрах с модовым распространением сигнала.

Основные научные положения, разработанные лично соискателем, и новизна

1. Разработан импульсный метод измерения позволяющий разделить во времени модовые составляющие принимаемого сигнала, что дает возможность обработки сигнала, очищенного от помех.
2. Построена математическая модель распространения акустических колебаний в волноводе-воздуховоде в импульсном режиме измерения
3. Разработана автоматизированная система научных исследований для приборов, работающих в импульсном режиме измерения модового распространения акустических колебаний, учитывающая все влияющие на процесс измерения составляющие – геометрические размеры прибора, метрологические характеристики и среда измерения.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- подтверждением теоретических зависимостей распространения акустического сигнала в волноводе-воздуховоде результатами экспериментов.
- метрологическими испытаниями приборов во ФГУП «ВНИИМ им. Менделеева».
- наличием акта о внедрении аппаратно-программного комплекса, для проектирования анемометров серии АПА-1 (Приложение Б);
- наличием свидетельства об утверждении типа средств измерений (Приложение В):
 - RU.C.28.001.A № 45849 на анемометры портативные акустические АПА-1;
 - RU.C.28.001.A № 49696 на установку аэродинамическую А-02;
 - RU.C.29.001.A № 38384 на преобразователь расхода акустический «Спиросенс»;
- наличием патента на изобретение № 2284015 на «Способ измерения расхода потока и устройство для его осуществления» [48] (Приложение А).

Научная новизна полученных результатов исследования состоит:

- в предложенном и обоснованном импульсном способе обработки сигнала применительно к акустическому тракту анемометра или спирометра, позволившем исключить наложение дополнительных сигналов на результат измерения;
- в разработке математической модели импульсного метода измерения акустического анемометра с учётом изменения параметров измеряемой среды;
- в разработке программно-алгоритмического обеспечения расчёта и настройки акустических анемометров позволяющего на его основе создавать приборы для различных применений.

Практическая ценность работы

заключается в создании автоматизированной системы научных исследований для акустических анемометров, работающих в импульсном режиме, с различными техническими характеристиками предназначенные для применения в различных отраслях жизнедеятельности человека позволяющей автоматизировать проектирование;

Реализация работы.

- Разработана автоматизированная система научных исследований на базе математической модели акустических анемометров и спирометров.
- Разработанная автоматизированная система научных исследований использовалась при проектировании экспериментальных образцов акустического анемометра для угольной промышленности типа АПА, выпускающихся ЗАО ЦНИИ «ВОЛНА».
- Разработаны аэродинамические установки:
 - А-02н низкоскоростная прямоточная аэродинамическая установка для скоростей до 3 м/с;
 - А-02в высокоскоростная прямоточная аэродинамическая установка для скоростей до 30 м/с;

- А-02з установка аэродинамическая замкнутого типа для скоростей до 30 м/с;

Апробация работы.

Основные положения диссертации докладывались на научном семинаре «Приборы и системы безопасности» («Неделя горняка» МГГУ 2001г., 2003г., 2010 г., 2013г., МИСИС 2026г.), обсуждались на научных семинарах кафедры Инфокоммуникационных Технологий МИСИС.

Принимал участие в конкурсах:

- BRUSSELS EUREKA 2001 – золотая медаль 16.11.2001. Анемометр акустический портативный АПА-1.
- Диплом «ЭКСПО-УГОЛЬ 2003» международная выставка-ярмарка. За лучший экспонат «анемометр портативный акустический АПА-1».
- INTERNATIONAL TRADE FAIR “IDEAS-INVENTIONS-NEW PRODUCTS” NUREMBERG. Золотая медаль 7.11.2009. Flow rate measurement means and device for it`s implementation.
- Диплом и бронзовая медаль IX Московского международного салона инноваций и инвестиций. Экспонат: Спироанализатор акустический «Спирит-1».
- Диплом и бронзовая медаль «Лучший экспонат», проводимый в рамках XVIII Международной специализированной выставки «УГОЛЬ РОССИИ и МАЙНИНГ 2011» и II специализированной выставки «ОХРАНА, БУЗОПАСНОСТЬ ТРУДА И ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ»
- Диплом «Золотые инновации России и стран СНГ». За лучшую маркетинговую подготовку инновационного проекта «Анемометр портативный акустический АПА-1».

Публикации.

По результатам диссертационного исследования опубликовано 11 научных статей, в том числе 2 в Scopus, 2 в международных журналах, 9 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, принимал участие в 2 конференциях.

Объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (102 наименований).

1. Состояние акустической анемометрии.

1.1. Сравнительный анализ приборов анемометрического контроля.

Современные требования к техническим характеристикам измерительных приборов охватывают большой диапазон применений. Для проветривания подземных шахт требуются качественные средства измерения, соответствующие всё более жёстким нормативам [1,2,7]. Повышаются требования к метрологическому обеспечению по поверке этих приборов. Поверка приборов, измеряющих газовоздушные потоки, осуществляется в аэродинамических установках [71,72]. Для повышения точности такой метрологической установки необходимо использовать измерительное устройство, с высокими точностными характеристиками – в несколько раз выше поверяемых приборов. Современные спирометры позволяют диагностировать на ранних стадиях заболевания органов дыхания [99]. От точностных характеристик средств измерения зависит качество поставленного диагноза [75,96]. В отличие от большинства анемометров, наибольшее значение в спирометрии имеет безынерционность измерения [98].

Приборы различаются по принципу действия [3]: тахометрические, термоанемометры, анемометры, измеряющие разность статического и динамического давления в потоке, оптические, корреляционные, акустические.

Анализ особенностей современных анемометров показывает, что недостатки приборов вызваны самими методами измерения скорости потока, лежащими в основе их работы. В тахометрических анемометрах вращающий момент, который возникает на крыльчатке под действием контролируемого потока, с помощью механических, индукционных или др. преобразователей преобразуется в информативный сигнал. Приборы такого типа не могут обеспечить измерений в нижней части диапазона скоростей из-за сил трения, препятствующих вращению оси. Основным элементом тахометрических анемометров – крыльчатка, должна быть, с одной стороны, легкой, чтобы обеспечить малый порог трогания, а с другой стороны, как можно более прочной, чтобы не деформироваться под действием потока. В термоанемометрах используется эффект охлаждения нагретого тела, помещенного в поток. Характеристики термоанемометров нелинейны, их особенность – потеря чувствительности в верхней части диапазона измерений. В качестве нагретого тела чаще применяют нить, нагреваемую электрическим током. Эта нить должна быть как можно тоньше, чтобы уменьшить инерцию термоэлемента, а с другой стороны, тонкая нить подвержена влиянию вихревых образований потока.

Сравнительный анализ показал, что наиболее перспективным является акустический принцип измерения скоростей. Это связано с простотой в использовании, долговечностью, компактностью, высокой точностью, надежностью, безынерционностью акустических анемометров. Кроме того, акустика даёт возможность измерять среднюю по пути акустического луча скорость потока.

Основным недостатком акустических измерений является зависимость параметров акустического сигнала от изменений параметров среды: температуры, влажности, давления, состава газа. Однако современные алгоритмы и методы обработки информации при измерении скорости потока акустическим методом позволяют устранить зависимости показаний прибора

от данных параметров. Поэтому разработка таких алгоритмов является актуальной научной задачей.

1.2. Обзор методов контроля скоростей потоков

Перспективность того или иного направления повышения качества анемометрии и спирометрии в основном определяется физическим принципом, заложенным в основу действия прибора, измеряющего скорость или расход воздуха. Рассмотрим различные методы измерения расхода или скорости потока и тенденции в развитии каждого направления.

Приборы, измеряющих скорость воздушного потока, классифицируются по принципу измерения, где можно выделить пять групп по методу измерения скоростей воздушных потоков [3,5,6,7]:

1. на основе использования энергии потока;
2. на основе переноса потоком тепла от нагретого элемента;
3. на основе измерения скорости невесомой метки, введённой в поток;
4. оптические;
5. корреляционные;

К приборам первого типа относятся приборы, работающие по следующим принципам:

1. перепад давлений;
2. измерение крутящего момента;
3. явление обтекания;

Трубки Пито работают на перепаде давления. В основе принципа измерения лежит измерение разности статического и динамического давления в потоке которая пропорциональна скорости потока. Статическое давление направлено перпендикулярно потоку, динамическое – против потока. Приборы данного типа отличаются высокой точностью и используются, как правило, в лабораториях. К этому же типу измерительных приборов относятся расходомеры переменного перепада давления с сужающими устройствами, используемые на электростанциях [8].

Очень распространены во многих отраслях жизнедеятельности человека тахометрические анемометры. В них энергия потока преобразуется в энергию вращения датчика. Они делятся на крыльчатые и чашечные. Метод измерения скорости потока основан на том, что последняя пропорциональна скорости вращения датчика (крыльчатки). Это очень старый принцип измерения, которому насчитывается более трёх веков. Он до сих пор используется практически без изменений. Изменениям подвергается, в основном, способы съёма и отображения информации. Отечественные разработки в данной области — это анемометры АСО-3, АП-1, АТТ-1002 и АПР-4, для метеорологических исследований М-95М-Ц (анемометр с дистанционно удалённым датчиком). Иностранные фирмы также производят анемометры данного типа, такие как чашечный анемометр VORTEX Pro-1200™, и т.д. По данным [9] об импорте расходомеров в 2002 году тахометрические (в том числе крыльчатые и турбинные) расходомеры составляет около 7% всего импорта.

Методы, использующие явление обтекания, используются в вихревых расходомерах [10]. Их принцип действия основан на образовании вихрей за препятствием (телом обтекания), стоящим на пути потока. При превышении скорости среды выше определенного предела вихри за телом обтекания образуют «дорожку Кармана». Частота образования вихрей прямо пропорциональна скорости потока. Как указывалось в [10] этот принцип удобно использовать для потоков с числами Рейнольдса в диапазоне от $4 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^5$, поскольку в этом диапазоне коэффициент пропорциональности между частотой образования вихрей и скорости потока практически не зависит от числа Рейнольдса. Такие датчики используются в газопроводах при больших скоростях потока и малых сечениях трубы.

Приборы второго типа (перенос тепла) делятся на:

1. термоанемометры — измеряют температуру нагретого тела, помещаемого в поток;

2. теплокалориметры – измеряют температуру потока, нагреваемого нагревателем;

Термоанемометры обладают очень высокой точностью на маленьких скоростях измеряемой среды – до 5 м/с. Поэтому их используют при проведении экспериментальных исследований, при поверке других анемометров в нижнем диапазоне скоростей. Их применение целесообразно в тех случаях, когда необходимо точно измерить маленькие скорости, например, для оценки способности зданий сохранять тепло [11]. В угольных шахтах термоанемометры используются в комбинации с анемометрами другого типа.

Третья группа, работающая с метками в потоке, подразделяются по следующим методам работы с метками:

1. впрыскивание в поток порции иного состава, цвета;
2. использование намагничивания;
3. использование ионизации;
4. акустические (условно);

Акустический метод является условным, полагая акустическую волну невесомой меткой. Ввиду особого интереса к акустическим методам рассмотрим его ниже, посвятив ему следующий параграф. Об остальных методах данной группы упоминаний в литературе последних лет не найдено, видимо эти направления сейчас не разрабатываются.

Корреляционные расходомеры из четвёртой группы [5] работают на принципе измерения корреляции двух случайно изменяющихся величин в различных сечениях потока, расположенных на определённом расстоянии друг от друга. Теоретическое обоснование корреляционного принципа измерения приводится в [12]. Этот принцип измерения в основном используется для измерения потоков, имеющих какие-либо неоднородности и скоростей многофазных потоков. К особенностям корреляционных измерений можно отнести длительность процесса измерения и необходимость иметь достаточно протяженный прямой участок воздуховода перед

преобразователем расходомера, точность метода составляет не менее 1,5-2%. Плохая метрологическая проработка методики измерения. В ряде случаев отсутствуют и другие нормативные документы.

Оптические приборы из пятой группы, предназначенные для измерения газоздушных потоков, используют доплеровский эффект лазерного излучения. Здесь измеряется разность частот, возникающая при отражении светового луча движущимися частицами потока [13]. Этот принцип измерения отличается высокой точностью и быстродействием, отсутствие механического контакта с измеряемым потоком. К недостаткам оптических приборов можно отнести их сложность и дороговизну, в связи с чем область применения ограничена специальными исследовательскими лабораториями для измерения местных скоростей жидкости и газа.

1.3. Акустические методы измерения скоростей потоков

Принцип действия акустических расходомеров, основан на измерении зависимости какого-либо эффекта при проходе акустических волн через измеряемый газоздушный поток [14,15,16].

Изначально идея применения акустического принципа измерения была реализована для жидкостей, где коэффициент поглощения звука в сотни раз меньше, чем у газа, а акустическое сопротивление жидкости в тысячи раз больше чем в газе, скорости распространения акустической волны в жидкой среде очень сильно отличаются от скорости потока по сравнению со скоростями распространения в газе, где они соизмеримы.

Акустические расходомеры подразделяются на два способа измерения – на эффекте Доплера, где регистрируется изменение частоты колебаний, возникающей при отражении от неоднородностей потока и на перемещении акустических колебаний движущейся средой.

Акустические расходомеры как правило измеряют время прохождения акустических колебаний по и против потока. Существуют приборы,

измеряющие акустические колебания перпендикулярно к потоку, а измеряется отклонения этих колебаний от первоначального направления.

В качестве источников и приемников акустических колебаний используются пьезоэлектрические преобразователи с прямым и обратным пьезоэффектом, то есть преобразуют изменение своего напряжения в акустические колебания той же частоты и наоборот. Как правило излучатели и приемники располагают в преобразователе под некоторым углом к направлению потока. Таких измерительных каналов может быть несколько – одно-, двух- и многоканальные расходомеры. Для размещения излучателя и приёмника используются специальные впадины в корпусе датчика внутри которых помещены пьезоэлементы.

Существуют много методов определения скорости воздушных потоков с использованием ультразвуковых колебаний [22,23]. По способу контроля измеряемой величины акустические расходомеры подразделяются на времяимпульсные, фазовые и частотные принципы измерения. Самым точным считается фазовый способ измерения, где сразу измеряется разница фаз приёма акустических колебаний по и против потока.

В частотном способе измерения частота измерения сигнала пропорциональна скорости потока, так как измерительный сигнал отправляется сразу после приёма его на приёмнике. Примером подобного измерителя является стационарный анемометр СДСВ 01 производимый в Екатеринбурге, где частота автоциркуляции находится в функциональной зависимости от скорости воздушного потока.

Времяимпульсный способ измерения фиксирует время распространения коротких импульсов от излучателя к приёмнику по и против потока. Во всех способах неизменным является расстояние, проходящее акустическими колебаниями между датчиками по и против потока.

Так как акустические методы измерения имеют маленькое по сравнению с контролируемым процессом время измерения, то можно создавать приборы

с минимальной инерцией, что актуально в некоторых применениях, например в спирометрах [96].

Важным направлением для применения акустической анемометрии в рамках нашей страны стало использование акустических анемометров в рудничной аэрологии ([15, 18]), где предполагалось измерять средний расход воздуха по прохождению акустического луча через сечение.

Впервые идею применения акустической анемометрии для создания переносного рудничного анемометра реализовал Шкундин С. З. в ИГД им. Скочинского [19]. Реализацией этой идеи явился прибор для измерения скорости воздушного потока фазовым акустическим методом.

В качестве излучателя и приёмника использовались кольцевые пьезоэлектрические преобразователи с внутренним диаметром, совпадающим с внутренним диаметром волновода-воздуховода. В результате датчик представлял из себя цилиндрическую трубку с встроенными в неё пьезоэлектрическими кольцами, с гладкой поверхностью без выступающих частей. Датчик состоял из трёх колец, среднее являлось излучателем, а два крайних кольца измеряли разницу фаз приёма акустических колебаний по и против потока. Электронный блок акустического анемометра содержал генератор импульсов высокой частоты, с помощью которых измерялся сдвиг фазы сигнала от излучателя к приёмнику [19]. Эти импульсы считывает счётчик. Устройство управления управляет счётчиком, а также подает измерительный сигнал на излучающее кольцо. Сигнал с приёмного кольца усиливается до необходимого уровня и поступает на компаратор, после чего попадает на устройство управления для последующей обработки. Вычисленное значение скорости поступает на устройство вывода. Наличие цифрового устройства управления позволяет скомпенсировать ряд погрешностей в процессе обработки результата.

Акустические анемометры отличаются:

- 1) безынерционностью;

- 2) высокой точностью;
- 3) отсутствием хрупких и движущихся частей;
- 4) относительно низкой стоимостью;
- 5) независимостью показаний от таких факторов, как изменение температуры, давления и газового состава, присутствия пыли и т.д., что делает акустический анемометр наиболее пригодным для работы в системе проветривания шахт [100,101,102].

Акустический метод измерения скорости воздушного потока успешно применяется в приборах, работающих не только в горной, но и в других отраслях промышленности. Последние разработки были связаны с метеорологией. Акустический анемометр, входящий в состав метеорологического комплекса, содержит три пары электроакустических преобразователей, расположенных в потоке по трем пространственным направлениям, и позволяет определять не только скорость, но и направление воздушного потока.

За рубежом проводились разработки акустического спирометра [20,21], конструкция которого сходна с конструкцией акустического анемометра, разработанного в МГГУ. Однако при интерпретации результатов испытаний не был учтен модовый режим распространения акустических волн в волноводе-воздуховоде, что привело к противоречию теории и эксперимента, и дальнейшего развития эта тема не получила.

1.4. Перспективы и задачи акустической анемометрии.

В МГГУ разработан ряд приборов акустической анемометрии, в частности, прибор, реализующий фазовый способ измерений [19]. Этот метод наиболее полно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к приборам данного типа.

Опишем фазовый акустический метод измерения скорости воздушного потока на примере одного из анемометров, сконструированных в лаборатории аэрологического контроля кафедры ЭИС МГГУ. Конструктивно прибор

состоит из цилиндрического датчика и электронного блока обработки сигнала. Анемометрический канал (рис.1.1) представляет собой трубку из металла или другого твердого материала, в стенке которой закреплены пьезокерамические кольца-преобразователи. Анемометрический канал помещается в поток, излучающее кольцо (1) под действием приложенного напряжения осциллирует в радиальном направлении с ультразвуковой частотой. На кольцах-приемниках (2, 3) приходящие акустические волны возбуждают гармонические колебания, фазы которых сравниваются в блоке электронной обработки. По разности фаз определяется скорость потока.

Для данного типа приборов существует математическая модель анемометрического канала, учитывающая его конечность. Модель даёт возможность получить численные значения акустического давления в анемометрическом канале, в частности, на принимающих преобразователях, рассчитать его геометрию и метрологию.

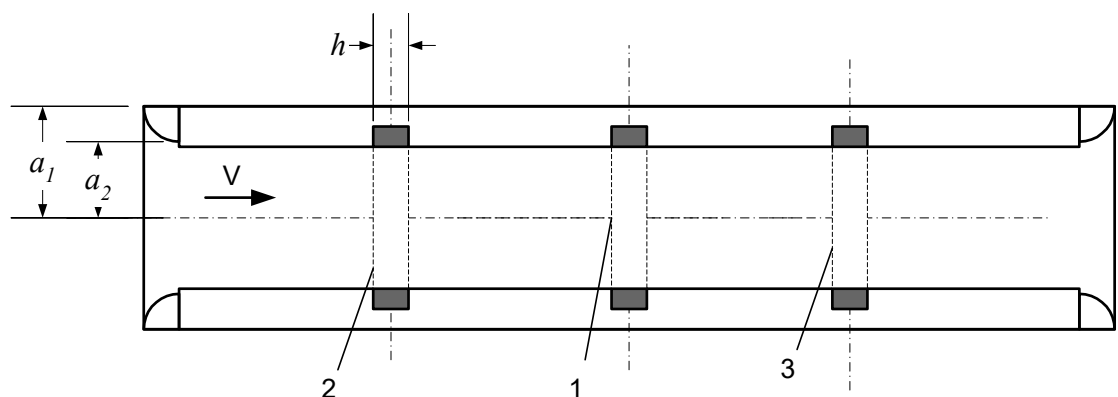


Рис. 1.1 Анемометрический канал

В соответствии с этой моделью акустическое поле внутри волновода характеризуется акустическим потенциалом. Акустический потенциал может быть представлен в виде бесконечной суммы нормальных мод акустического волновода. Каждая мода представляет собой бегущую вдоль оси волну и стоячую волну в направлении радиуса. Часть мод распространяются, а остальные экспоненциально затухают вдоль оси. Если источником является

пульсирующее кольцо, то амплитуды распространяющихся мод могут быть найдены по формуле:

$$A_n^{\pm} = \left| \frac{2V_0 \cdot \sin(s_n^{\pm} \cdot h) \cdot J_0\left(\frac{\mu_n r}{a_2}\right)}{s_n^{\pm} \cdot a_2 \cdot \sigma_n \cdot J_0(\mu_n) \cdot \theta_n} \right|, \quad (1.1)$$

$$\text{где } \sigma_n = \begin{cases} \sqrt{k^2 - \beta^2 \frac{\mu_n^2}{a_2^2}} & n \leq M_2 \\ -i \cdot \sqrt{\beta^2 \frac{\mu_n^2}{a_2^2} - k^2} & n > M_2 \end{cases}, \quad \theta_n = \begin{cases} 2 & n = 0 \\ 1 & n \neq 0 \end{cases},$$

$$s_n^{\pm} = \frac{kM \mp i\sigma_n}{\beta^2} \quad - \quad \text{волновые числа в положительном и отрицательном}$$

направлении соответственно, μ_n – корни уравнения $J_1(x)=0$, $J_0(x)$, $J_1(x)$ – функции Бесселя первого рода, нулевого и первого порядка, соответственно, V_0 – амплитуда колебательной скорости внутренней поверхности кольца источника, h – высота кольца излучателя, a_2 – внутренний радиус волновода, радиальная координата (расстояние до оси волновода), $k = \frac{\omega}{c}$, $M = \frac{V}{c}$,

$\beta^2 = 1 - M^2$, ω – угловая частота акустических колебаний, V – скорость потока, c – скорость звука в воздухе, M_2 – количество распространяющихся мод.

Так как волновые числа распространяющихся мод зависят от скорости потока одинаково, то теоретическая зависимость разности фаз от скорости потока будет линейной, характеристики анемометрического канала нелинейны, что приводит к необходимости рассмотрения отражения мод на открытых концах. Если распространяющаяся мода колебаний приходит к открытому концу канала, то отраженное поле можно разложить также в сумму нормальных мод. Если в падающей волне присутствует не одна, а все нормальные моды, то, учитывая отражение на обоих концах, получим, что акустический потенциал можно вычислить при помощи суммирования бесконечного числа отражений.

Задачей данной работы является проведение исследований акустического импульсного способа измерения скоростей потока и разработка на этой основе портативного анемометра, отвечающего требованиям, предъявляемым к переносным приборам. Фазовый способ измерения обладает рядом недостатков, которые предлагается решить, применив импульсный способ передачи сигналов от передатчика к приемнику.

Существует алгоритм компенсации погрешности, основанный на имеющейся математической модели распространения акустических волн, учитывающая отражение сигнала от торцов. На основе этой модели невозможно разработать алгоритм компенсации погрешности, связанной с изменением скорости звука из-за сложности полученных выражений. Из математической модели, акустического анемометра, работающего на постоянном излучении, видно, что на амплитуду акустического давления на приемнике влияет очень много факторов, которые находятся в очень сложной зависимости друг от друга. Это обстоятельство требует очень точного изготовления конструкции первичного преобразователя, и подбора самих датчиков. При реализации фазового метода измерения с использованием трех колец: одно излучает, два других – принимают, соответственно по и против потока. В этом случае используются два аналоговых тракта усиления и обработки принимаемых сигналов, с индивидуальными параметрами, что так же влияет на точность результата. Для импульсного сигнала задача обработки принятого сигнала значительно упрощается. Во-первых, в сигнале отсутствует наложение распространяющихся в канале мод, т. к. время распространения мод разное, и существует промежуток времени, где принимается только одна рабочая мода. Во-вторых, отраженный от торцов сигнал приходит после считывания информации. В-третьих, формулы для расчета скорости измеряемого потока, с учетом компенсации погрешности, связанной с изменением скорости звука, соответствуют вычислительной мощности контроллера, встроенного в прибор, что делает возможным компенсацию

погрешности в реальном масштабе времени. Помимо сложности расчётов в фазовом методе невозможно учесть ошибки реакции системы на внешние воздействия, например изменение температуры влечет за собой не только изменение скорости звука в среде, но и сдвиг фазовой характеристики пьезокерамического преобразователя, что приводит к ошибке в расчетах компенсации погрешности. Всё это показывает на несовершенство данного способа измерения и на необходимость разработать такой алгоритм работы акустического анемометра, в котором можно или исключить, или свести к минимуму упомянутые проблемы. Таким алгоритмом может стать импульсный способ излучения акустического сигнала. Смысл данного метода заключается в использовании разной скорости распространения мод, что приводит к разному времени их приема и возможности работы с модой без наложения их друг на друга.

2. Разработка математической модели для автоматизированной системы научных исследований акустических анемометров, работающих в импульсном режиме

2.1. Модель работы акустического анемометра в непрерывном режиме излучения.

2.1.1. Фазовый метод измерения скорости потока.

Датчик акустического анемометра представляет собой волновод-воздуховод с движущимся внутри потоком. Акустический сигнал распространяется от излучателя к приемнику по или против потока. Изменение фазы принимаемого сигнала пропорциональна скорости потока. На этом основывается фазовый акустический метод измерения скоростей потока [7].

Рассмотрим две модели фазового метода измерения скорости при непрерывном режиме излучения акустического сигнала. Первая модель, сильно упрощенная, позволяет пояснить на качественном уровне сам принцип,

а вторая позволяет получить акустическое поле в анемометрическом канале с учетом как модового распространения волн в волноводе, так и отражений от открытых концов волновода. Это позволит нам показать, что сдвиг фаз акустических сигналов, распространяющихся по и против потока пропорционален скорости потока, но коэффициент пропорциональности зависит от скорости звука и, следовательно, изменение внешних условий будет влиять на показания прибора, использующего фазовый метод измерения скоростей потока.

Поясним (с помощью первой модели) принцип работы анемометра на примере плоских волн p_+ и p_- , распространяющихся в противоположных направлениях параллельно воздушному потоку. Пусть направление скорости воздушного потока совпадает с положительным направлением координатной оси z (рис. 2.1). Пусть от источника, расположенного в начале координат, распространяются гармонические плоские волны p_+ и p_- , в положительном и отрицательном направлении, соответственно.

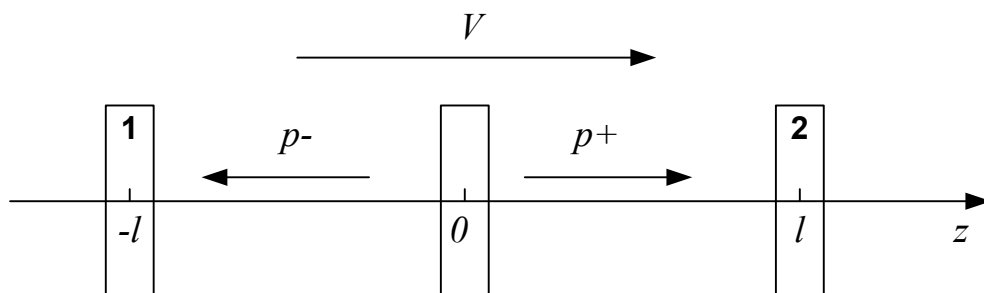


Рис. 2.1 К пояснению фазового способа измерения скорости потока

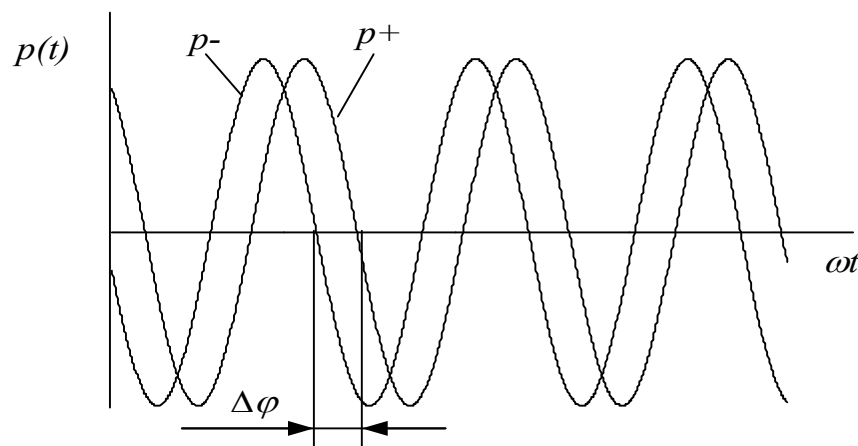


Рис. 2.2 Разность фаз акустического сигнала на преобразователях, расположенных по и против потока

При распространении плоской волны по потоку скорость потока складывается с фазовой скоростью, против потока – вычитается [34]. Фаза сигнала на приемнике 1 ($z=-l$) соответствует фазе сигнала, распространяющегося на расстояние l против потока.

$$\varphi_1 = \omega t - \frac{\omega l}{c - V},$$

здесь ω – угловая частота акустических колебаний, c – скорость звука в неподвижной среде, t – время.

На приемнике 2 ($z=l$) фаза соответствует фазе сигнала, распространяющегося по потоку.

$$\varphi_2 = \omega t - \frac{\omega l}{c + V}.$$

Разность фаз (см. рис. 2.2) $\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi = \omega l \left(\frac{1}{c - V} - \frac{1}{c + V} \right) = \omega l \frac{2V}{c^2 - V^2}$ при условии $V \ll c$ пропорциональна скорости потока: $\Delta\varphi \approx \omega l \frac{2V}{c^2}$.

Необходимо отметить, что для моделирования и получения численного результата необходимо учитывать модовое распространение акустических волн внутри анемометрического канала [20, 21].

Скорость звука в воздухе в нормальных условиях при комнатной температуре составляет около 343 м/с. Диапазон измерения скоростей потоков у анемометра находится в диапазоне от 0 до 30 м/с. Следовательно условие $V \ll c$ можно считать всегда выполняется, из чего следует, что фазовая характеристика анемометра линейна во всем динамическом диапазоне.

2.1.2. Распространение акустической волны в анемометрическом канале в непрерывном режиме излучения

Рассмотрим вторую модель, учитывающую основные особенности волновода, в том числе его длину и толщину.

Для создания модели распространения акустической волны в анемометрическом канале необходимо решить волновое уравнение в

движущейся среде [24] с граничными условиями, в той или иной степени соответствующими стенкам волновода-воздуховода. Волновое уравнение выводится из основной системы гидродинамики [25]. Эта система выписана относительно неизвестных функций $\rho(\vec{r}, t)$, $\vec{v}(\vec{r}, t)$, $p(\vec{r}, t)$ плотности, скорости, давления, соответственно ($\vec{r}$ – пространственные координаты, t – время).

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \nabla) \vec{v} + \nabla p = 0 \text{ – уравнение Эйлера} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \text{ – уравнение непрерывности} \quad (2.2)$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \text{ – уравнение адиабаты} \quad (2.3)$$

Мы пренебрегаем затуханием звука. Поэтому для вывода волнового уравнения используем уравнение Эйлера, т.е. уравнение для идеальной среды без вязкости. Как обычно для акустических колебаний, мы считаем процесс адиабатическим, а переменные составляющие характеристик среды считаем малыми по сравнению с постоянными.

$$p = p_0 + p', \rho = \rho_0 + \rho', \vec{v} = \vec{v}' + \vec{V} \quad (2.4)$$

$$\vec{v}' \ll \vec{V}, p' \ll p_0, \rho' \ll \rho_0.$$

Волновое уравнение для акустического потенциала в движущейся среде в однородном потоке, движущемся вдоль оси z имеет вид [24]:

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \frac{2M}{c} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial t} + \Delta \varphi - M^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (2.5)$$

где c – адиабатическая скорость звука, определяемая из выражения

$$c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s, \quad (2.6)$$

где индекс s указывает на дифференцирование при постоянной энтропии. Процесс распространения акустической волны не может быть адиабатическим из-за достаточно высокой частоты акустических колебаний анемометра.

Акустический потенциал $\varphi(\vec{r}, t)$ связан с давлением и колебательной скоростью следующим образом:

$$\vec{v} = \nabla \varphi, \quad p' = -\rho_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \rho_0 (\vec{V} \nabla) \varphi. \quad (2.7)$$

Волновое уравнение выведено для цилиндрической системы координат; постоянный, однородный воздушный поток направлен вдоль оси z в положительном направлении. Скорость потока $\vec{V} = (0, 0, V)$. Введены обозначения: $M = V/c$, Δ – оператор Лапласа (в цилиндрических координатах, в

случае аксиальной симметрии $\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$).

Стенки волновода предполагаются абсолютно жесткими, и поэтому граничным условием является равенство нулю колебательной скорости на стенках волновода. Источником акустических колебаний является кольцо, вмонтированное в стенку волновода. Кольцо отделено от стенки резиновой прокладкой, поэтому мы считаем кольцо свободно колеблющимся и не взаимодействующим со стенкой. Приближенно считаем внутреннюю поверхность кольца совершающей гармонические колебания, как одно целое, поскольку высота кольца мала по сравнению с длиной акустической волны, распространяющейся внутри волновода. В созданных ранее моделях рассматривался как раз непрерывный режим излучения, т.е. источник, совершающий гармонические колебания. Решение было представлено в виде распределения акустического потенциала в виде зависимости акустического давления на приемном преобразователе от параметров излучения и волновода. В [26, 27] приводится решение для бесконечного волновода, в [28, 29, 30] для волновода с бесконечно тонкими стенками конечной длины, в [32, 33, 34] для волновода со стенками конечной длины и толщины. Решение представляет собой сумму нормальных мод – гармонических составляющих, распространяющихся вдоль оси волновода, каждая со своей групповой и фазовой скоростью. Часть из них распространяется без затухания, часть экспоненциально затухает вблизи источника. Когда мы рассматриваем

волновод со стенками конечной длины, мы учитываем поле отражений от концов волновода. Считаем волновод длинным (диаметр в несколько раз меньше, чем длина) и поэтому пренебрегаем волной, распространяющейся с внешней стороны волновода от одного конца к другому. В случае гармонической зависимости от времени решение ищется в виде $\phi(\vec{r}, t) = \phi(\vec{r})e^{i\omega t}$, и таким образом задача нахождения акустического потенциала сводится к нахождению его зависимости только от пространственных координат. Акустический потенциал $\phi(\vec{r})$ в точке является комплексным числом, модуль которого является амплитудой акустических колебаний в данной точке, а аргумент начальной фазой, которая и является интересующим нас параметром при фазовом методе измерения скорости потока. Акустическое давление и скорость связаны с потенциалом по формулам (2.7).

Уравнение Гельмгольца для функции $\phi(\vec{r})$ получается:

$$\Delta\phi + k^2\phi - 2iMk \frac{\partial\phi}{\partial z} - M^2 \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.8)$$

где $k = \frac{\omega}{c}$.

$$\beta^2 = 1 - M^2.$$

Используем модель, для волновода со стенками конечной длины и толщины, изображённой на рис.2.3. Это наиболее приближенная модель к реальному анемометрическому каналу [35].

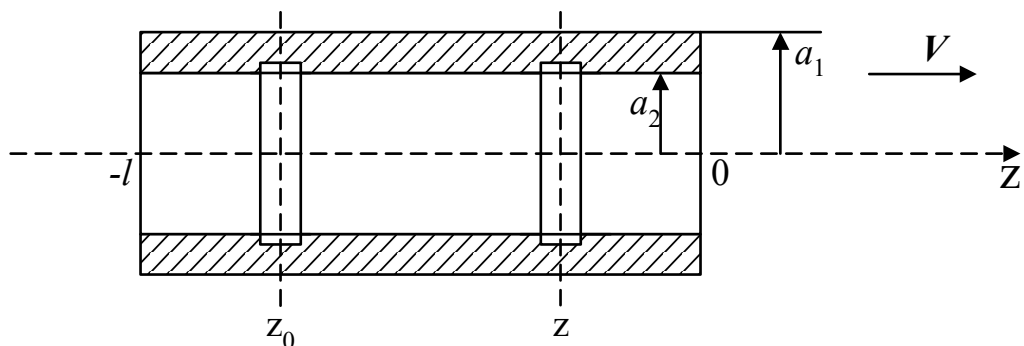


Рис. 2.3. Модель анемометрического канала со стенками конечной длины и толщины

Приведем результаты вычисления в виде зависимости акустического давления на поверхность приемного преобразователя, которое получается путем усреднения по поверхности преобразователя.

$$p(z) = e^{\pm} P_{\pm} + e^{+} \left[\sum_{n=1}^{\infty} (B1 \cdot B2)^n P_{+} + \sum_{n=0}^{\infty} (B2 \cdot B1)^n B2 P_{-} \right] + e^{-} \left[\sum_{n=0}^{\infty} (B1 \cdot B2)^n B1 P_{+} + \sum_{n=1}^{\infty} (B1 \cdot B2)^n P_{-} \right], \quad (2.9)$$

где вектор $P_{\pm} = (P_1^{\pm}, P_2^{\pm}, \dots)^T$,

$$P_n^{+} = \rho(\omega + V \cdot sp_n) \frac{2V_0 \cdot \sin(sp_n \cdot h)}{sp_n \cdot a_2 \cdot \sigma_n} \exp(-i \cdot sp_n z_0),$$

$$P_n^{-} = \rho(\omega + V \cdot sn_n) \frac{2V_0 \cdot \sin(sn_n \cdot h)}{sn_n \cdot a_2 \cdot \sigma_n} \exp(-i \cdot sn_n z_0),$$

$B1_{nm}, B2_{nm}$ коэффициенты отражения и трансформации с учетом фазовых множителей: $B1_{nm} = b_{nm}$, $B2_{nm} = b'_{nm} \cdot \exp(-l(isn_n - isp_m))$,

$$\text{где } \sigma_n = \begin{cases} \sqrt{k^2 - \beta^2 \frac{\mu_n^2}{a_2^2}} & k > \beta \frac{\mu_n}{a_2} \\ -i \cdot \sqrt{\beta^2 \frac{\mu_n^2}{a_2^2} - k^2} & k \leq \beta \frac{\mu_n}{a_2} \end{cases},$$

$$i \cdot sp_n = \frac{i \cdot kM - \sigma_n}{\beta^2}, \quad i \cdot sn_n = \frac{i \cdot kM + \sigma_n}{\beta^2} \quad - \quad \text{волновые числа } n\text{-ой моды,}$$

распространяющейся в положительном и отрицательном направлениях соответственно. Коэффициенты отражения и трансформации b_{nm} вычисляются как решение системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных b_{m_0n} , g_{m_0n} , f_{m_0n} , n -е уравнение которой имеет вид (при этом $n=1,2,\dots,N$, система имеет порядок $3N$, m_0 - номер падающей моды):

$$\begin{aligned}
& \frac{i(-i \cdot sp_n^1 \cdot g_{m_0n} + f_{m_0n})}{a_1 \beta^2 (i \cdot sn_n^1 - i \cdot sp_0^1)} \cdot \frac{1}{L_+(i \cdot sn_n^1)} - \frac{J_0\left(\frac{\mu_i a_1}{a_2}\right)}{J_0(\mu_i)} \cdot \frac{L_-(i \cdot sp_{m_0})}{i \cdot sn_n^1 - i \cdot sp_{m_0}} (i \cdot sp_{m_0} - i \cdot sn_0^1) - \\
& - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-i \cdot sn_n^1 \cdot g_{m_0m} + f_{m_0m}) L_-(i \cdot sp_m^1)}{(i \cdot sn_n^1 - i \cdot sp_m^1)(i \cdot sp_m^1 - i \cdot sn_m^1)} (i \cdot sp_m^1 - i \cdot sn_0^1) = 0 \\
& b_{m_0n} + \delta_{m_0n} = \sum_{m=0}^N \frac{2g_{m_0m} \mu_m \frac{1}{a_1 a_2}}{\left(\frac{\mu_m}{a_1}\right)^2 - \left(\frac{\mu_n}{a_2}\right)^2} \cdot \frac{J_1\left(\frac{\mu_m a_2}{a_1}\right)}{J_0(\mu_m)} \\
& i \cdot sn_{m_0} b_{in} + i \cdot sp_{m_0} \cdot \delta_{m_0n} = \sum_{m=0}^N \frac{2f_{m_0m} \mu_m \frac{1}{a_1 a_2}}{\left(\frac{\mu_m}{a_1}\right)^2 - \left(\frac{\mu_n}{a_2}\right)^2} \cdot \frac{J_1\left(\frac{\mu_m a_2}{a_1}\right)}{J_0(\mu_m)} \quad (2.10)
\end{aligned}$$

где $\delta_{m_0n} = \begin{cases} 1, m_0 = n \\ 0, m_0 \neq n \end{cases}$ – символ Кронекера.

$$\begin{aligned}
i \cdot sp_n^1 &= \begin{cases} \frac{i \cdot kM - \sqrt{\beta^2 \frac{\mu_n^2}{a_1^2} - k^2}}{\beta^2} & k \leq \beta \frac{\mu_n}{a_1} \\ \frac{i \cdot kM - i \cdot \sqrt{k^2 - \beta^2 \frac{\mu_n^2}{a_1^2}}}{\beta^2} & k > \beta \frac{\mu_n}{a_1} \end{cases}, \\
i \cdot sn_n^1 &= \begin{cases} \frac{i \cdot kM + \sqrt{\beta^2 \frac{\mu_n^2}{a_1^2} - k^2}}{\beta^2} & k \leq \beta \frac{\mu_n}{a_1} \\ \frac{i \cdot kM + i \cdot \sqrt{k^2 - \beta^2 \frac{\mu_n^2}{a_1^2}}}{\beta^2} & k > \beta \frac{\mu_n}{a_1} \end{cases}.
\end{aligned}$$

Здесь мы имеем бесконечную систему уравнений с бесконечным числом неизвестных. Для решения этой системы уравнений воспользуемся методом редукции [36], для этого надо задать требуемую точность – возьмём 2%. Если распространяются только 3 моды, то для получения этой точности достаточно определить $N=12$.

Данная модель позволяет получить зависимость фазы сигнала на приемном преобразователе в зависимости от скорости потока и скорости звука при постоянном излучении.

2.2. Погрешности фазового метода измерения скорости воздушного потока

2.2.1. Погрешности, связанные с изменением скорости звука

Из приведенной выше модели видно, что на фазу прибора влияют частота акустических колебаний, геометрические размеры и скорость звука. Кроме того, сказываются изменения параметров пьезоэлектрических преобразователей датчиков. Первые два параметра мы можем считать неизменными. А скорость звука – самый нестабильный параметр и зависит от состава газа, температуры и влажности.

В реальных условиях применения прибора (в шахтной среде) скорость звука изменяется в диапазоне от 330 до 350 м/с (влажность до 100%, температура $0\div 40^{\circ}\text{C}$, концентрация метана до 5%). Помимо этого, температура влияет на АФЧХ колец и электронный блок прибора.

Сигнал на приемном преобразователе, как было показано, представляет собой сумму несущих мод и их отражений от концов волновода. Скорость распространения каждой из этих составляющих зависит от скорости звука, что приводит к нестабильности фазы принимаемого сигнала [4].

В соответствии с моделью, разработанной в [4], скорость звука, выражающая влияние параметров окружающей среды на датчик, может быть исключена, если на каждом шаге измерять не только разность фаз принимаемых сигналов, но и сумму. Этот метод известен применительно к плоской волне. В [4] этот метод предлагается использовать для работы анемометра в непрерывном режиме с учетом только одной превалирующей моды (необязательно нулевой). Там же была произведена оценка погрешности измерения скорости звука этим методом, связанной с тем, что при вычислении

скорости звука вместо суммы нормальных мод и их отражений использовалась одна мода, амплитуда которой значительно превышает амплитуду всех остальных составляющих. На рис.2.4 а) показаны графики зависимости волнового числа принимаемого сигнала от скорости звука, на рис.2.4 б) график зависимости абсолютной погрешности измерения скорости звука от скорости звука для анемометра со следующими параметрами: частота излучения 30 кГц, внутренний радиус волновода 14 мм, длина базы 7 см, длина канала 11 см.

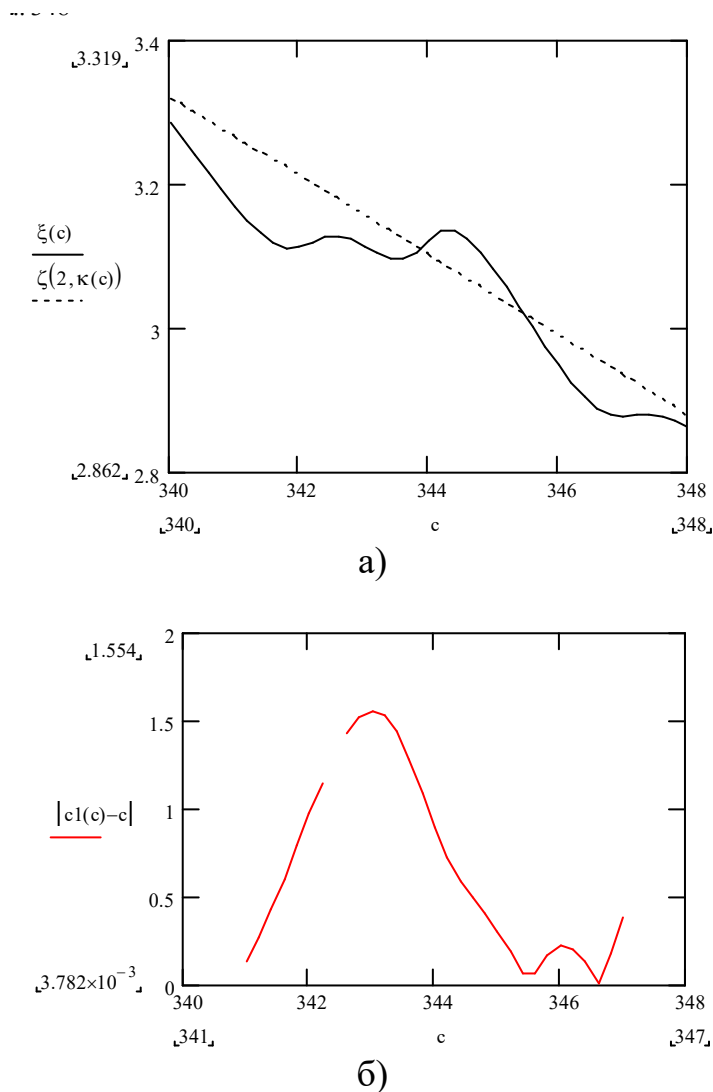


Рис. 2.4. Зависимости от скорости звука:
а) волнового числа второй моды (сплошная линия), фазовой характеристики суммы трех мод и отражений (пунктирная линия);
б) абсолютной погрешности измерения скорости звука.

Из графиков видно, что при непрерывном режиме работы анемометра при исключении скорости звука, учитывая только вторую моду, возникает

погрешность, при данных значениях параметров не превышающая 1,5 м/с. Это приведет к погрешности измерения скорости потока 0,8% [54].

Мы видим, что при определенных значениях параметров погрешность акустического анемометра, работающего в непрерывном режиме, достаточно мала. Однако это справедливо в том случае, когда, амплитуда рабочей моды значительно превышает амплитуду составляющих. При изменении условий возможно изменение соотношения амплитуд мод, и увеличение коэффициентов отражения и трансформации, следовательно, возможна ситуация, когда использование метода исключения скорости звука по измеренному значению суммы фаз в непрерывном режиме невозможно.

2.3. Математическая модель модового распространения сигнала в анемометрическом канале в импульсном режиме.

2.3.1. Распространение импульса в бесконечном цилиндрическом волноводе

Задача о распространении акустических волн в бесконечном цилиндре в движущейся среде решалась в работах [26, 27]. Она была решена для источника, излучающего непрерывный гармонический сигнал. Отражение от краев волновода при непрерывном излучении приводит к искажению фазовой характеристики анемометра [4]. Это решение обобщается здесь на случай источника, работающего в импульсном режиме.

Аналитическое выражение для акустического поля в волноводе может быть получено, используя некоторые допущения упрощающие, идеализирующие конструкцию реального волновода, например, волновод считается имеющим бесконечную длину. Если снять упомянутые допущения, то это приведёт к резкому усложнению математической задачи из-за появления нового краевого условия. При наличии торца энергия волны, излучаемая источником, частично отражается внутрь волновода, а частично излучается в пространство.

Исследуем распространение импульса в бесконечном цилиндрическом волноводе с потоком (рис. 2.5) [39].

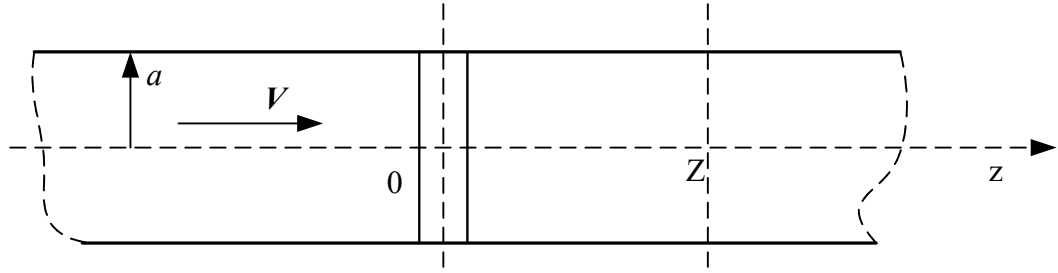


Рис. 2.5 Модель бесконечного анемометрического канала

В цилиндрической системе координат (r, ϑ, z) ось z совпадает с осью цилиндрического волновода радиуса a (рис. 2.5). Внутри волновода движется однородный постоянный поток воздуха со скоростью $\vec{V}$, направленный вдоль оси волновода в положительном направлении оси z . Источник располагается в начале координат и представляет собой кольцо радиуса a и толщиной $2h$.

Волновое уравнение для акустического потенциала в среде с потоком имеет вид (2.5). Граничным условием является равенство нулю на стенках волновода колебательной скорости.

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=a} = \begin{cases} -V_0 f(t) & |z| \leq h; \\ 0 & |z| > h. \end{cases} \quad (2.11)$$

Функция $f(t)$ описывает временную зависимость скорости стенок источника (пульсирующего кольца). Не нарушая общности, решим задачу в предположении, что огибающая импульса имеет прямоугольную форму.

$$\text{В непрерывном режиме } f(t) = f_{\text{непр}}(t) = \exp(i\omega t) \quad (2.12)$$

$$\text{В импульсном режиме } f(t) = f_{\text{имп}}(t) = \begin{cases} \exp(i\omega t) & t \in [nT, \tau + nT] \\ 0 & t \notin [nT, \tau + nT] \end{cases} \quad (2.13)$$

$n=0, 1, 2, \dots$, τ – длительность импульса, T – период повторения

Решением уравнения (2.5) в непрерывном режиме является, согласно [7],

$$\varphi_+(r, z, t) = 2iV_0 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin(s_{+m}h) \cdot J_0\left(\frac{\mu_m r}{a}\right) \cdot \exp(i\omega t - is_{+m}z)}{a \cdot s_{+m} \cdot J_1'(\mu_m) \cdot \sigma_m \cdot \theta_m} \quad (2.14.a)$$

$z > h$

$$\varphi_-(r, z, t) = 2iV_0 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin(s_{-m}h) \cdot J_0\left(\frac{\mu_m r}{a}\right) \cdot \exp(i\omega t - is_{-m}z)}{a \cdot s_{-m} \cdot J_1'(\mu_m) \cdot \sigma_m \cdot \theta_m} \quad (2.14.6)$$

$$z < -h$$

$$\text{где } s_{\pm m} = \frac{-Mk \pm \sigma_m}{\beta^2}, \quad \beta^2 = 1 - M^2, \quad \sigma_n = \begin{cases} \sqrt{k^2 - \beta^2 \frac{\mu_n^2}{a_2^2}} & k > \beta \frac{\mu_n}{a_2} \\ -i \cdot \sqrt{\beta^2 \frac{\mu_n^2}{a_2^2} - k^2} & k \leq \beta \frac{\mu_n}{a_2} \end{cases},$$

μ_n – корни уравнения $J_1(x)=0$, $J_1(x)$ – функции Бесселя 1-го рода, $\theta_m=2$ при $m=0$, $\theta_m=1$ при $m \neq 0$.

Перейдем к импульсному режиму. Разложим функцию $f_{um}(t)$ в ряд Фурье [40].

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C(n) \cdot \exp(in\omega_0 t); \quad (2.15)$$

$$C(n) = \frac{1}{iT(\omega - n\omega_0)} [\exp(i(\omega - \omega_0)\tau) - 1]; \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}. \quad (2.16)$$

Согласно [41], если временная зависимость источника – периодическая функция, представляемая в виде ряда, то решение тоже можно представить в виде ряда [40].

$$\Phi_+(r, z, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C(n) \sum_{m=0}^{\infty} 2V_0 i \frac{\sin(s_{+m}^n h) \cdot J_0\left(\frac{\mu_m r}{a}\right) \cdot \exp(i\omega_0 t \cdot n - is_{+m}^n z)}{a \cdot s_{+m}^n \cdot J_1'(\mu_m) \sigma_m^n \cdot \theta_m} \quad (2.17.a)$$

$$z > h$$

$$\Phi_-(r, z, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C(n) \sum_{m=0}^{\infty} 2V_0 i \frac{\sin(s_{-m}^n h) \cdot J_0\left(\frac{\mu_m r}{a}\right) \cdot \exp(i\omega_0 t \cdot n - is_{-m}^n z)}{a \cdot s_{-m}^n \cdot J_1'(\mu_m) \sigma_m^n \cdot \theta_m} \quad (2.17.6)$$

$$z < -h$$

$$\text{где } s_{\pm m}^n = \frac{-\frac{\omega_0 n}{c} M \pm \sigma_m^n}{\beta^2};$$

$$\sigma_m^n = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{\omega_0 n}{c}\right)^2 - \beta^2 \frac{\mu_m^2}{a_2^2}} & \left(\frac{\omega_0 n}{c}\right) > \beta \frac{\mu_m}{a_2} \\ -i \cdot \sqrt{\beta^2 \frac{\mu_m^2}{a_2^2} - \left(\frac{\omega_0 n}{c}\right)^2} & \left(\frac{\omega_0 n}{c}\right) \leq \beta \frac{\mu_m}{a_2} \end{cases}$$

Индекс m определяет номер нормально распространяющейся в волноводе моды. В каждом волноводе существует конечное число распространяющихся мод и бесконечное число быстро затухающих. Количество распространяющихся мод определяется соотношением длины волны и радиуса волновода. Мода с номером m является распространяющейся, пока выполняется неравенство:

$$k^2 - \beta^2 \left(\frac{\mu_m}{a}\right)^2 > 0. \quad (2.18)$$

При следующих параметрах: $a = 1.4$ см, $\omega = 2\pi \times 30$ кГц, $c = 343$ м/с, число распространяющихся мод равно трем ($m = 0, 1, 2$). Отметим, что в импульсном режиме каждая мода представляет собой сумму гармоник – синусоид с частотами кратными частоте следования импульсов (ω_0, n). Каждая мода в импульсном режиме содержит гармоники, как распространяющиеся, так и не распространяющиеся. Это приводит к искажению формы импульса при прохождении волновода. Искажения будут тем больше, чем больший вклад в спектр исходного сигнала вносят не распространяющиеся гармоники.

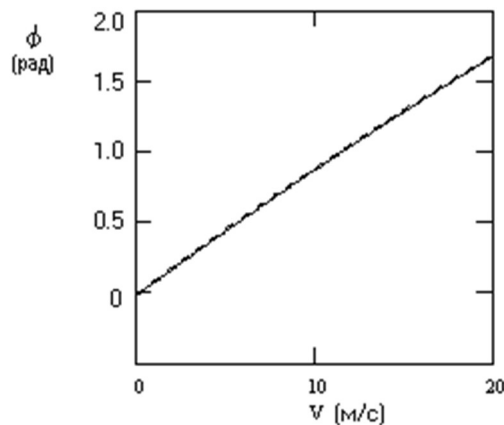


Рис. 2.6. Фазовая характеристика акустического анемометра, работающего в импульсном режиме.

На (рис. 2.6) показаны теоретическая фазовая кривая (зависимость фазы принимаемого сигнала от скорости потока), например, для второй моды ($m=2$), распространяющейся в анемометре.

Таблица 1. Исходные данные эксперимента

Параметр	Значение	Описание
f	30000 [Гц]	частота излучения импульсов в пачке
N	7	количество периодов заполнения в пачке
ω_0	$2\pi \cdot 300 \text{ [с}^{-1}\text{]}$	угловая частота следования импульсов
a	0.014 [м]	радиус анемометрического канала
h	0.007 [м]	высота кольца
l	0.064 [м]	расстояние между преобразователями

Для того чтобы исследовать только искажения формы сигнала, связанные с прохождением его через волновод, рассмотрим распространение импульса единичной амплитуды без ограничения спектра. При этом не будем учитывать значения амплитуд мод (считаем их равными единице).

Для расчета зададимся следующими параметрами из Таблицы 1.

При этом принимаемый сигнал для моды n может быть вычислен по формуле:

$$F(z, t, n) := \sum_{m=0}^{200} C(m) \cdot \exp \left[-i \cdot \text{sq} \left[\frac{((\omega_0 \cdot m))^2}{c^2} - \left(\frac{\mu_n}{a} \right)^2 \right] \cdot z + i \cdot \omega_0 \cdot m \cdot t \right],$$

$$\text{sq}(x) := \begin{cases} \sqrt{x} & \text{if } x \geq 0 \\ (-\sqrt{x}) & \text{otherwise} \end{cases}, z=l.$$

где

Получаем графики распространения 0-й, 1-й, и 2-й мод, соответственно (рис. 2.7 а,б,в). На последнем рисунке (рис.2.7 г) все три распространяющиеся моды показаны на одном графике. Из этого рисунка видно, что время приема 0-ой и 1-ой моды отстоит от времени приема 2-ой моды. Таким образом,

подтверждается гипотеза о возможности работы только на 2-ой моде: 0,5мс – 0,6 мс.

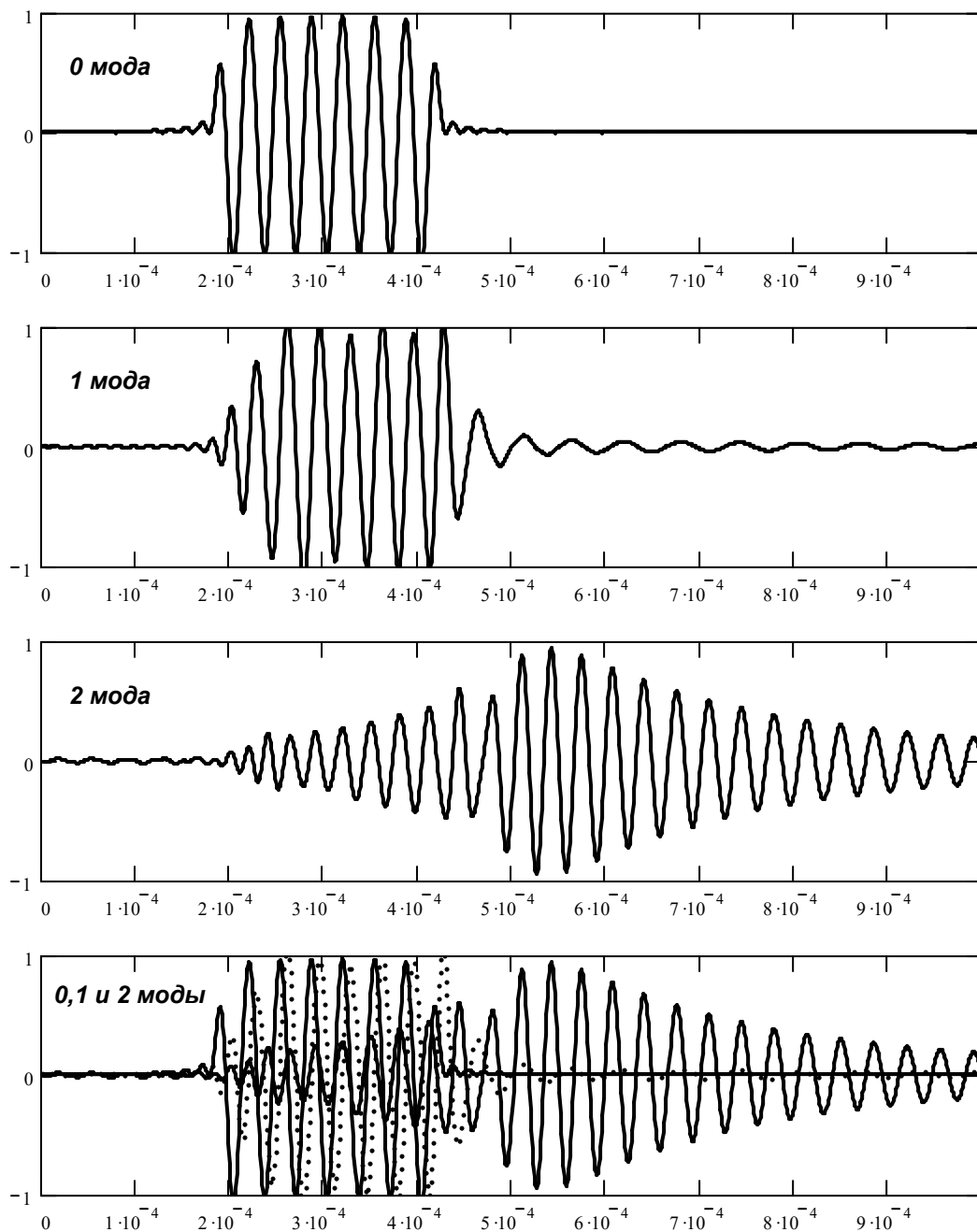


Рис. 2.7. Сигнал единичной амплитуды, прошедший через волновод, для 0-й (а), 1-й (б), 2-й (в) мод; все три моды на одном графике рис (г).

Из приведенных графиков мы видим, что 0-я и 1-я моды распространяются практически без искажений. Прохождение волновода приводит только к сдвигу во времени исходного импульса. Форма импульса второй моды изменяется. Это связано с изменением ее спектрального состава.

Верхние гармоники не распространяются в волноводе данного радиуса и экспоненциально затухают вблизи источника, что приводит к размыванию импульса и изменению его формы.

Исходя из всего вышесказанного, можно промоделировать принимаемый сигнал. Его вид показан на рис. 2.8. Если считать, что V_0 условно равно 1 м/с, то амплитуды акустического потенциала первых трех мод равны:

$$A_0 = 0.01, \quad A_1 = 0.08, \quad A_2 = 0.8$$

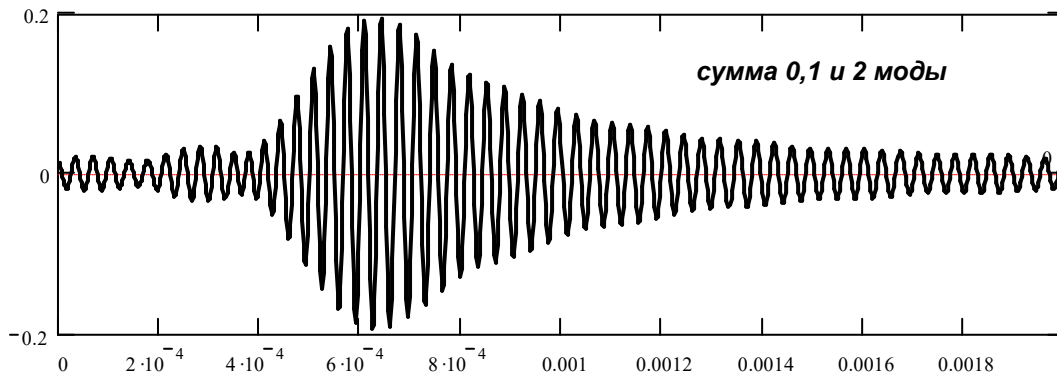


Рис. 2.8. Сигнал на приемнике $z=6.4$ см. ($M=0$)

2.3.2. Распространение импульса, отраженного от концов волновода.

Рассмотрим распространение акустического импульса в волноводе конечной длины. Это значит, что к прямому импульсу, распространяющемуся непосредственно от излучателя, добавляется импульс, отраженный от конца волновода. Вообще говоря, в волноводе присутствует бесконечное количество отраженных импульсов, но поскольку коэффициент отражения меньше единицы (по расчетам, он порядка 0.1), импульсами, отраженными дважды, можно пренебречь. Как уже говорилось, поле в волноводе представляет собой довольно сложную дифракционную картину. Каждая мода на конце волновода трансформируется во все распространяющиеся моды. Особенностью импульсного режима является то, что моды и отражения каждой моды могут быть разделены во времени, поскольку скорости распространения разных мод различны. Изменяя расстояние между преобразователями, а также расстояния

между преобразователями и концами волновода, можно регулировать время прихода на приемник различных мод и их отражений.

Приведем в таблице 2 расчетные данные для образцового анемометра АПА-1 с учетом его размеров (в том числе толщины стенок).

Для вычисления коэффициентов отражения и трансформации воспользуемся формулой (2.10).

Таблица 2. Расчетные данные для образцового анемометра

Параметр	Значение	Описание
f	$30000 [Гц]$	частота излучения импульсов в пачке (соответствует резонансной частоте пьезопреобразователей)
N	7	количество периодов заполнения в пачке
ω_0	$2\pi \cdot 300 [с^{-1}]$	угловая частота следования импульсов (частота первой гармоники)
a_1	$0.0165 [м]$	внешний радиус анемометрического канала
a_2	$0.014 [м]$	внутренний радиус анемометрического канала
h	$0.007 [м]$	высота кольца
l_1	$0.064 [м]$	расстояние между преобразователями
l_2	$0.024 [м]$	расстояние от преобразователя до ближайшего края
l	$0.112 [м]$	длина волновода

Обобщенная матрица рассеяния для импульсного режима должна быть рассчитана для каждой гармоники. Для этого в формулу (2.10) вместо частоты ω нужно подставлять $m\omega_0$, где m – номер гармоники. Резонансной гармонике соответствует $m=100$. Далее вычисляем поле давления по формуле $\sum_m C(m)p_m(z)$. Здесь $p_m(z)$ это акустическое давление для m -й гармоники, рассчитанное по формуле (2.9), подстановкой в нее $\omega = m\omega_0$. $C(m)$ – спектр радиоимпульса, вычисляется по формуле (2.16). При расчетах спектр был ограничен гармониками = 90..110 для ускорения процесса вычисления. Это ограничение справедливо, поскольку в реальности спектр сигнала обрывается

преобразователями, по сути, представляющими собой полосовой фильтр. Влияние преобразователей на спектр сигнала было рассмотрено выше. Искажения формы сигнала, связанные с ограничением спектра, рассматриваются ниже. В итоге в результате моделирования временная зависимость акустического давления на приемном преобразователе с учетом однократного отражения от обоих концов (суммы в (2.9) содержат только одно слагаемое) имеет вид (рис.2.9). Акустическое давление вычисляется в относительных единицах по размерности соответствующим Паскалям, поскольку условно считается, что амплитуда колебательной скорости на источнике $V_0=1$ м/с.

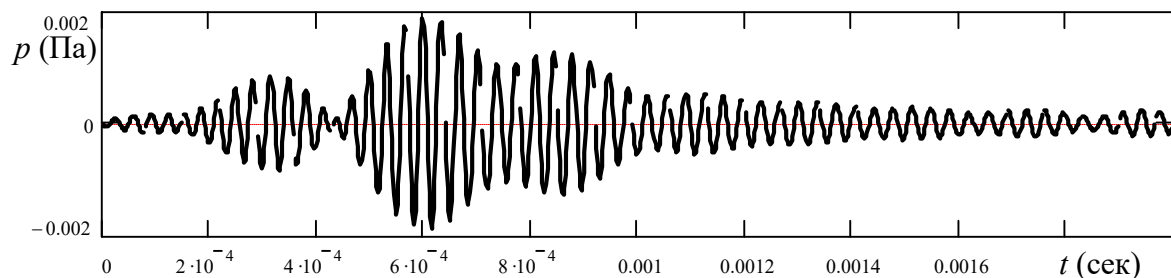


Рис. 2.9. Акустическое давление на приемном преобразователе с учетом однократного отражения от обоих концов волновода при импульсном режиме излучения.

Сравнивая графики, приведенные на рис. 2.8 и 2.9 можно отметить, что прямой сигнал и отраженный разнесены во времени. Значит, можно выбрать рабочую точку (начало отсчета времени) таким образом, чтобы отражение не накладывалось на прямой сигнал. Необходимо отметить, что данная модель построена без учета свойств пьезопреобразователей. Поэтому выбирать рабочую точку исходя из данного графика нельзя. Необходимо учитывать задержку во времени при прохождении сигнала через преобразователи (время, затрачиваемое на раскачивание колец).

2.4. Математическая модель излучателя для акустического анемометра.

В излучающем преобразователе источником акустической волны является пьезоэлектрический преобразователь, имеющий форму кольца, находящегося внутри анемометрического канала.

Входным параметром является напряжение, подаваемое на обкладки кольца, выходным параметром является колебательная скорость внутренней поверхности кольца. Для моделирования воспользуемся методом электромеханических аналогий [37], и представим преобразователь в виде электрической схемы замещения [37]. В этой схеме замещения сила тока является аналогом колебательной скорости, а напряжение аналогом давления с учетом домножения на соответствующий электромеханический коэффициент. Излучающий преобразователь имеет электрический вход и механический выход. Общий вид электромеханического преобразователя представляется в виде схемы, показанной на рис.2.10.

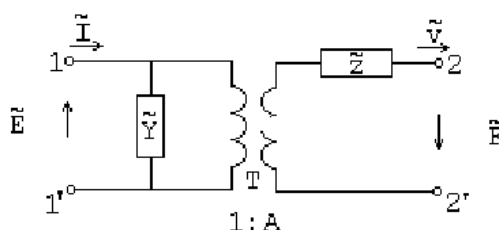


Рис. 2.10. Схема замещения электромеханического преобразователя.

Само электромеханическое преобразование представлено в виде идеального трансформатора, коэффициент трансформации которого равен электромеханическому коэффициенту пьезоэлектрика. В схеме, приведенной на рис. 2.10, Y — электрическое сопротивление преобразователя, z — механическое сопротивление преобразователя, E — ЭДС или напряжение, подаваемое на электроды преобразователя, F — механическая сила, действующая на поверхность преобразователя.

Известно [38], что идеальный трансформатор может быть исключен из электрической схемы, и в этом случае ток и напряжение в ветви вторичной

обмотки трансформатора, соответственно умножается и делится на коэффициент трансформации. Тогда схема замещения может быть представлена таким образом, как это показано на рис. 2.11. Здесь электрическое и механическое сопротивления детализированы.

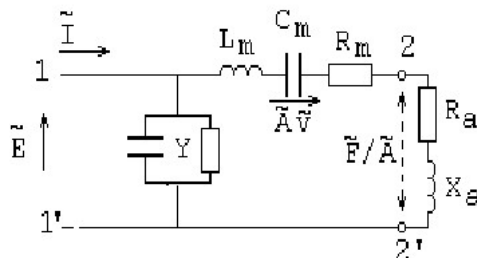


Рис. 2.11. Схема замещения пьезоэлектрического излучателя

Пьезокерамическое кольцо представляет собой электроакустический преобразователь. Для математического описания его свойств воспользуемся схемой замещения электроакустического преобразователя рис. 2.12.

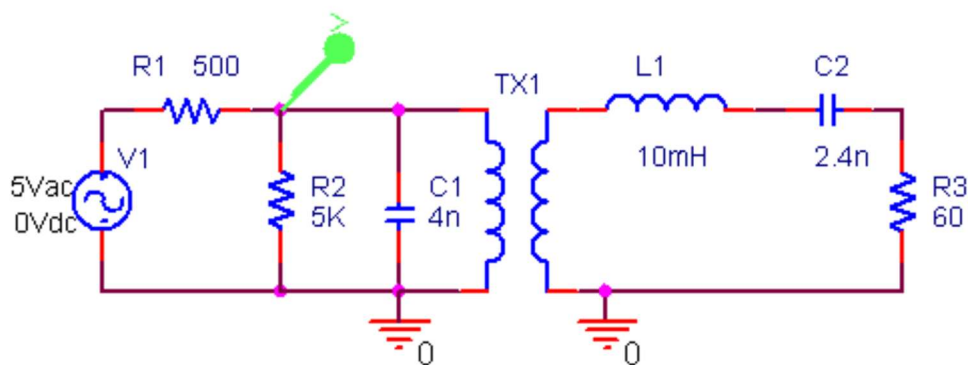


Рис. 2.12 Схема замещения электроакустического преобразователя (излучателя)

На данной схеме электроакустическое преобразование осуществляется при помощи идеального трансформатора TX1. Справа от него – механическая часть, слева – электрическая. В [35] показано, что величина TX1 параметра может меняться от температуры и давления.

Параметры схемы замещения могут быть получены теоретически, руководствуясь физическим смыслом, определяющим каждый параметр. Кроме того, они могут быть определены на основании результатов

экспериментальных исследований, исходя из амплитудофазочастотной характеристики реальных колец.

На рисунке 2.13 показан пример амплитудной и фазовой зависимости от частоты пьезокерамического излучателя для приведённой схемы замещения.

Данная схема замещения позволяет моделировать частотные характеристики различных колец и применять полученные данные при моделировании прохождения сигнала в анемометрическом канале с учетом свойств пьезопреобразователей.

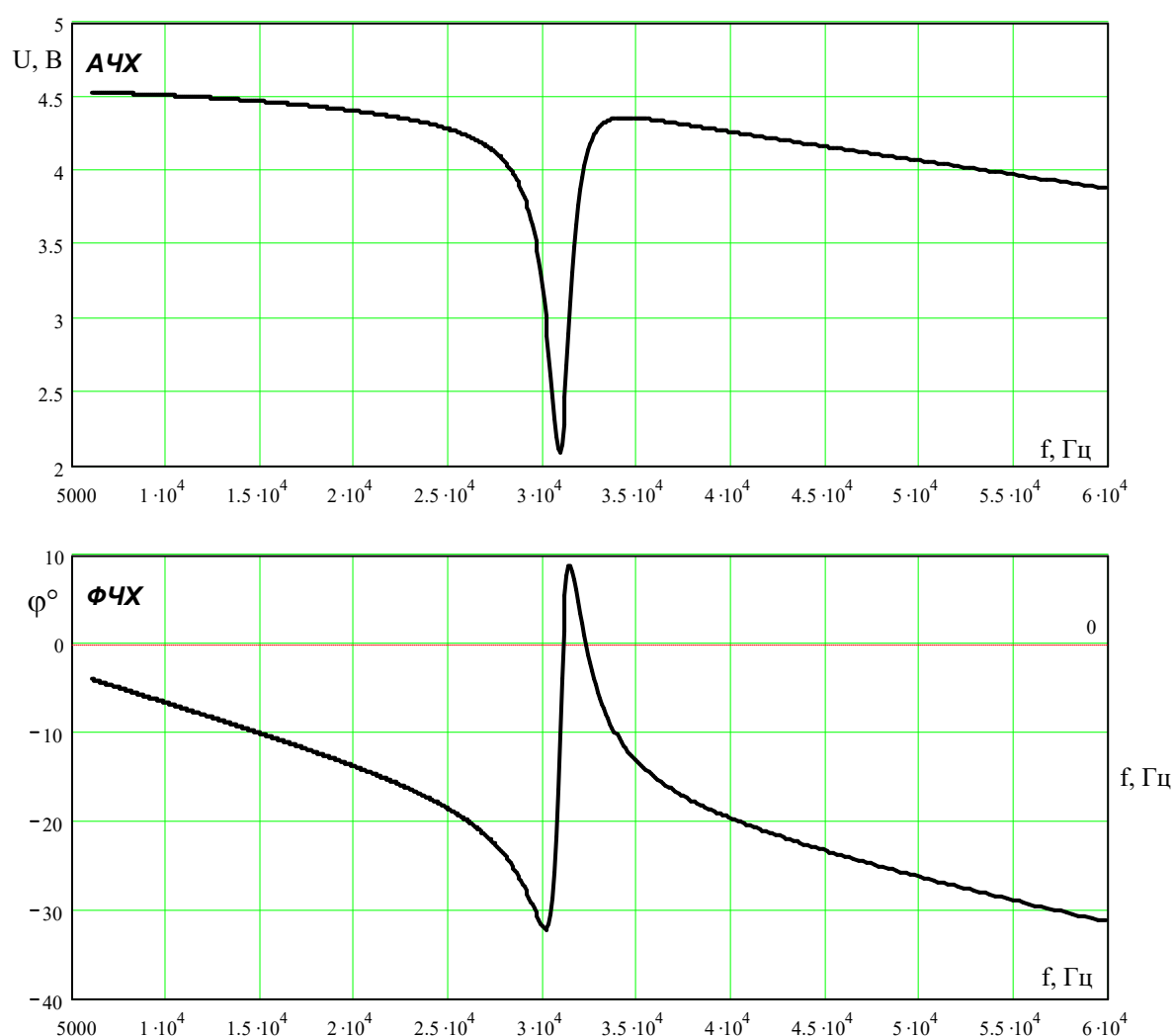


Рис. 2.13. АЧХ и ФЧХ излучателя

2.5. Математическая модель приёмника для акустического анемометра.

Схема замещения приемного преобразователя показана на рис. 2.14. В данной схеме F_0 показывает силу, действующую на поверхность преобразователя, равную среднему по поверхности преобразователя акустическому давлению, умноженной на площадь этой поверхности [35, 37]. Этот параметр является входным для третьего блока модели (см. рис.3.3). Выходным параметром является напряжение на обкладках преобразователя – E . На схеме m – масса преобразователя, c – модуль упругости, r – коэффициент, характеризующий процессы диссипации механической энергии, r_a , x_a – составляющие акустического импеданса воздуха, которыми мы пренебрегаем (см. выше), Y – электрическое сопротивление преобразователя. Тогда комплексный коэффициент передачи для данной схемы будет:

$$K = \frac{A^2/Y}{A^2/Y + i \cdot \omega \cdot m + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot c} + r}, \quad (2.19)$$

где $Y = \frac{1}{R_1} + i \cdot \omega \cdot C_1$,

$$R1 := 5000 \quad C1 := 3.7 \cdot 10^{-9} \quad A := 0.353$$

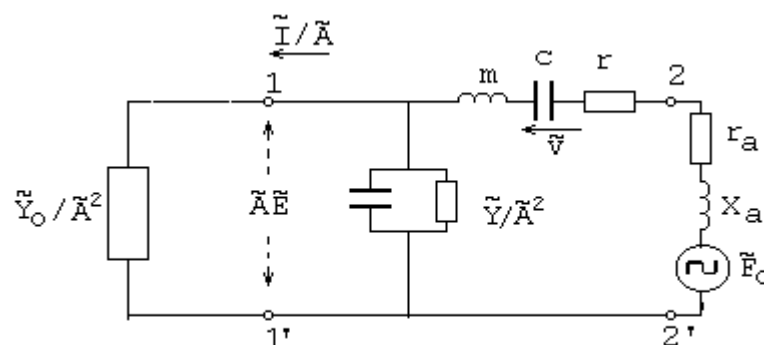


Рис.2.14. Схема замещения пьезоэлектрического приемника

Упомянутая выше зависимость от температуры вносит погрешность, сдвигая фазу принимаемого сигнала, кроме того, изменяется АФЧХ кольца и, следовательно, фаза принимаемого сигнала. Эти же особенности свойственны так же и приемному преобразователю, схема замещения которого показана на рис. 2.15. и АФЧХ – на рис. 2.16.

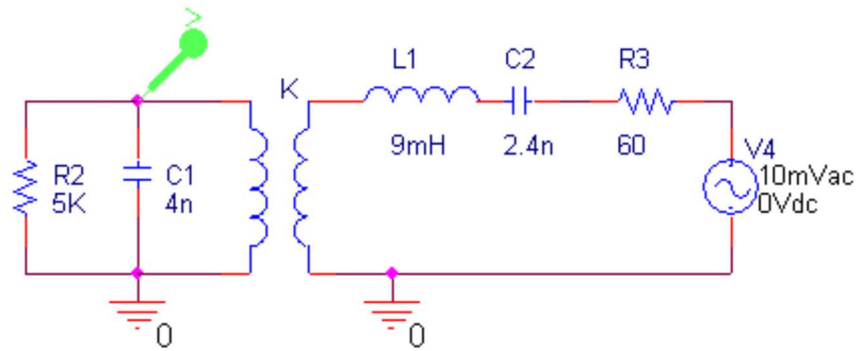


Рис. 2.15 Схема замещения электроакустического приемного преобразователя

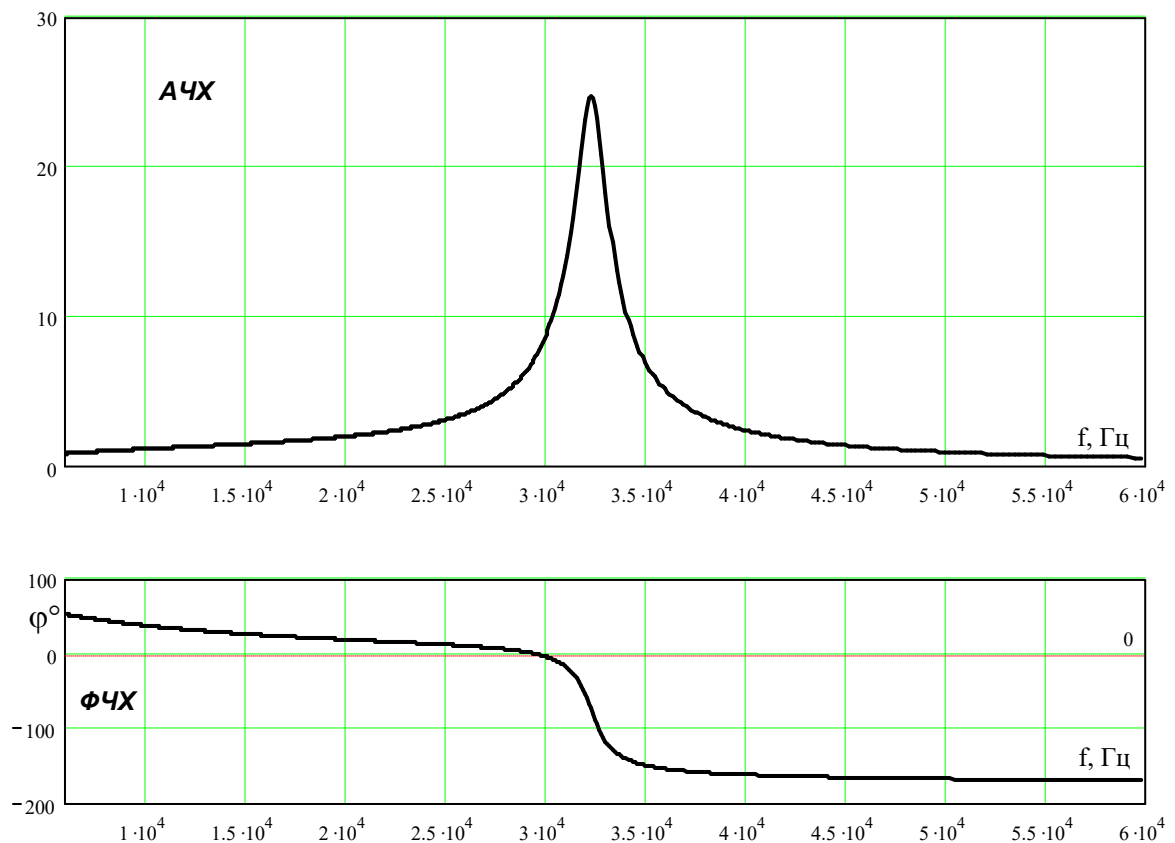


Рис. 2.16. АЧХ и ФЧХ приемника

Наряду с кольцами на погрешность влияет электрическая схема устройства, которая обладает собственной АФЧХ, зависящей от температуры, не говоря про случайную составляющую погрешности, вносимую аналоговым трактом.

Аналоговая часть электрической схемы представляет собой полосовой фильтр, настроенный на рабочую частоту передатчика и приемника. Его АФЧХ показана на рис. 2.17.

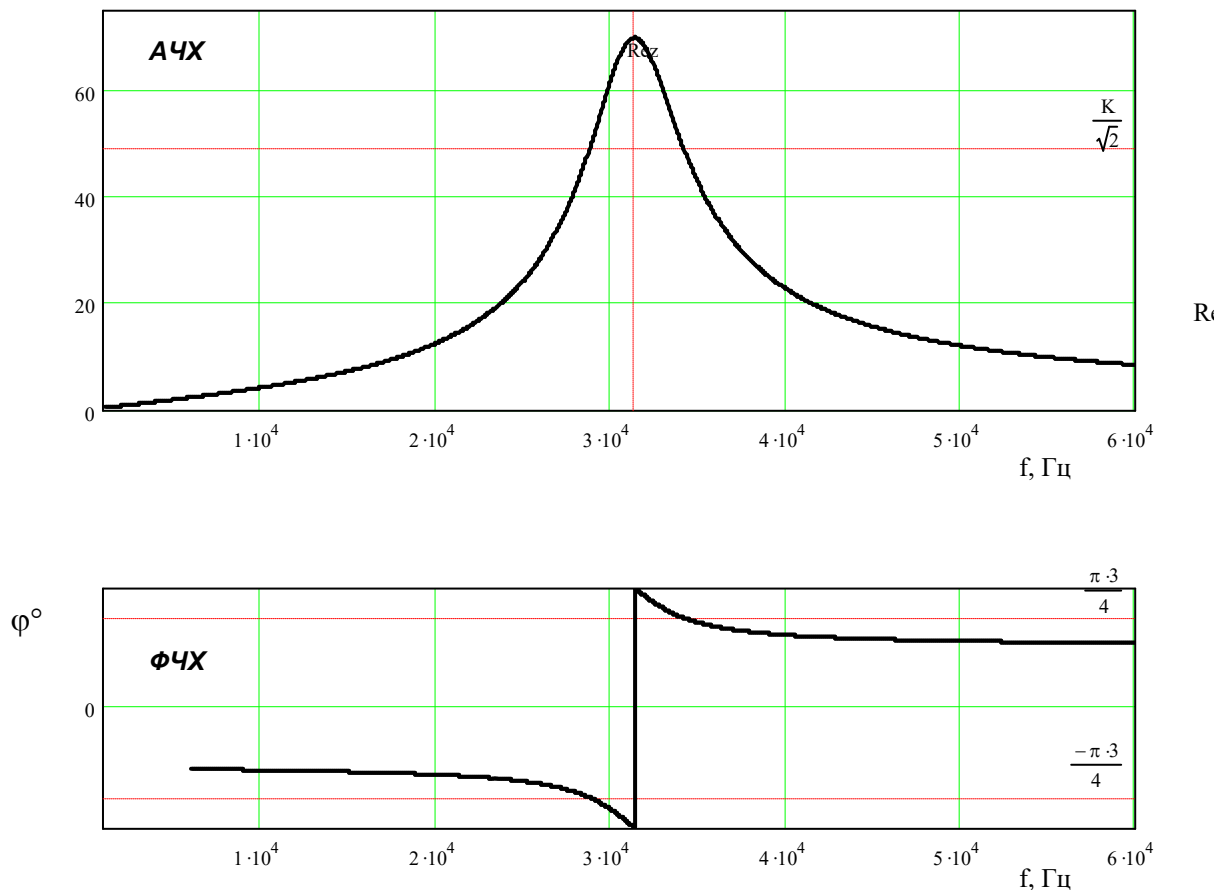


Рис. 2.17. АЧХ и ФЧХ фильтра

Характеристики реального фильтра:

$$\text{Rez} = 31333.59882 \quad K = 69.767 \quad 2 \cdot Q^2 = 69.767 \quad Q = 5.906 \quad \Delta\omega = 3.333 \times 10^4$$

Где: Rez – резонансная частота, K – коэффициент усиления, Q – добротность, $\Delta\omega$ – полоса пропускания.

Приведенные выше частотные характеристики могут изменяться под воздействием внешних условий. Эти изменения приводят к изменению фаз

излучаемого и принимаемого сигналов, что вносит погрешность в процесс измерения скорости потока.

3. Разработка автоматизированной системы научных исследований акустических анемометров, работающих в импульсном режиме

Акустический анемометр состоит из первичного преобразователя и электронного блока, содержащего дисплей или интерфейс для передачи данных. Первичный преобразователь акустического анемометра представляет собой цилиндрический волновод-воздуховод с встроенными в его стенки пьезоэлектрическими кольцами.

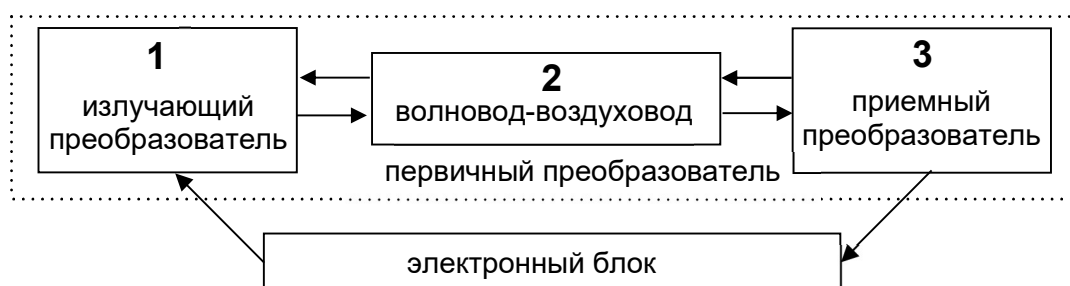


Рис. 3.1. Блок-схема модели акустического анемометра

При проектировании АСНИ датчик представляется в виде трех последовательно соединенных блоков (рис.3.1) [33, 34]. Излучающий преобразователь – первый блок, акустический волновод – второй блок, приемный преобразователь – третий блок.

Акустическая волна в датчике анемометра излучается и принимается при помощи пьезокерамических колец, встроенных в стенки волновода и механически развязаны с ними. Внутренние радиусы волновода и колец совпадают, что уменьшает аэродинамическое сопротивление датчика измеряемому потоку.

Пьезокерамический источник акустических колебаний под воздействием электрического напряжения совершает механические колебания становясь источником сигнала.

Акустическая волна от излучателя распространяется по анемометрическому каналу и поступает на приемный преобразователь. Акустическое давление, возникающее на пьезоэлектрическом преобразователе, вызывает электрическое напряжение, поступающее на блок электроники.

3.1. Блок акустического излучателя сигнала АСНИ.

Рассмотрим излучающий преобразователь (первый блок рис. 3.1) и его модель. Как уже говорилось, источником акустической волны является пьезоэлектрический преобразователь, имеющий форму кольца, находящегося внутри анемометрического канала.

На рис.3.2. изображена структурная схема пьезоэлектрического излучателя АСНИ.

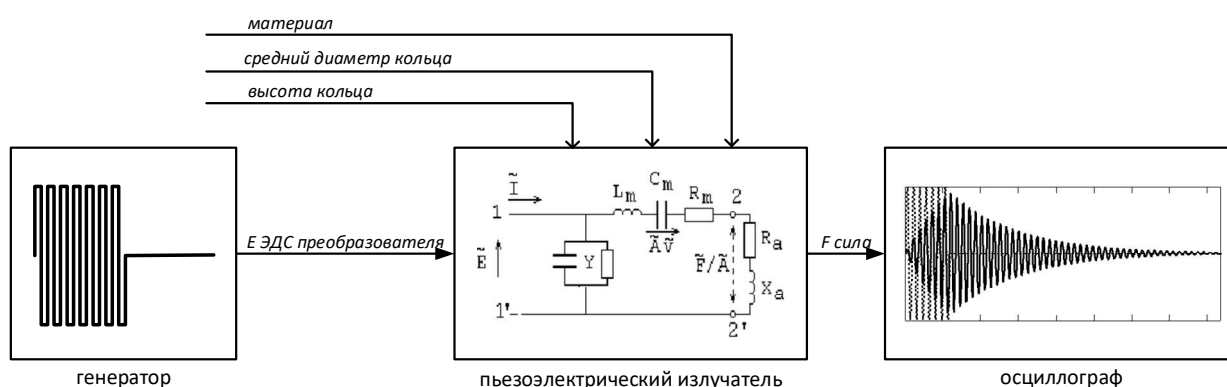


Рис.3.2. Структурная схема замещения пьезоэлектрического излучателя

Входными параметрами здесь служат электромеханические аналогии: Y – электрическое сопротивление преобразователя, z – механическое сопротивление преобразователя, E – ЭДС или напряжение, подаваемое на электроды преобразователя, представленные в виде электрической схемы замещения. Выходным параметром является механическая сила – F , действующая на поверхность преобразователя в виде колебательной скорости внутренней поверхности кольца.

Параметры схемы замещения могут быть определены экспериментально, исходя из АФЧХ реального преобразователя, которая

снимается косвенным методом, поскольку выход является механическим, а не электрическим (см. рис 2.12).

Данный преобразователь является полосовым фильтром. Он характеризуется частотами резонанса, антирезонанса, добротностью.

Рассмотрим схему на рисунке 2.11. Схему замещения можно представить в виде четырехполюсника, где входным параметром является напряжение на входе, а выходным параметром выступает сила тока, имитирующая механическую колебательную скорость.

Комплексный коэффициент передачи вычисляется, как отношение тока на выходе, к напряжению на входе. Тогда он может быть вычислен с точностью до постоянного коэффициента следующим образом:

$$K(\omega) = \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{R_m + i \cdot \omega \cdot L_m + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C_m}} \quad (3.1)$$

В данном выражении можно пренебречь сопротивлением воздуха, поскольку акустическое сопротивление воздуха и твердого вещества, из которого сделан преобразователь, несоизмеримы друг с другом.

Используя комплексный коэффициент передачи, можно промоделировать изменение формы сигнала при его электромеханическом преобразовании.

Таблица 3. Параметры схемы замещения.

Параметр	Значение
K	0.353
R2	4919.625 [Om]
R3	49.791 [Om]
C1	3.7 [nF]
C2	2.959 [nF]
L1	9 [mH]

На основании результатов экспериментальных исследований были получены численные значения параметров схемы замещения (таб. 3),

изображённой на рис. 2.12 применительно к реальному пьезокерамическому преобразователю.

На рисунке 3.3. приведены графики АЧХ и ФЧХ излучателя для указанных параметров схемы замещения. На графиках видно практически полное совпадение реальных и смоделированных характеристик.

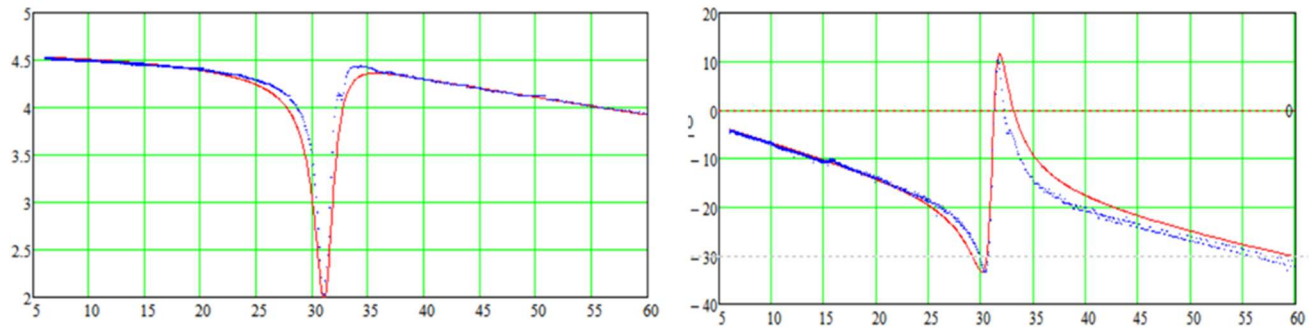


Рис.3.3. АЧХ и ФЧХ излучателя. Реальная и теоретическая зависимости.

Пьезоэлектрический излучатель является полосовым фильтром. Он характеризуется частотами резонанса, антирезонанса, добротностью.

В приведённой модели на вход подается периодический радиоимпульс прямоугольной формы, длительность которого равна нескольким (в нашем случае – 7) периодам частоты заполнения. Частота повторения – 300 Гц, частота заполнения – 30 кГц.

Разложив этот импульс в комплексный ряд Фурье, домножив на комплексный коэффициент передачи и проведя обратное преобразование Фурье, получим сигнал на выходе преобразователя.

На рис. 3.4 показано как выглядит акустический сигнал, который распространяется в анемометрическом канале, учитывая резонансные свойства излучателя по сравнению с входным сигналом. Для удобства восприятия формы сигнала зависимости приведены без учёта амплитуд в относительных единицах.

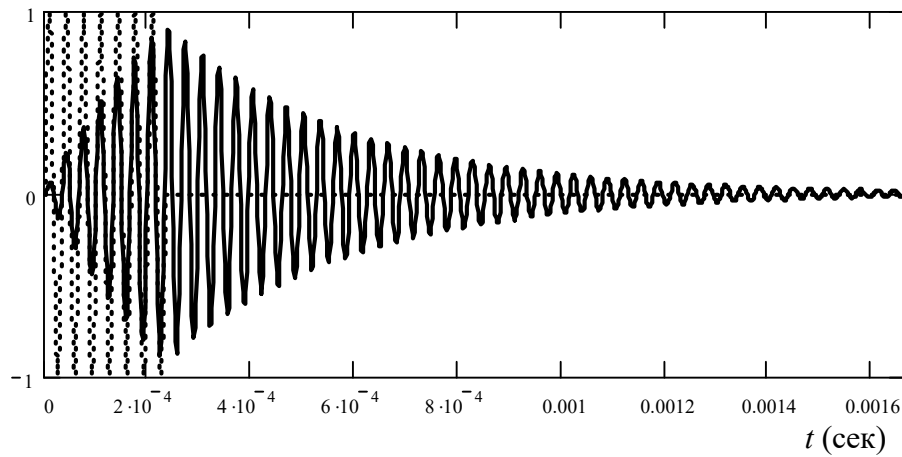


Рис. 3.4. Зависимости сигнала на входе и выходе излучателя от времени.
пунктирная линия – вход, сплошная линия – выход

На рис. 3.5 АЧХ преобразователя накладывается на спектр входного сигнала, который равен модулю комплексного коэффициента передачи. Частота излучателя в данном случае взята равной 30 кГц.

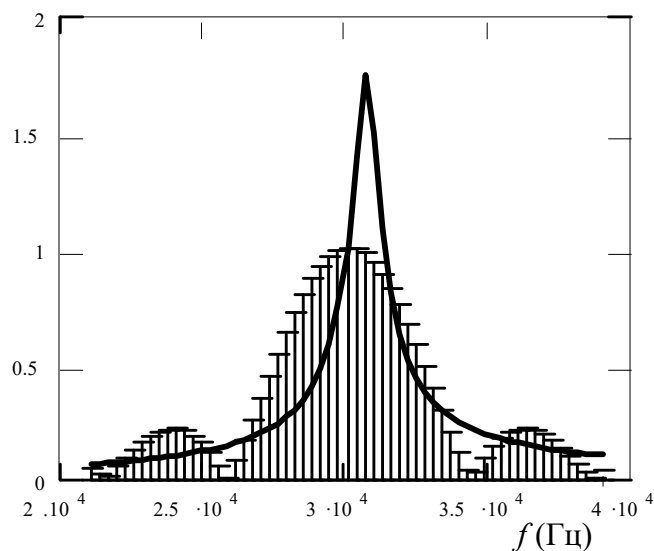


Рис. 3.5. Спектр сигнала на входе и АЧХ излучателя

Как видно из рисунка резонансные свойства кольца вырезают из спектра входного сигнала частоты, искажая форму акустического сигнала на выходе излучателя. Резонансные свойства излучателя жёстко связаны с его диаметром, поэтому рабочая частота сигнала может выбираться из узкого диапазона частот около резонанса [35]. Если частота заполнения излучающего импульса, совпадает с резонансной частотой излучателя, то для нашего частного случая спектр акустического сигнала, будет ограничен в пределах 28

– 32 КГц. Следовательно, в дальнейшем в формулах ряда Фурье (2.17) можно учитывать гармоники n в пределах от 93 до 107 (в том случае, когда отношение частоты заполнения радиоимпульса к частоте следования импульсов равно $30\text{КГц}/300\text{Гц} = 100$). Изменение сигнала, обусловленное ограничением спектра, будет рассматриваться ниже.

3.2. Блок акустического приемника АСНИ.

На рис. 3.6. представлена структурная схема пьезоэлектрического приёмника.

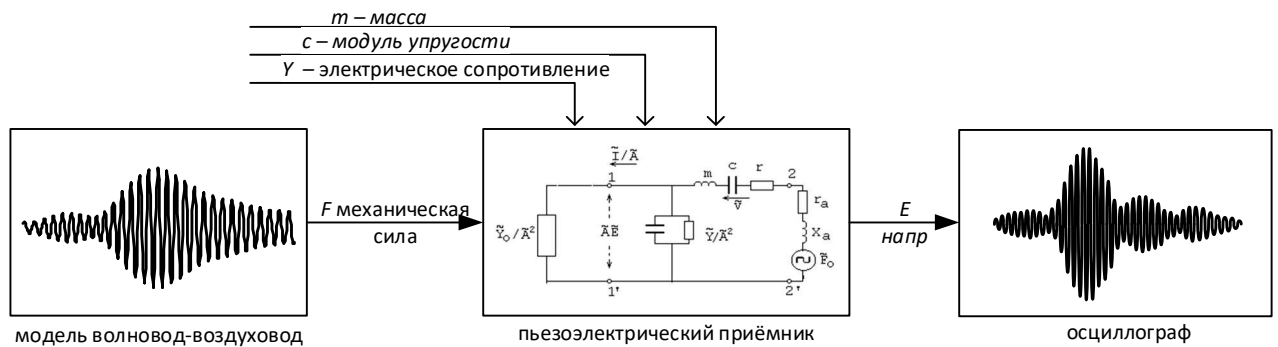


Рис. 3.6. Структурная схема замещения пьезоэлектрического приёмника

Входными параметрами здесь служат электромеханические аналогии: F_0 – сила, действующая на поверхность преобразователя, m – масса преобразователя, c – модуль упругости, Y – электрическое сопротивление преобразователя представленные в виде электрической схемы замещения. Выходным параметром является напряжение на обкладках преобразователя – E .

Данный преобразователь является так же, как и излучатель является полосовым фильтром. Он характеризуется частотами резонанса, антирезонанса, добротностью.

Принимаемый сигнал на входе приёмного преобразователя искажается на стадии излучения в излучателе и далее проходя через анемометрический канал.

Главным параметром, влияющим на резонансную частоту кольца является диаметр кольца. Для воздействия на выходные характеристики излучателя и приёмного преобразователя мы можем изменять материал пьезокерамики и средний диаметр кольца. В общем случае мы можем изменять эти значения в пределах $\pm 10\%$.

3.3. Блок анемометрического канала АСНИ.

Структурная схема замещения анемометрического канала представлена на рис. 3.7. в виде модели распространения акустического сигнала внутри волновода-воздуховода с учётом геометрических размеров датчика и параметров окружающей среды.

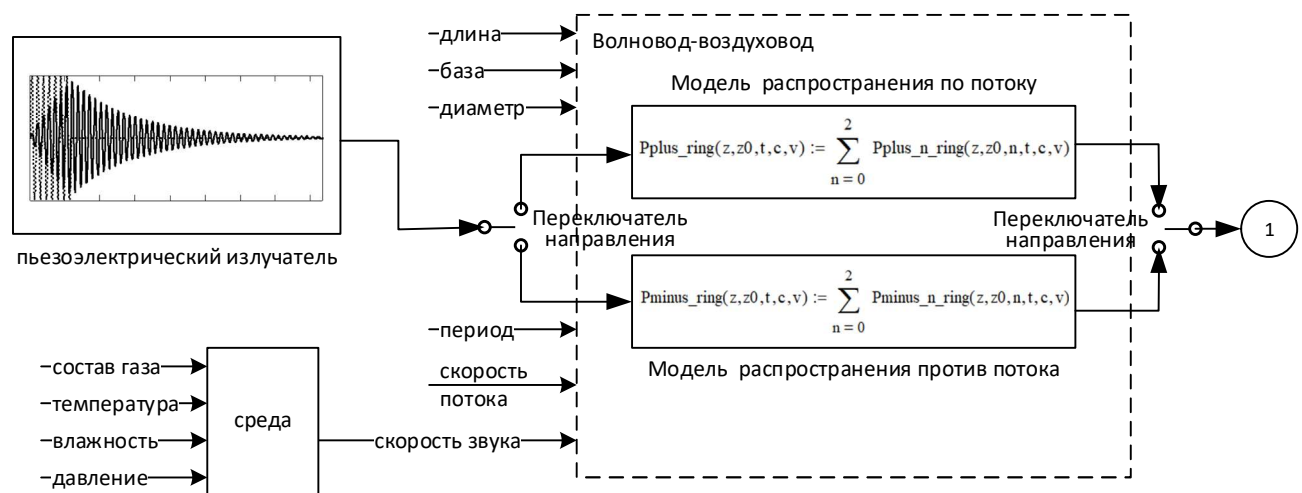


Рис. 3.7. Структурная схема замещения волновода-воздуховода

Входными параметрами для управления блоком анемометрического канала здесь являются:

- геометрические размеры датчика;
- скорость звука рабочей среды;
- электрический сигнал с излучающего преобразователя;

Физические размеры датчика определяются его длиной, внутренним диаметром и расстоянием между преобразователями.

На скорость звука влияют несколько факторов – главные это состав газа и температура. Влажность и давление, как и запылённость мало влияют на скорость звука. Все они учитываются при моделировании.

Электрический сигнал, подаваемый на вход, учитывается в зависимости с его базовыми настройками, использующимися в модели распространения сигнала в волноводе-воздуховоде: n – количество импульсов в излучаемом сигнале, z – длина датчика, z_0 – расстояние между кольцами, a – радиус канала, ω – частота излучаемого сигнала, v – скорость потока.

Для компенсации погрешности измерения при изменении скорости звука среды, измерения проводятся по и против потока. Для управления направлением измерения используются переключатели направления измерения.

В модели учитываются c – скорость звука среды, t – температура среды, n – количество импульсов в излучаемом сигнале, z – длина датчика, z_0 – расстояние между кольцами, a – радиус канала, ω – частота излучаемого сигнала, v – скорость потока. Для распространения сигнала по потоку выражение имеет вид:

$$P_{plus_n}(z, z_0, n, t, c, v) := \sum_{nn=Nom-30}^{Nom+30} \frac{2 \cdot v_0 \cdot \rho \cdot (\omega_0 \cdot nn + v \cdot sp(\bullet)) \cdot \sin\left(sp(\bullet) \cdot \frac{h}{2}\right) \cdot (\exp(i \cdot sp(\bullet) \cdot z) \cdot \exp(-i \cdot sp(\bullet) \cdot z_0) \cdot \exp(i \cdot \omega_0 \cdot nn \cdot t) \cdot C(nn))}{sp(\bullet) \cdot sq\left[\left(\frac{\omega_0 \cdot nn}{c} \cdot a\right)^2 - \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{\mu_n}{a}\right)^2\right]}$$

Для распространения сигнала против потока:

$$P_{minus_n}(z, z_0, n, t, c, v) := \sum_{nn=Nom-30}^{Nom+30} \frac{2 \cdot v_0 \cdot \rho \cdot (\omega_0 \cdot nn + v \cdot sn(\bullet)) \cdot \sin\left(sn(\bullet) \cdot \frac{h}{2}\right) \cdot (\exp(i \cdot sn(\bullet) \cdot z) \cdot \exp(-i \cdot sn(\bullet) \cdot z_0) \cdot \exp(i \cdot \omega_0 \cdot nn \cdot t) \cdot C(nn))}{sn(\bullet) \cdot sq\left[\left(\frac{\omega_0 \cdot nn}{c} \cdot a\right)^2 - \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{\mu_n}{a}\right)^2\right]}$$

Где волновые числа для распространения в положительном и отрицательном направлении:

$$sp(n, \omega, c, v) := \frac{\frac{v}{c} \cdot \frac{\omega}{c} - sq\left[\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{\mu_n}{a}\right)^2\right]}{\left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right]}$$

$$sn(n, \omega, c, v) := \frac{\frac{v}{c} \cdot \frac{\omega}{c} + sq\left[\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{\mu_n}{a}\right)^2\right]}{\left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right]}$$

4. Применение АСНИ при исследовании акустического анемометра и спирометра.

4.1. Автоматизированная система научных исследований акустических анемометров/спирометров.

Для настройки импульсного метода измерения акустических колебаний, необходимо излучать максимально эффективный сигнал [46, 50]. Он может варьироваться в зависимости от характеристик прибора и измеряемой среды по нескольким параметрам:

- частоте излучения, которая связана с диаметром волнового канала и частотными характеристиками пьезоэлектрических колец;
- количество импульсов в пачке влияет на амплитуду раскачивания акустических колебаний и на длительность формируемого сигнала – она не должна накладываться на полезный сигнал в виде распространяющихся мод на приёмнике;
- период определяет дискретность измерения, он не может быть меньше, чем время обработки измерения;
- амплитуда должна обеспечивать надёжную передачу сигнала до приёмного преобразователя;

На рис. 4.1. представлена общая функциональная схема разработанной автоматизированной системы научных исследований. Источником излучения является «опорный сигнал», форма которого задаётся устройством управления – контроллером. Этот сигнал излучается в анемометрический канал при помощи пьезоэлектрического кольца. Далее распространяясь по волноводу-воздуховоду, поступает на приёмный преобразователь. Сигнал с приёмного преобразователя усиливается и фильтруется от посторонних помех, которые могут быть приняты приёмником, например, при механическом воздействии на датчик или помехи могут идти через измеряемую среду в виде наводок от других источников звука. Фильтр настраивается на частоту излучения

измеряемого сигнала. Полоса пропускания должна соответствовать резонансным характеристикам излучателя и приёмника.

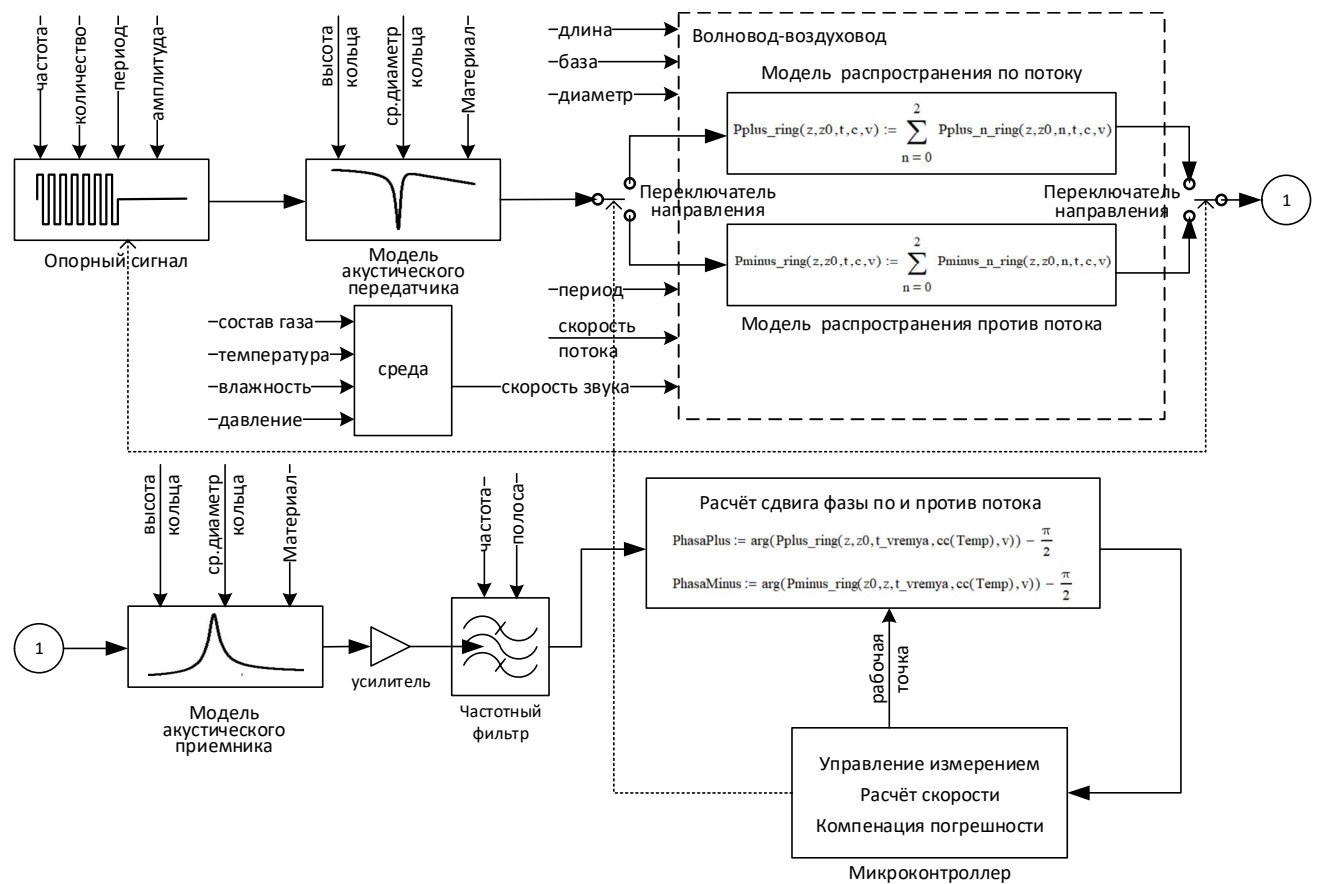


Рис. 4.1. Функциональная схема разработанной АСНИ

Для правильной обработки измерительного сигнала необходимо правильно выбрать рабочую точку – свободную от паразитных модовых составляющих и отражённых от обоих торцов сигналов.

Эта система учитывает все необходимые для исследования параметры:

- габаритные размеры: длина датчика и диаметр анемометрического канала;
- индивидуальные характеристики излучателя и приёмника: АФЧХ колец, радиус и высота (ширина) кольца.
- рабочие параметры излучателя: количество импульсов в пачке, частота излучения, частота измерения;
- необходимая точность измерения: абсолютная, относительная погрешность и диапазон измерения;

- рабочая среда: температурный диапазон, влажность, давление, состав среды;
- качество измерения: дискретность измерения, максимальная скорость изменения потока измеряемой газовой смеси;

При помощи разработанной автоматизированной системы, представленной на рис.4.2.1 и рис.4.2.2 можно симулировать отдельные элементы системы, например, получить осциллограммы с приёмного преобразователя и убедиться в работоспособности алгоритма импульсного способа измерения акустического анемометра или спирометра в заданных условиях.

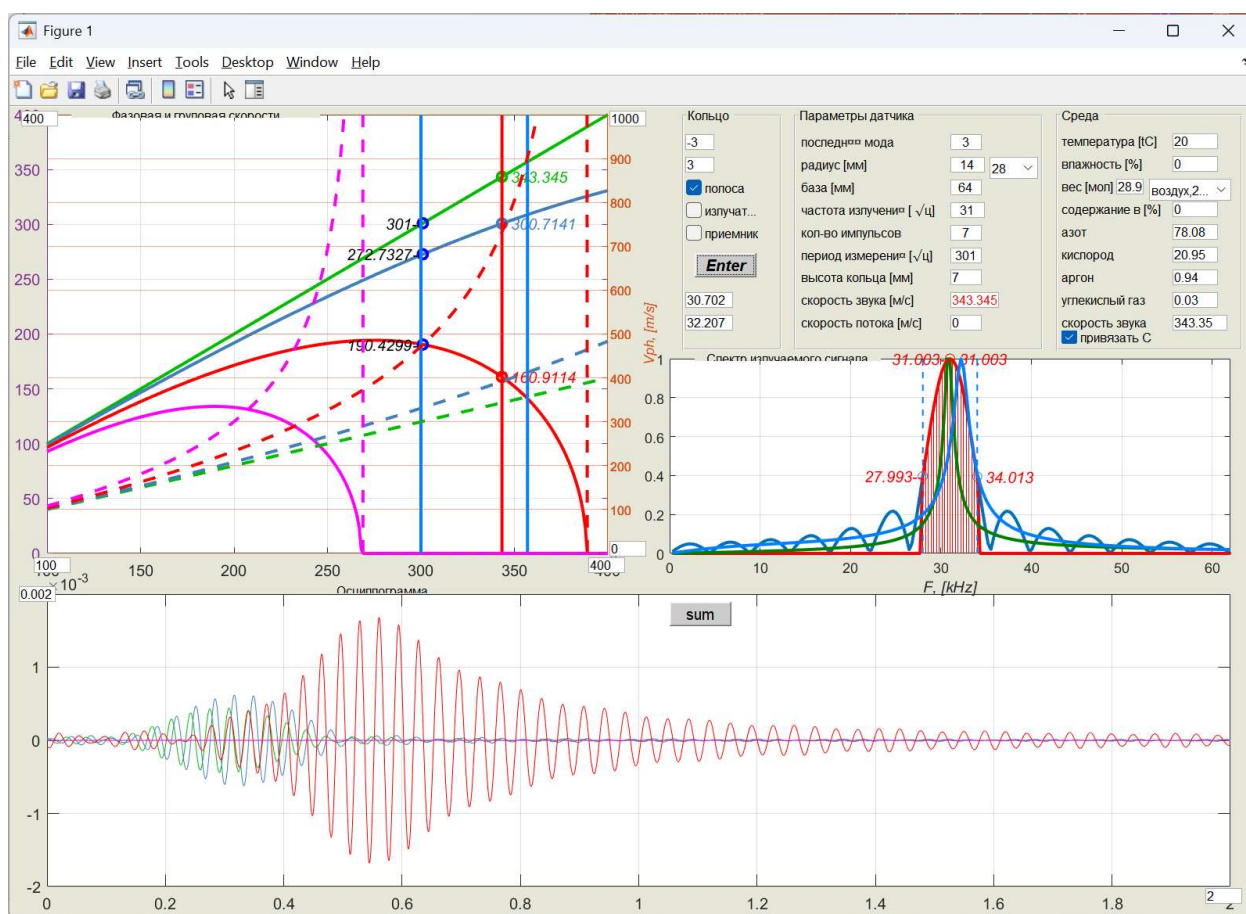


Рис. 4.2.1. Интерфейс управления АСНИ на примере работы в воздушной среде

Например, на рис.4.2.1 показано распространение сигнала в воздушной среде, где скорость звука меняется в диапазоне 300 – 350 м/с. Здесь видно, что 3 мода в этом случае не распространяется, а распространяются только моды 0, 1, 2.

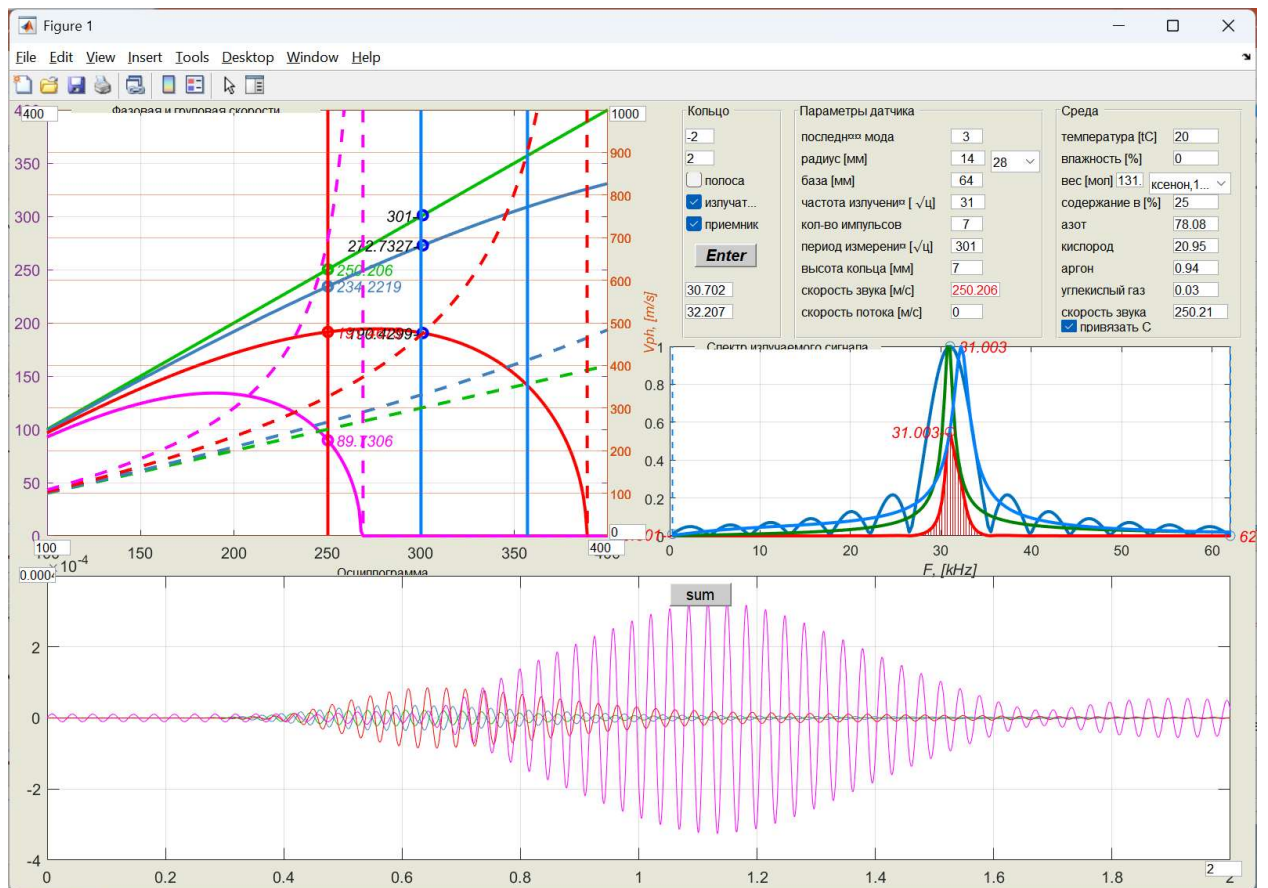


Рис. 4.2.2. Интерфейс управления АСНИ на примере работы в ксеноновой среде

На рис.4.2.2 показано распространение сигнала в ксеноновой среде, где скорость звука меняется в диапазоне 240 – 260 м/с. Здесь видно, что 3 мода в этом случае распространяется и является рабочей для этой системы измерения.

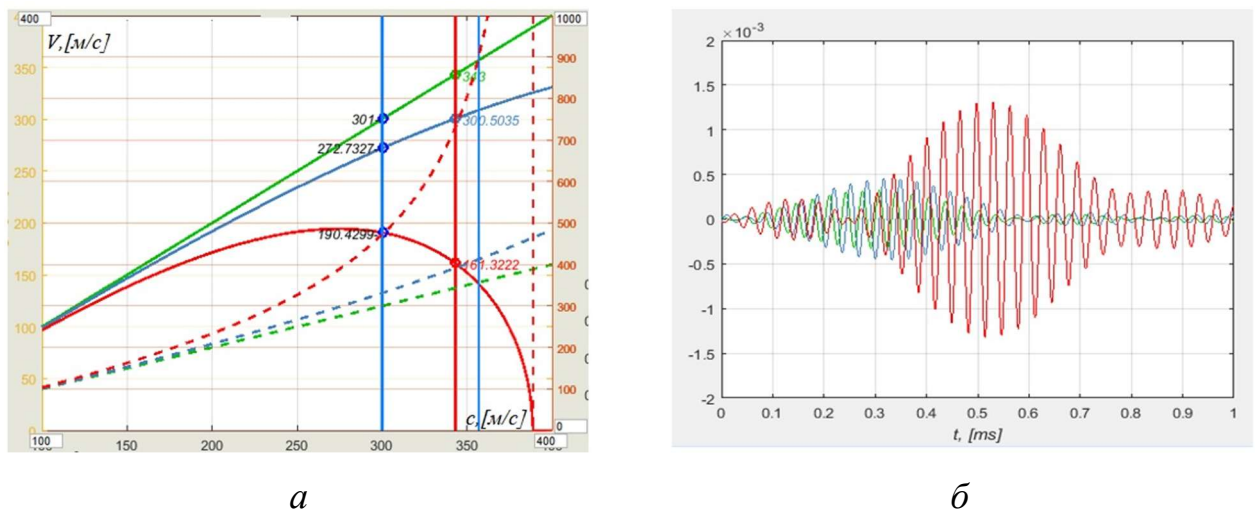
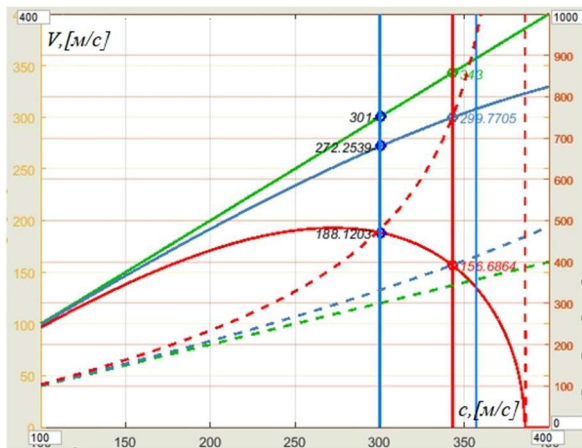
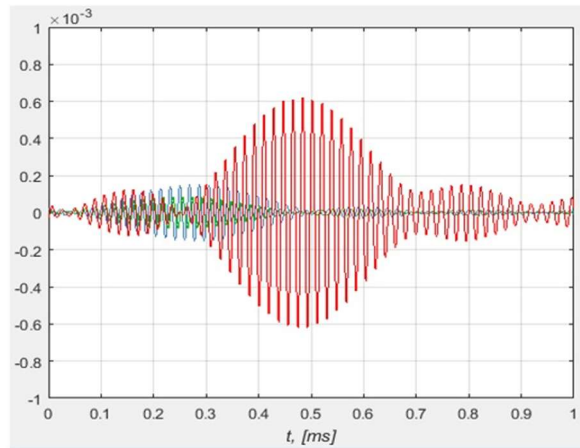


Рис. 4.3. а - кривые распространения групповой и фазовой скорости, б – осциллограмма приёмного преобразователя для датчика диаметром 28[мм]



а



б

Рис. 4.4. а - кривые распространения групповой и фазовой скорости, б – осциллограмма приёмного преобразователя для датчика диаметром 16[мм]

На рис. 4.3 и рис. 4.4 показаны кривые групповой и фазовой скорости (а) распространяющихся в измерительном канале мод и осциллограммы на приёмном кольце (б) для датчиков с разными диаметрами – 28 и 16 мм.

При помощи параметров, представленных на рисунке 4.5 производится настройка рабочих параметров исследуемого датчика.

Параметры датчика

последняя мода

3

радиус [мм]

14

28

база [мм]

64

частота излучения [√ц]

31

кол-во импульсов

7

период измерения [√ц]

301

высота кольца [мм]

7

скорость звука [м/с]

343.345

скорость потока [м/с]

0

Рис. 4.5. Настройка рабочих параметров датчика

Здесь можно выбрать количество распространяющихся мод, физические размеры датчика – радиус канала и базовое расстояние между датчиками. Чем дальше датчики, тем дальше разойдутся принятые моды друг от друга и тем точнее будут измерения. Так же здесь задаётся опорный сигнал – частота излучения, количество импульсов в пачке и период повторения. Здесь же

задаётся высота колец излучающего и принимающего – это высота кольца в лежащем положении. От неё зависит мощность распространения излучаемого сигнала. Помимо характеристик датчика здесь задаются главные характеристики рабочего потока – скорость звука и скорость потока.

Точные характеристики рабочей среды можно задавать при помощи интерфейса показанного на рис. 4.6.

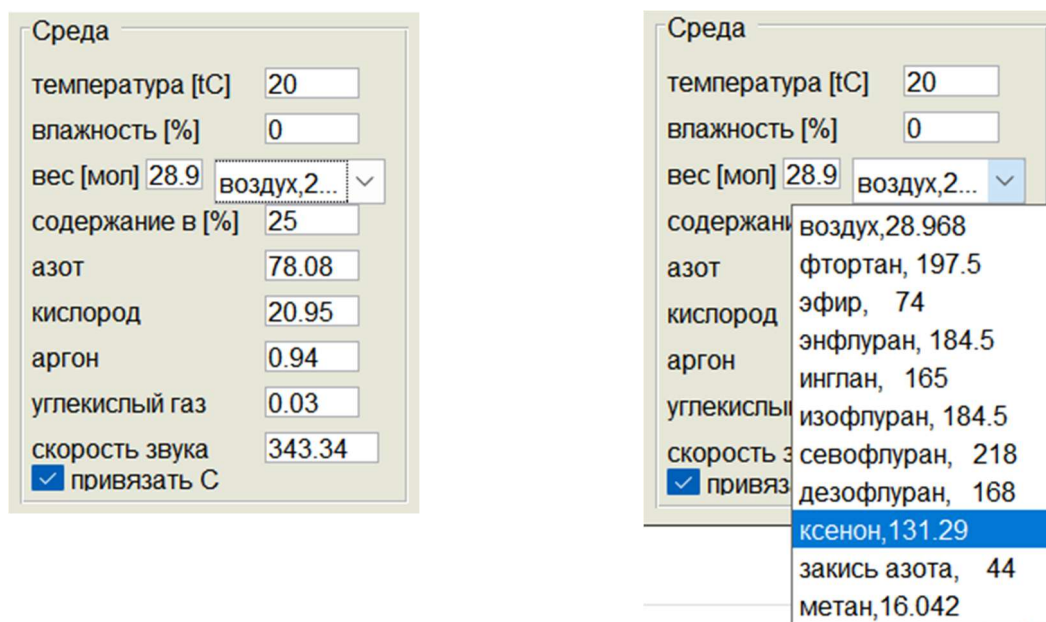


Рис. 4.6. Настройка рабочих параметров датчика

Здесь можно выбрать составляющие газовой смеси через молекулярный вес составляющих этот газ. Его можно выбрать из выпадающего меню и ли задать вручную. Так же можно указать процентное содержание газа в воздушной смеси. Например, можно промоделировать ситуацию, когда будет повышенное содержание метана в атмосфере для работы анемометра, или состав смеси для наркоза с содержанием ксенона, введя его молекулярный вес и всё это при различных температурах. Для спирометрии актуально поэкспериментировать с составом газа, например, до и после выдоха, где можно более точно указать состав воздуха в различных пропорциях, составляющих этот газ.

На рис. 4.7 показан интерфейс выбора резонансных свойств излучателя и приёмника.



Рис. 4.7. Настройка полосы пропускания излучателя и приёмника

Здесь можно задать полосу пропускания, эмитирующую резонансные свойства колец или подставить АФЧХ реальных пьезоэлектрических колец, полученных экспериментально. Полоса пропускания для излучателя определяется резонансом кольца, а для приёмника – антирезонансом.

4.2. Исследования АЧХ и ФЧХ колец при разных температурах и влажности.

Для исследования АЧХ и ФЧХ пьезокерамических преобразователей в различных условиях, таких как изменение температуры и влажности была собрана измерительная установка, совмещённая с персональным компьютером, способная контролировать температуру и влажность и записывать снимаемые характеристики. Электрическая схема измерителя показана на рис. 4.8.

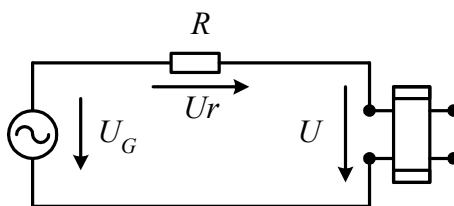


Рис. 4.8. Электрическая схема для измерения АЧХ и ФЧХ пьезопреобразователей.

На вход схемы U_G подаётся переменное напряжение амплитудой $3 \div 12$ вольт. Частота измерений варьируется в диапазоне от 0 до 100 кГц. Регистрируется выходные амплитуда и фазовый сдвиг напряжения на выходе U пьезоэлектрического преобразователя. Эти данные использовались для определения резонансной и антирезонансной частоты колец, и для расчёта параметров схемы замещения пьезопреобразователей [35].

Установка помещалась в климатоканеру КТК-800, где изменялись температура, влажность, давление. В результате получены следующие экспериментальные данные (рис. 4.9, 4.10).

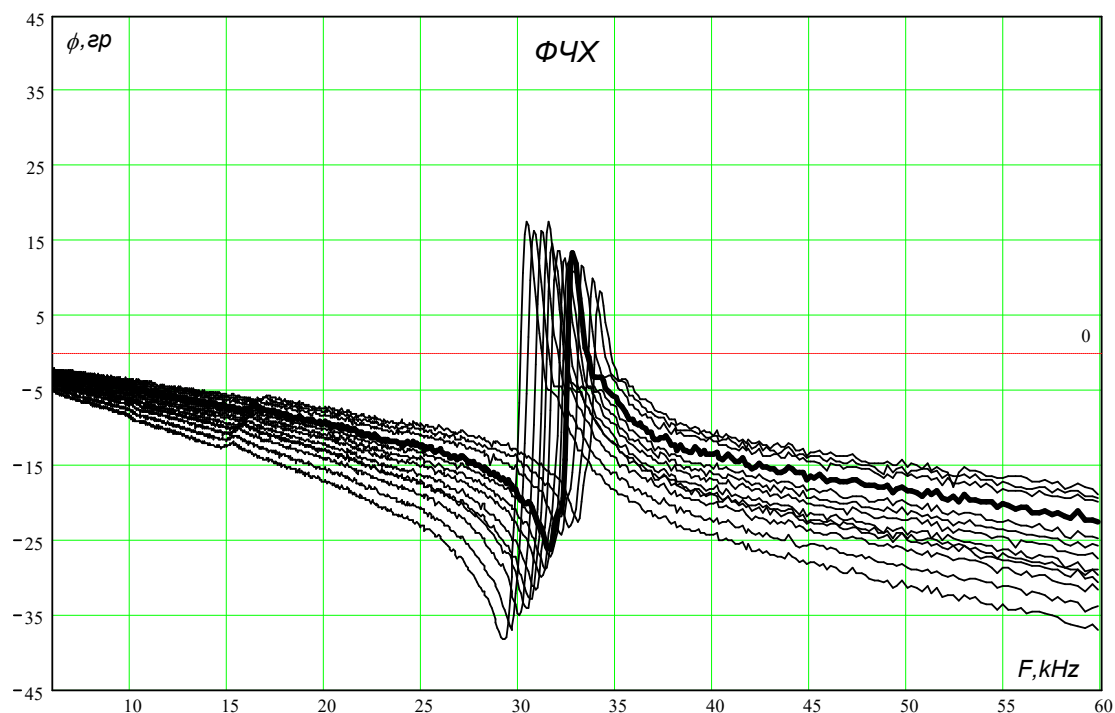


Рис. 4.9. Фазочастотные характеристики напряжения на входе электроакустического преобразователя, снятые при различных значениях температуры.

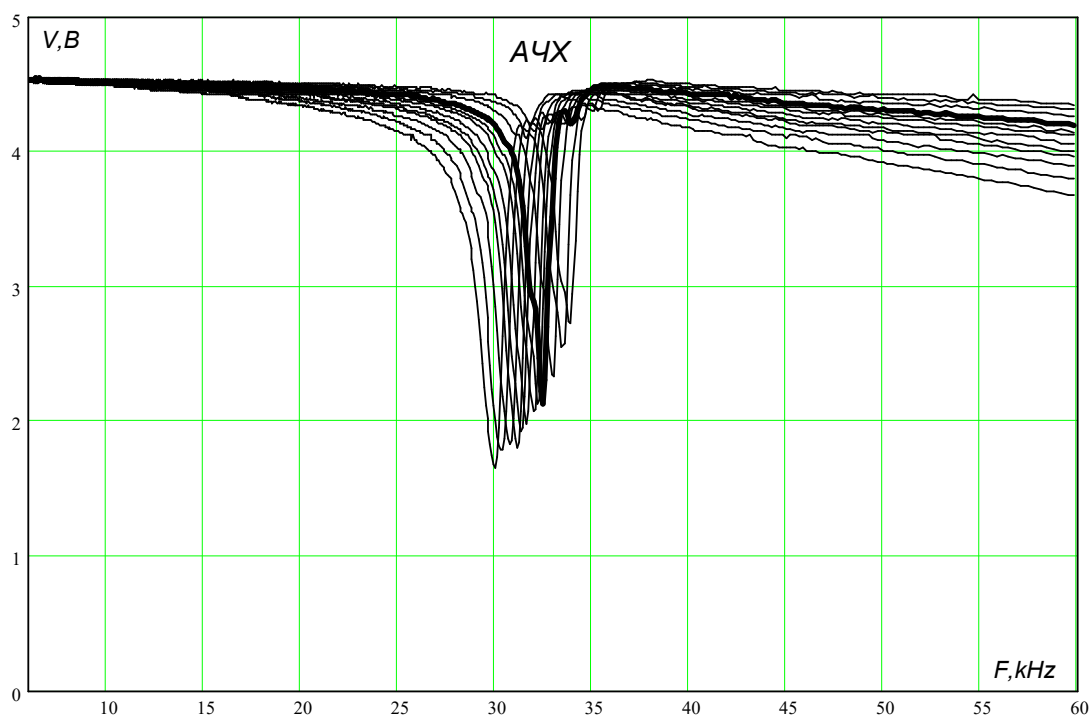


Рис.4.10. Амплитудочастотные характеристики напряжения на входе электроакустического преобразователя, снятые при 40°С различных значениях температуры.

На графиках АЧХ минимумы и максимумы соответствуют резонансу и антирезонансу. Мы видим, что при изменении температуры частоты резонанса и антирезонанса изменяются. Обработка полученных данных позволила установить зависимость частоты резонанса и антирезонанса от температуры (рис.4.11).

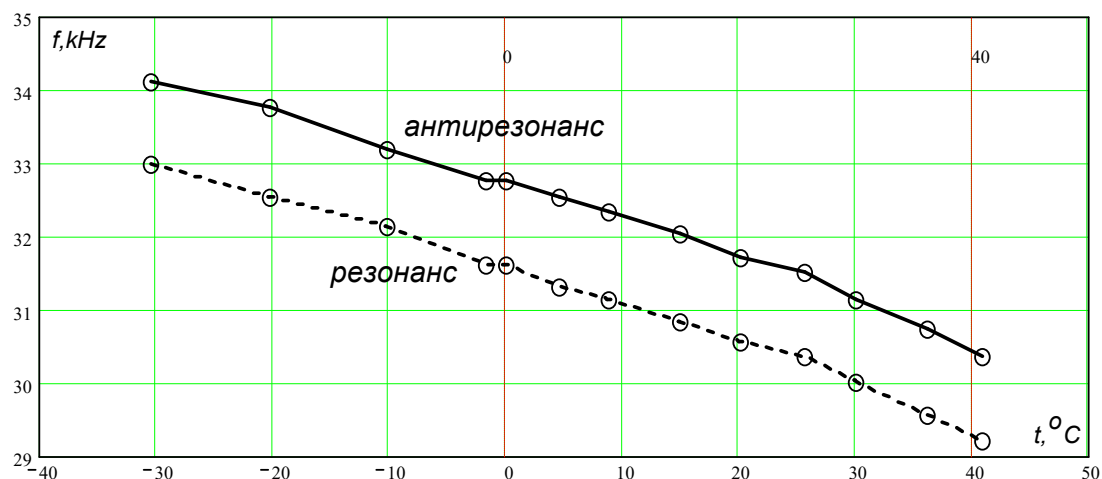


Рис. 4.11. Зависимость частоты резонанса и антирезонанса от температуры.

Из графиков ФЧХ на рис.4.12, проследив изменение фазы от температуры при фиксированной частоте, получаем:

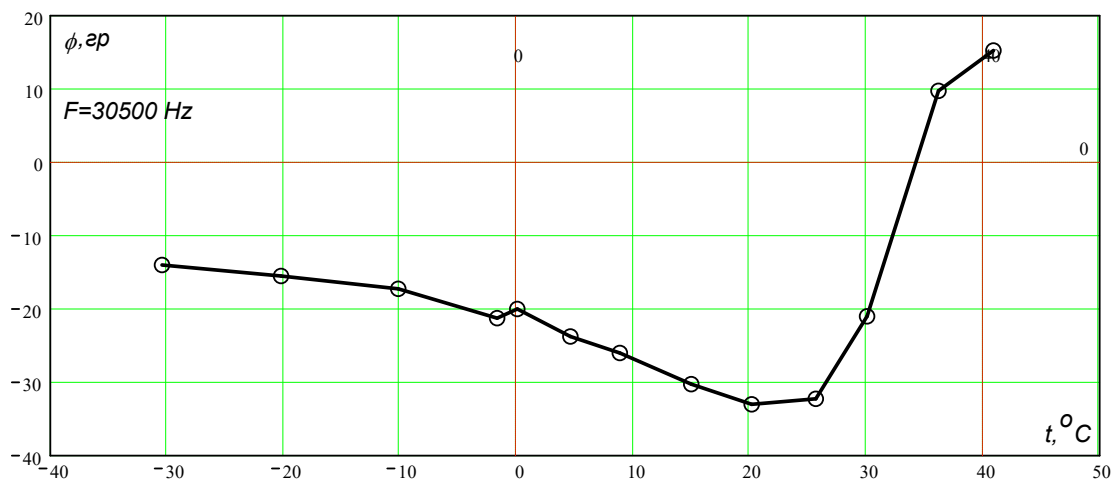
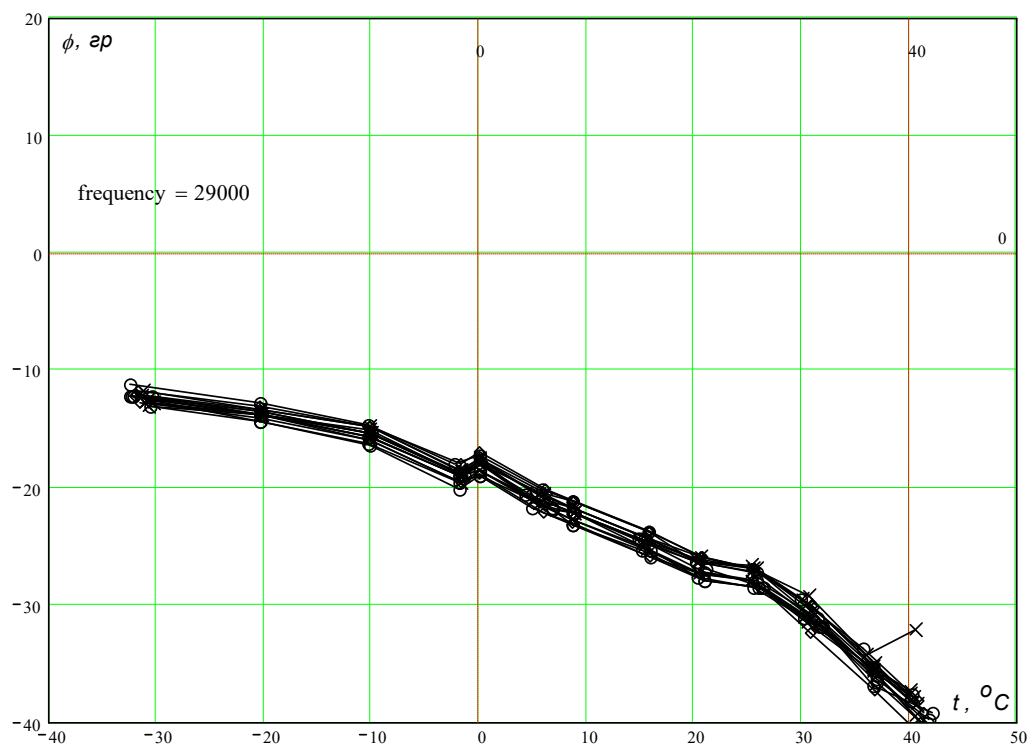
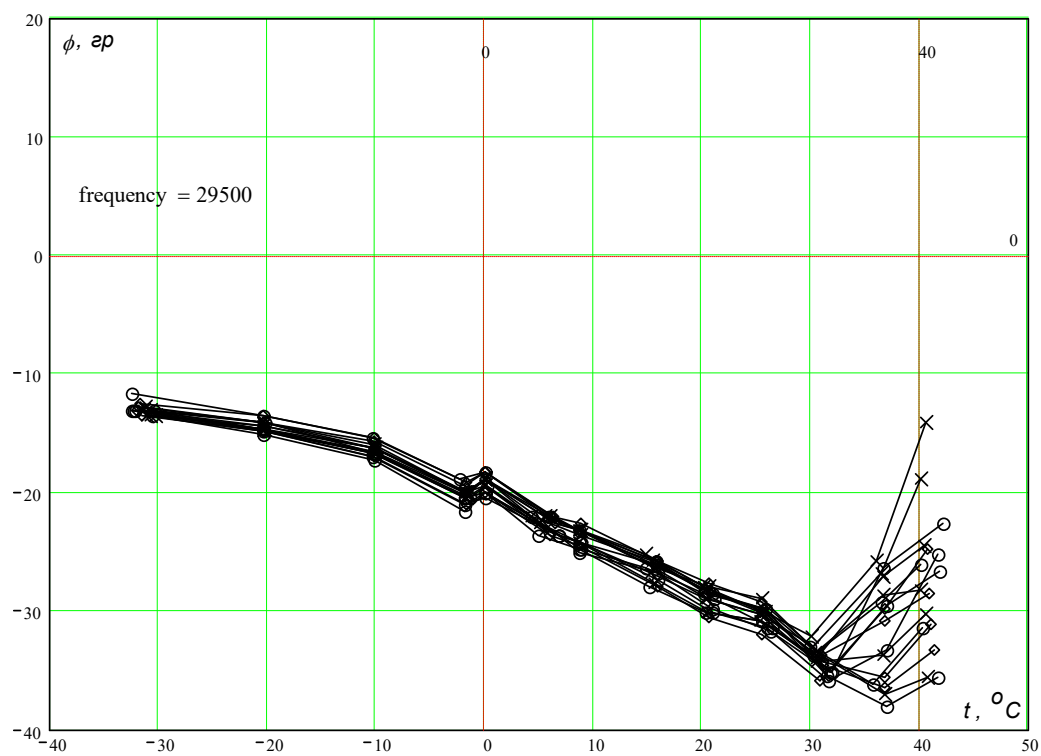


Рис. 4.12. Зависимость начальной фазы от температуры при частоте 30.5 кГц

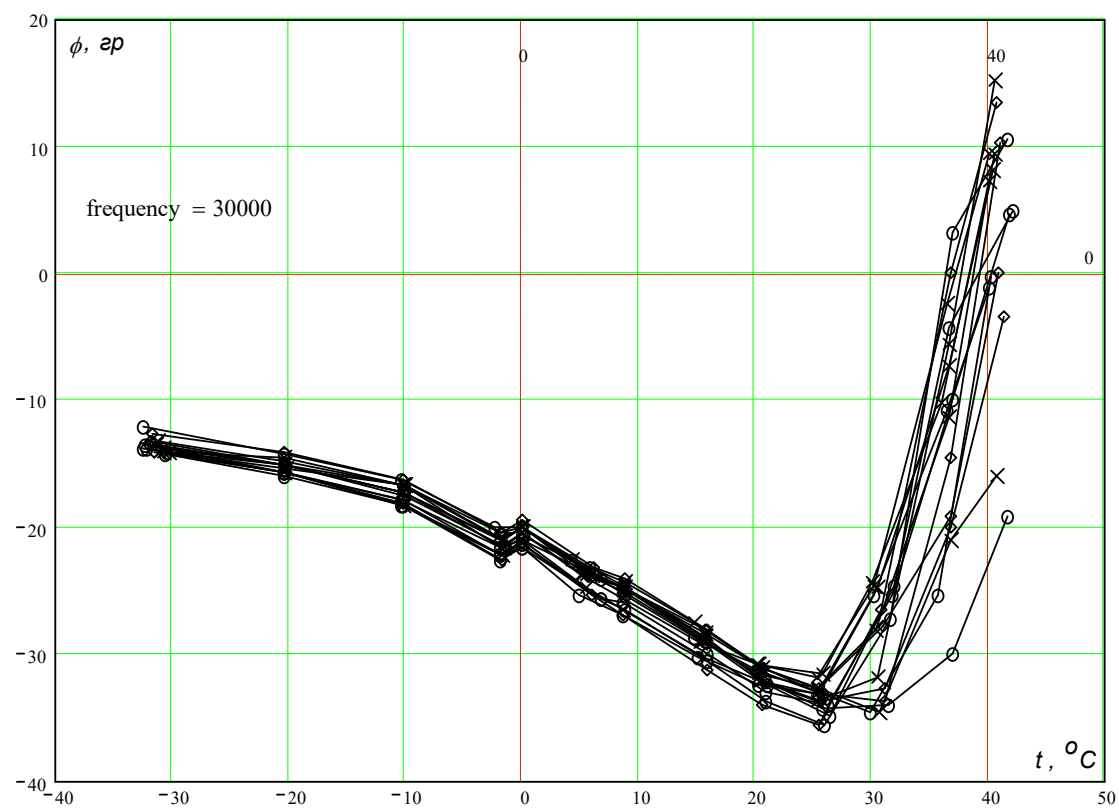
Если взять данные с 16 колец и посмотреть на полученную картину, то мы увидим, что разброс параметров довольно существенный. На рис. 4.13. показаны фазовые зависимости от температуры для 16 колец, построенные на одном графике. Данные приводятся для различных значений частот от 29 до 34 кГц.



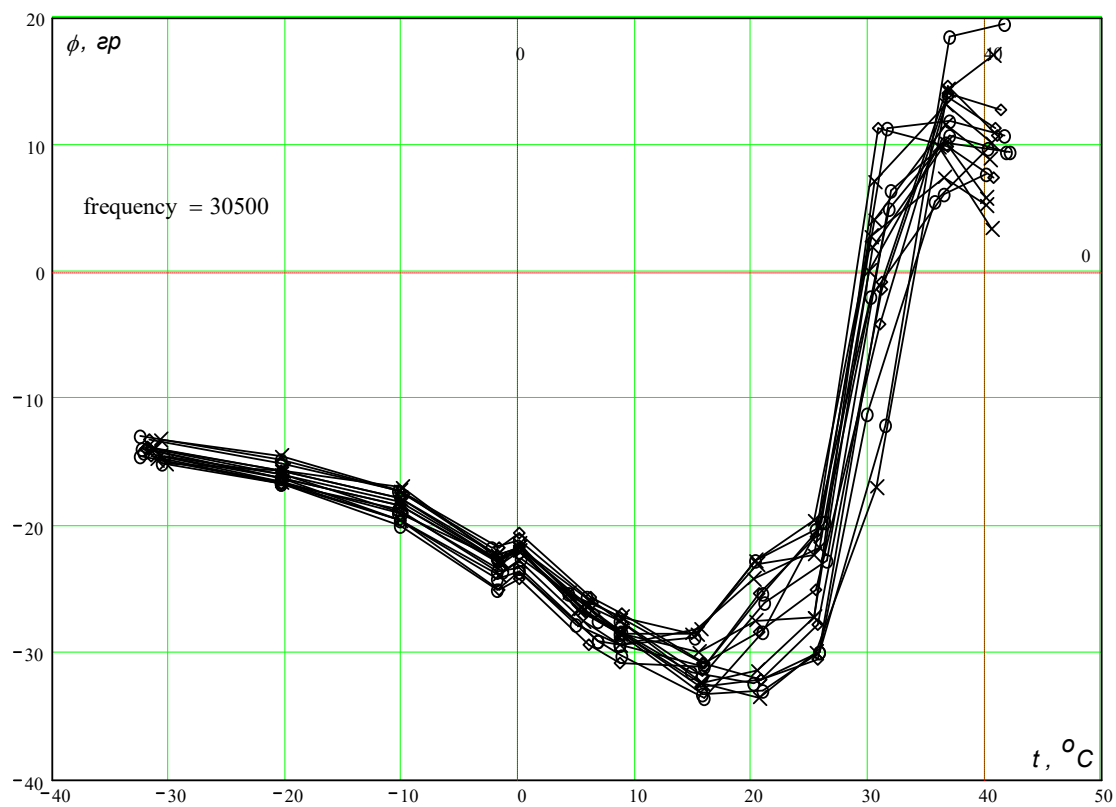
a)



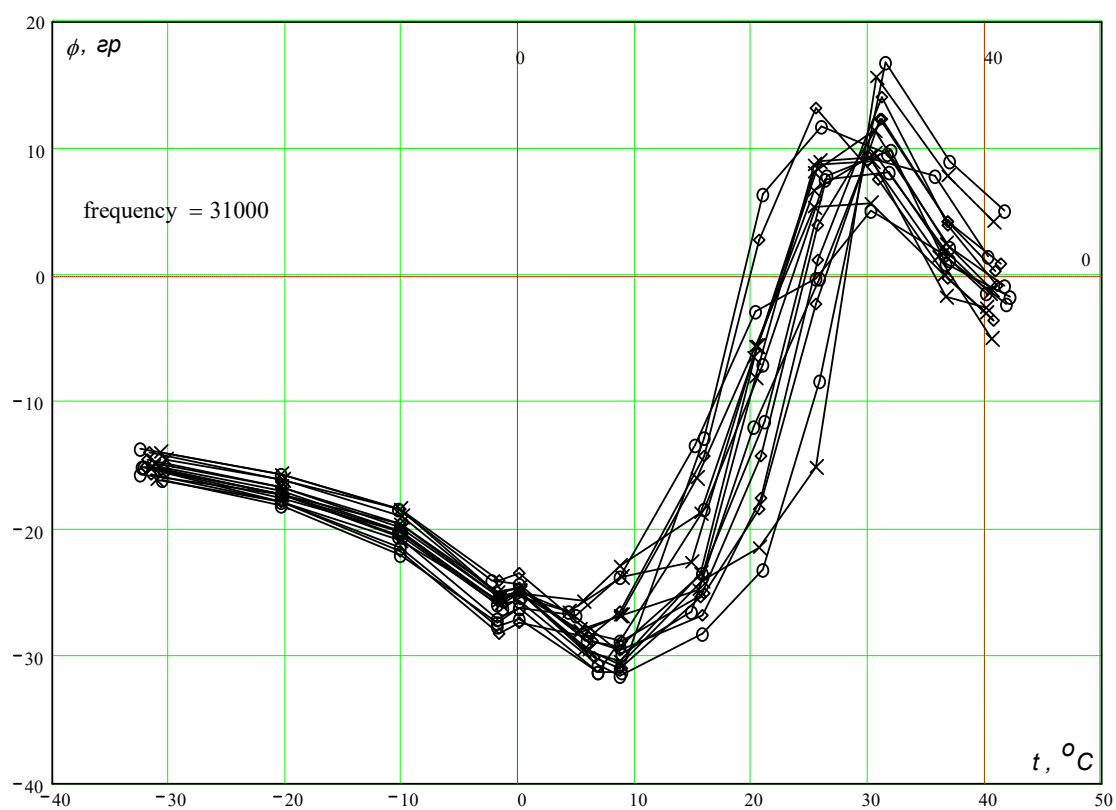
б)



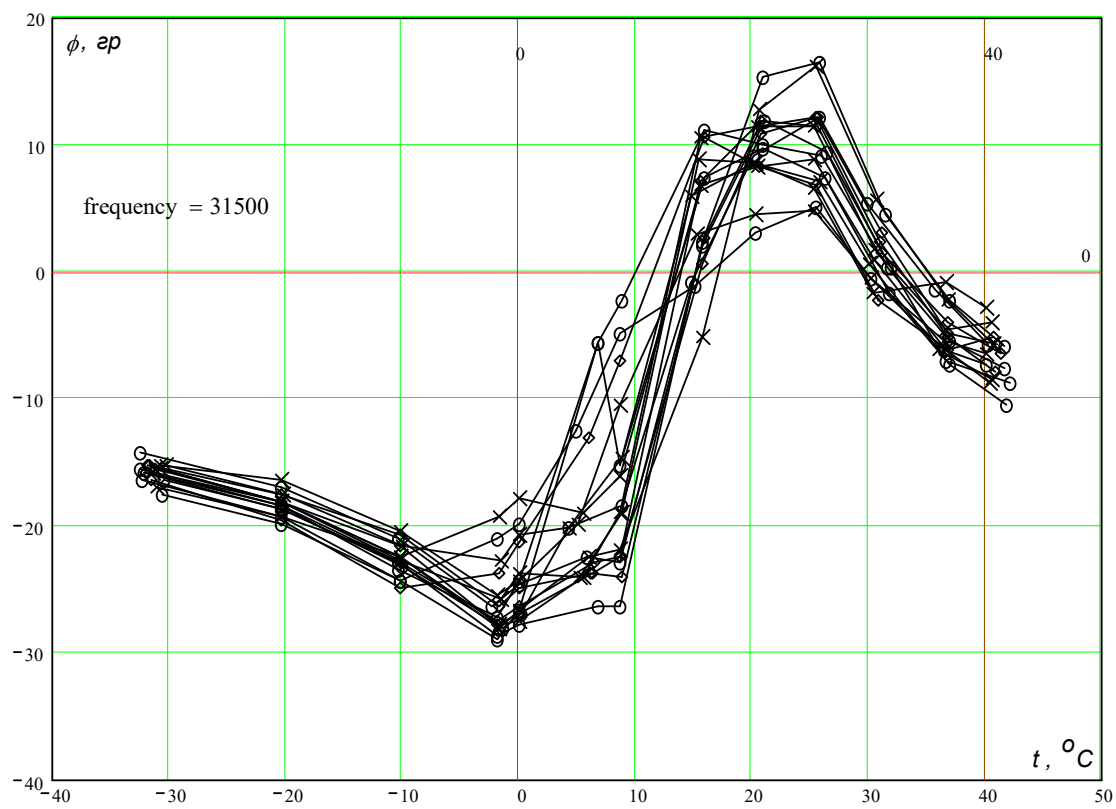
в)



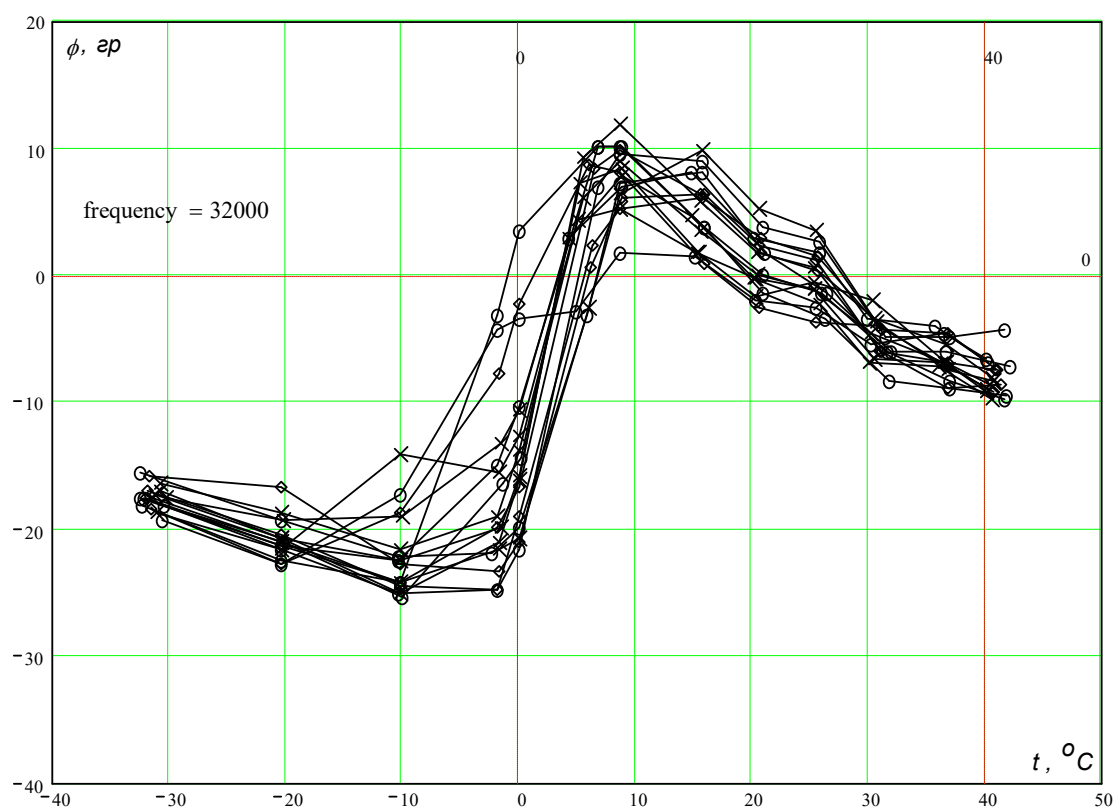
2)



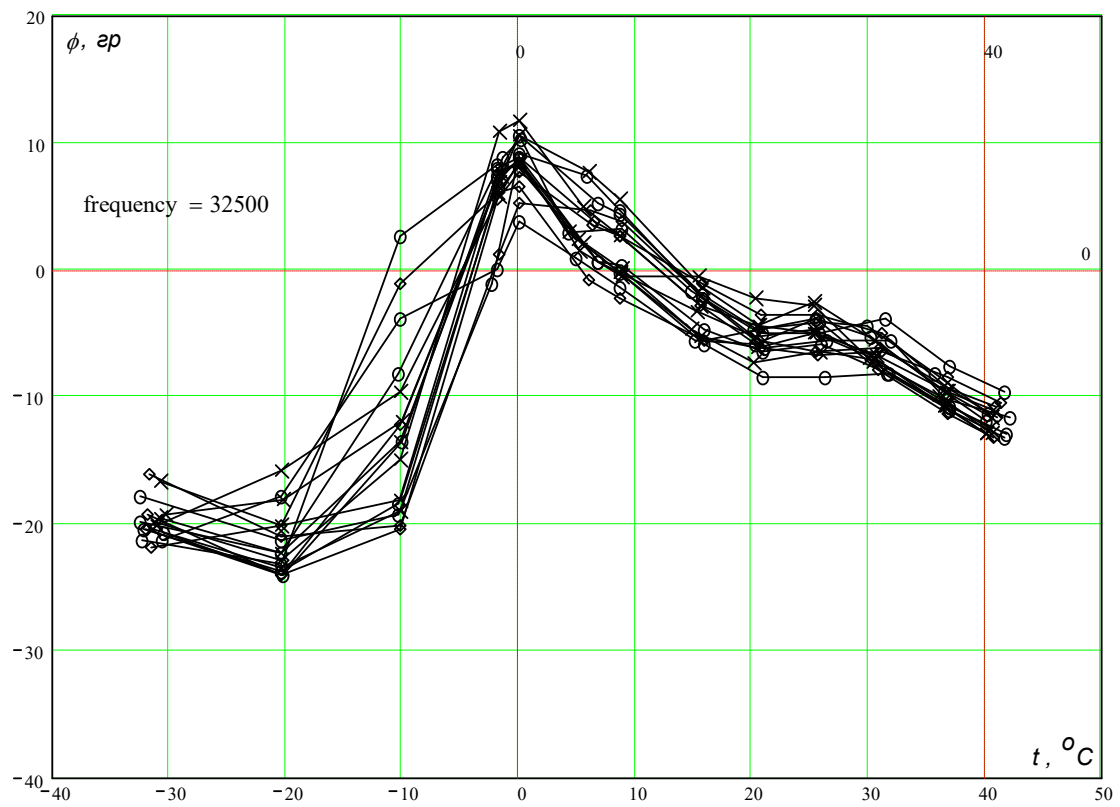
3)



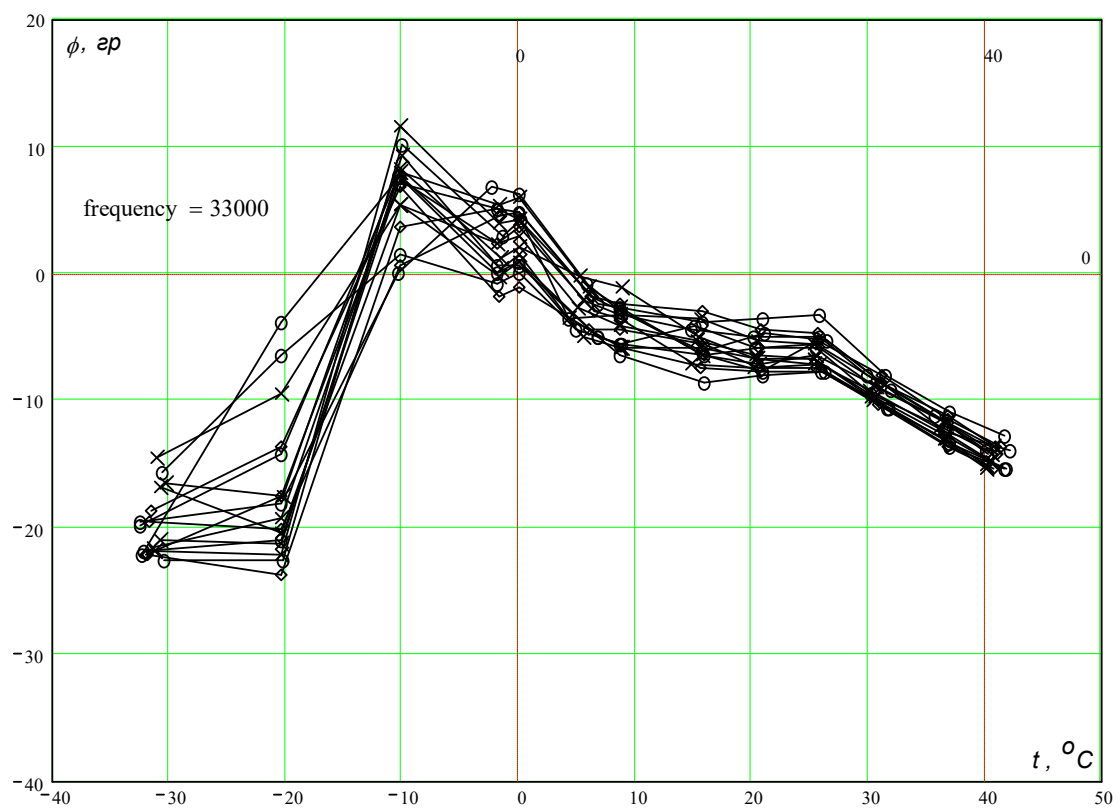
e)



жс)



3)



u)

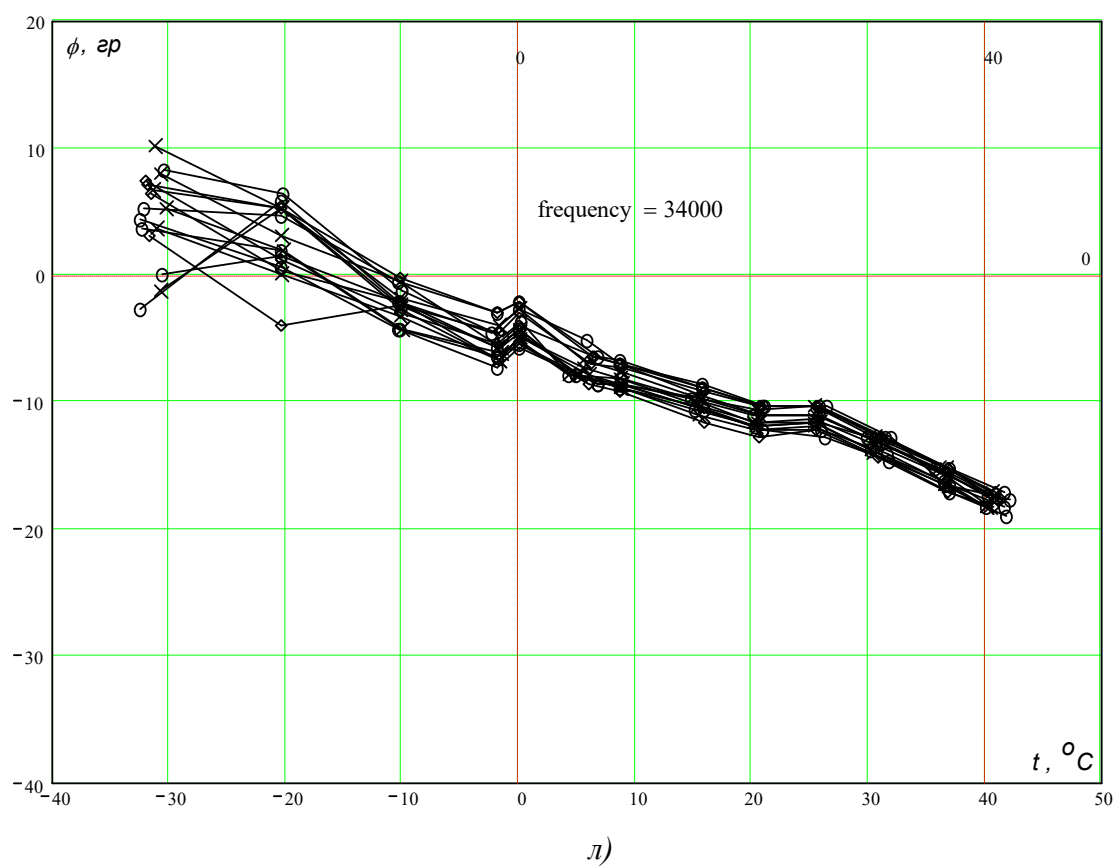
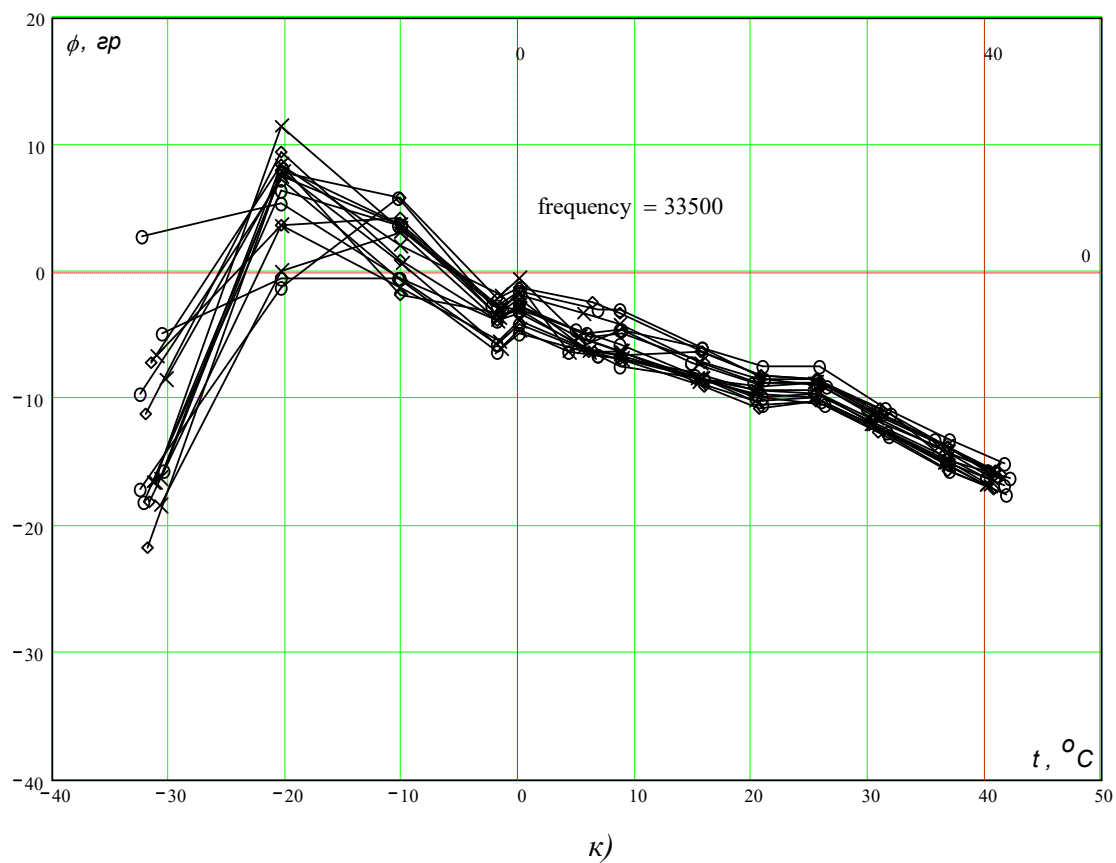
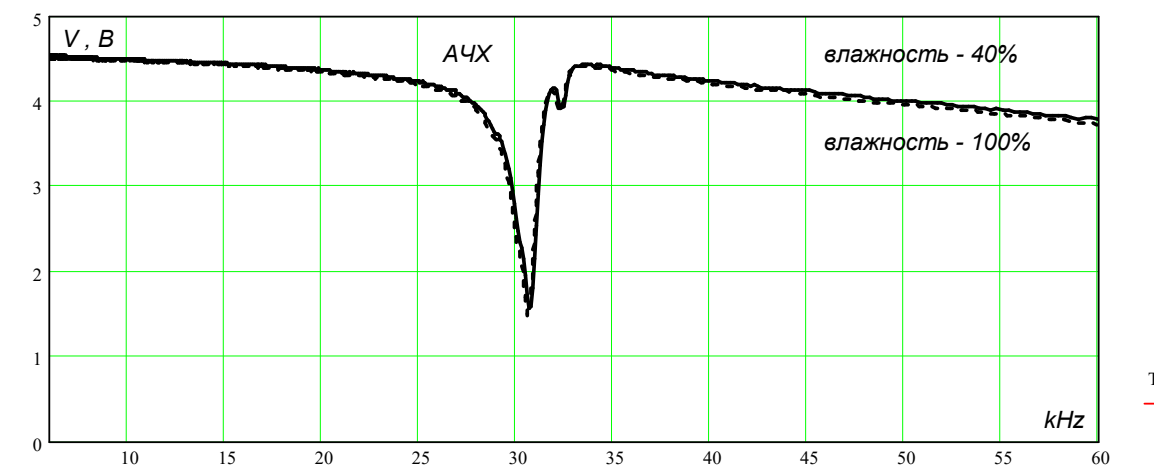
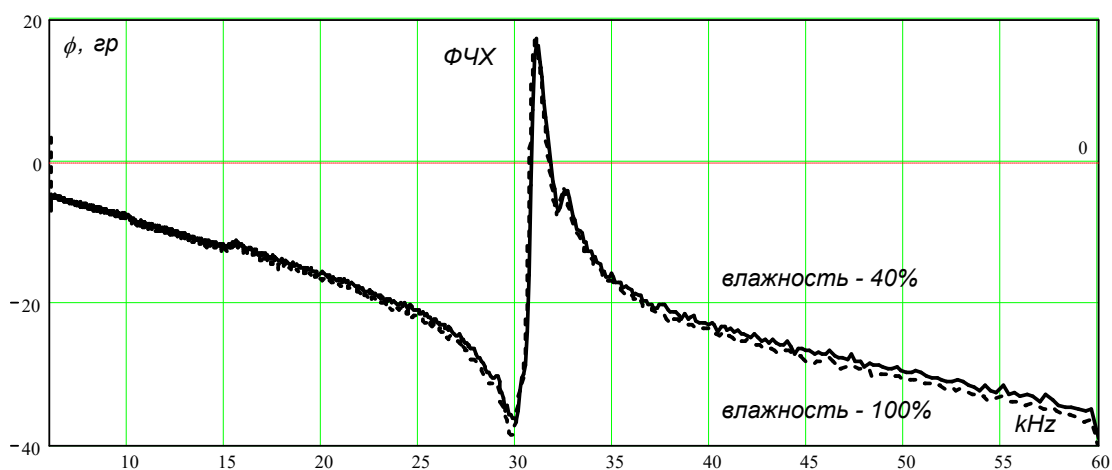


Рис. 4.13. Зависимости фазового сдвига напряжения на входе 16 пьезопреобразователей от температуры при различных значениях частоты (а – л)

Специально исследовалось влияние влажности на характеристики преобразователя. Результаты показаны на рис 4.14. Из графиков видно, что частотные характеристики при влажности 40% и 100% практически совпадают.



а)



б)

Рис. 4.14. АЧХ и ФЧХ напряжения на входе пьезопреобразователя при двух значениях влажности 40% (сплошная линия) и 100% (пунктирная линия)

В результате эксперимента видно, что резонансные и антирезонансные частоты исследованных колец зависят от температуры. При изменении температуры от -30°C до $+40^{\circ}\text{C}$ резонансы сдвигаются примерно на 4 КГц. Влажность на АФЧХ практически не влияет. При разработке прибора

необходимо учитывать влияние ухода резонансной частоты колец при изменении температуры в пределах рабочего диапазона.

4.3. Исследование параметров сигналов излучателя

Для выбора оптимальных параметров работы импульсного акустического анемометра необходимо определить: частоту излучения импульсов в пачке; количество импульсов в пачке; минимальное время повторения измерения; амплитуду излучаемого сигнала; расстояние между датчиками; расстояние от датчика до торцов трубки, а также подобрать пьезокерамические преобразователи по АФЧХ;

От частоты излучения импульсов в пачке зависит форма излучения акустических волн в анемометрический канал. При разложении пачки импульсов в ряд Фурье и учитывая резонансные свойства кольца (АЧХ) видно, что излучаемый сигнал искажается и принимает более размытый вид (см. рис. 4.15), что негативно сказывается на разделении мод друг от друга.

Рассмотрим, каким образом ограничение спектра преобразователем изменяет форму излученного импульса. В данной модели рассмотрим влияние колец только как ограничение спектра, без учета изменения формы его амплитудной части и сдвига фаз.

На рис. 4.15 показаны следующие графики: радиоимпульс с прямоугольной огибающей, его амплитудный спектр, на котором отмечены границы полосы пропускания преобразователя, и результирующий импульс, спектр которого равен нулю вне полосы пропускания преобразователя. Эти три графика приведены для семи значений частот заполнения радиоимпульса (рис. 4.15 а-е).

В зависимости от частоты заполнения спектр импульса будет смещаться относительно полосы пропускания преобразователя, которая в данной модели привязана к номеру моды, поскольку частота основной гармоника, т.е. частота следования импульсов не изменяется. По приведенным графикам можно

наблюдать тенденции изменения формы, огибающей излученного импульса, а также его амплитуды. Условием того, что основная энергия импульса все же передается в волновод, является попадание основного пика спектра в полосу пропускания преобразователя.

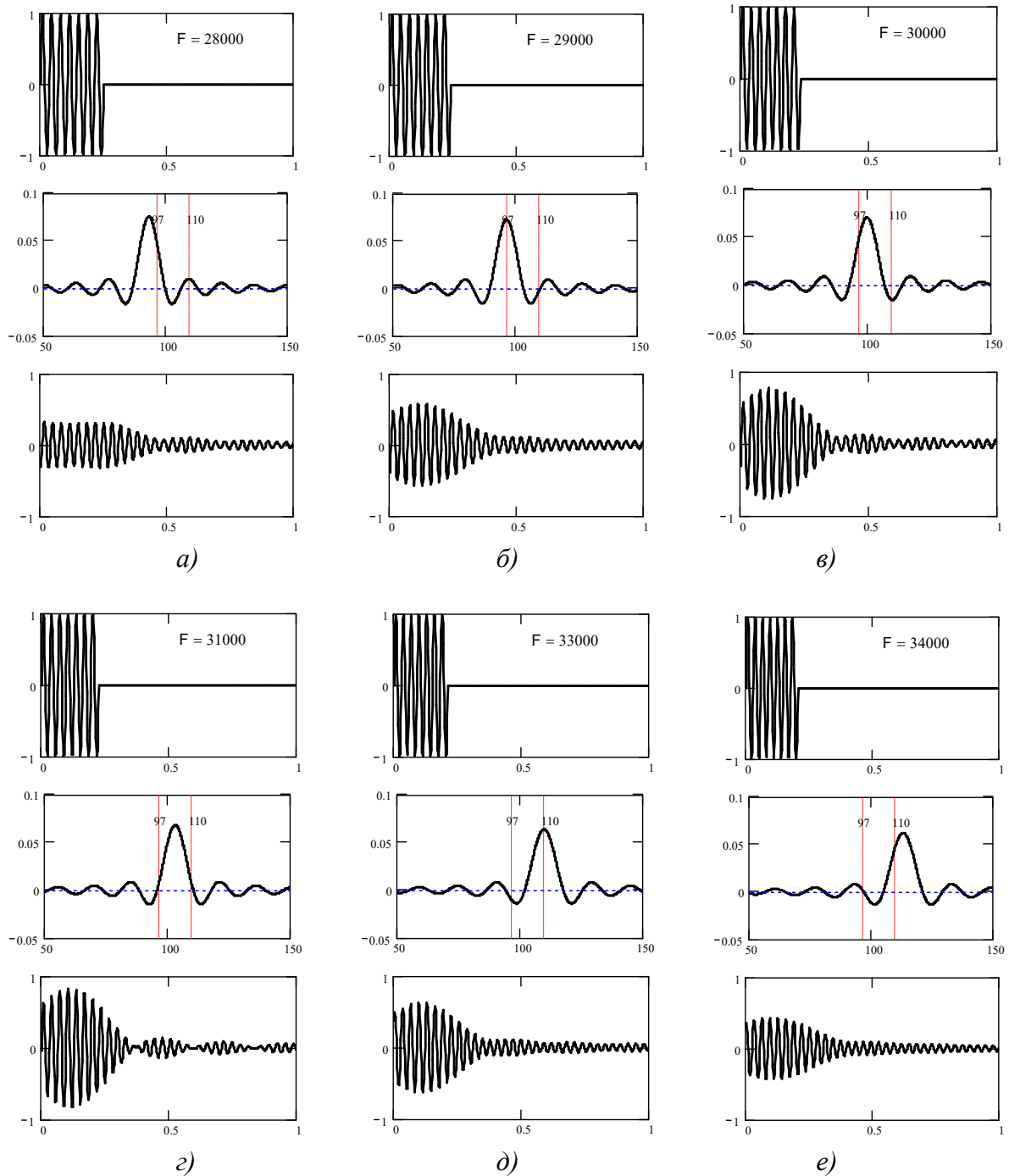


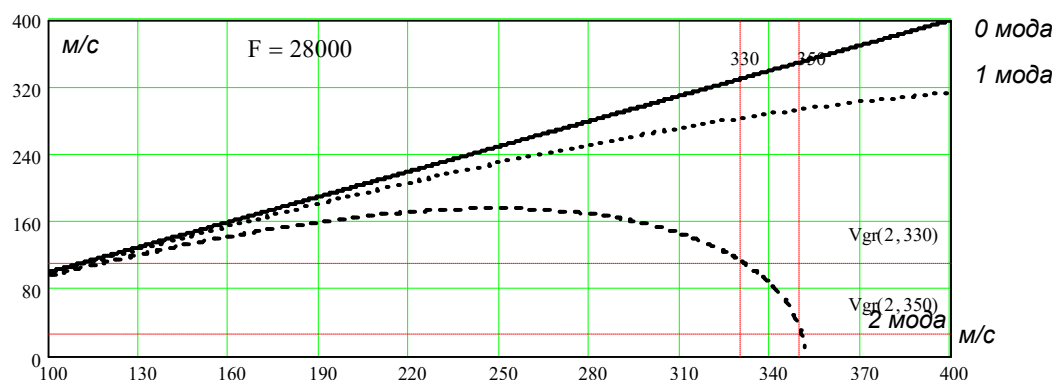
Рис. 4.15. Сигнал на входе преобразователя (верхний график), спектр входного сигнала и границы полосы пропускания преобразователя (средний график), сигнал на выходе преобразователя с учетом обрезания спектра по указанным границам. Графики приведены для различных значений частоты заполнения (рисунки а-е)

Необходимо отметить, что в реальном приборе ширина и положение полосы пропускания преобразователя не только индивидуальна для каждого преобразователя, но и изменяются при изменении температуры, давления и других внешних условий.

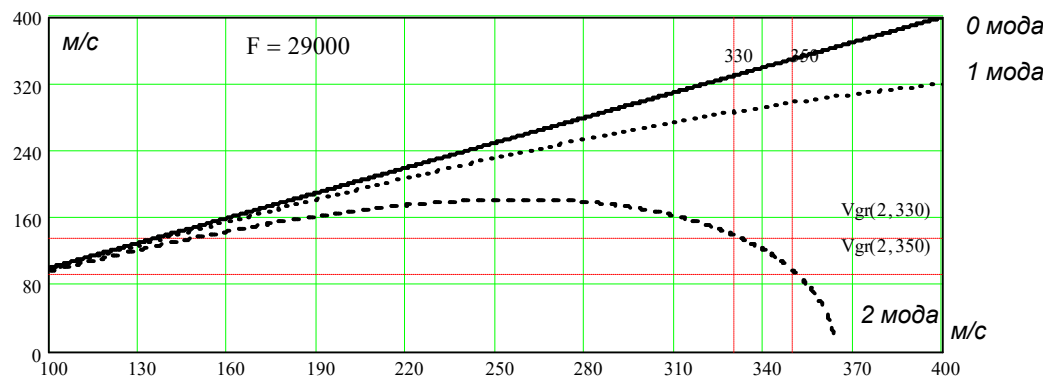
Изменения температуры скажутся не только на изменении положения полосы пропускания, но и на скорости распространения мод в волноводе. Для оценки этого влияния приводятся графики зависимости групповой скорости различных мод от скорости звука (рис. 4.16). Данные зависимости построены для различных значений частоты.

При выборе частоты необходимо учитывать, что работать на резонансе или антирезонансе нельзя, т.к. система становится очень чувствительной к малейшим отклонениям параметров элементов системы, вызванных внешними воздействиями.

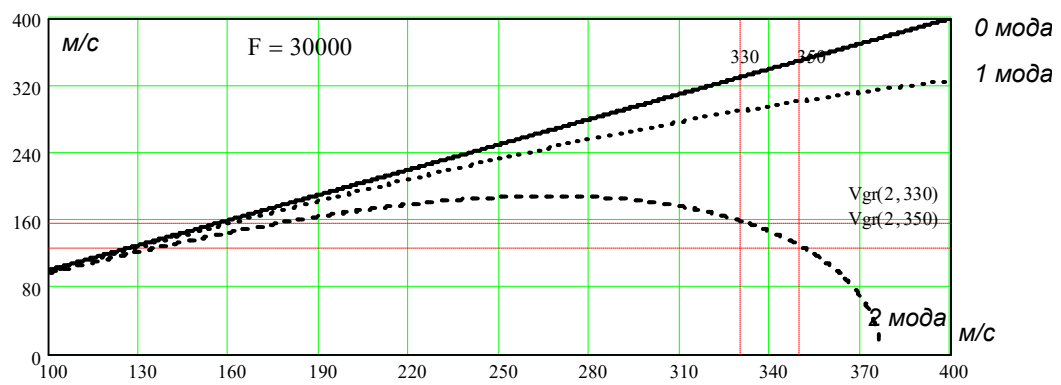
Из графиков (рис. 4.16.) видно, что чем меньше частота, тем ниже скорость распространения второй моды и, соответственно, больше отдаление по времени второй моды от остальных. Мы должны обеспечить работу в диапазоне температур: 0 – 40 °С, что соответствует скоростям звука в воздухе: 330 – 350 м/с (этот интервал изображен на графиках). В связи с этим мы видим, что разница между скоростями распространения второй моды на краях диапазона тем больше, чем ниже частота, что усложняет работу с подобной системой.



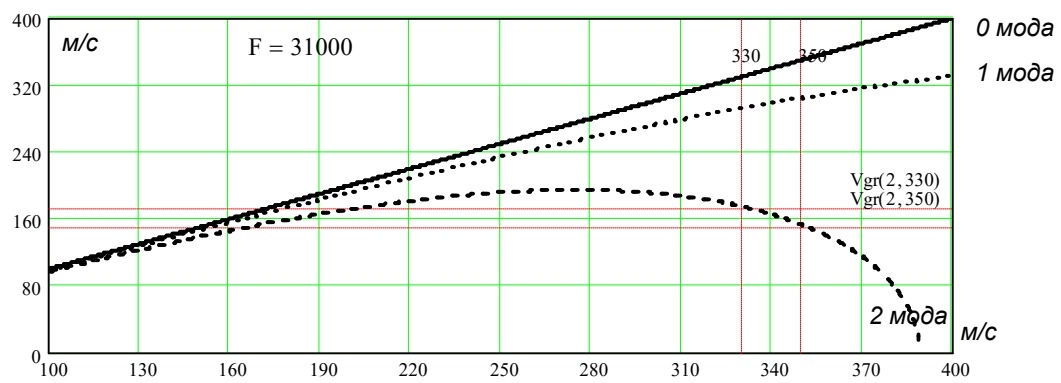
а)



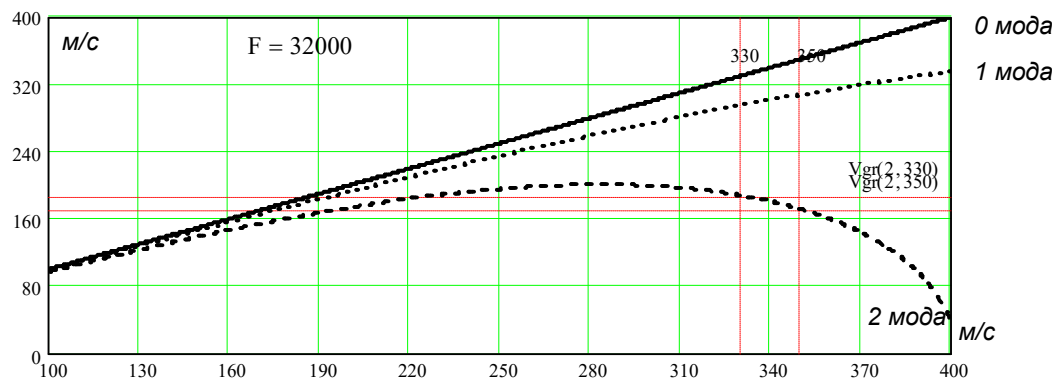
б)



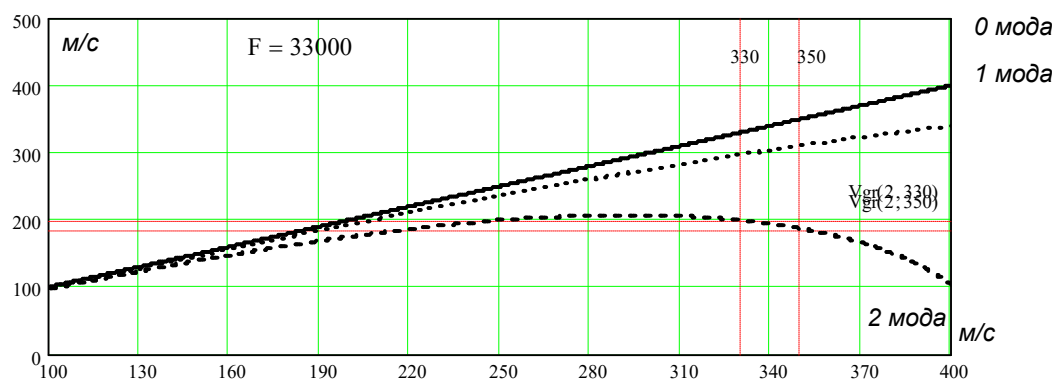
в)



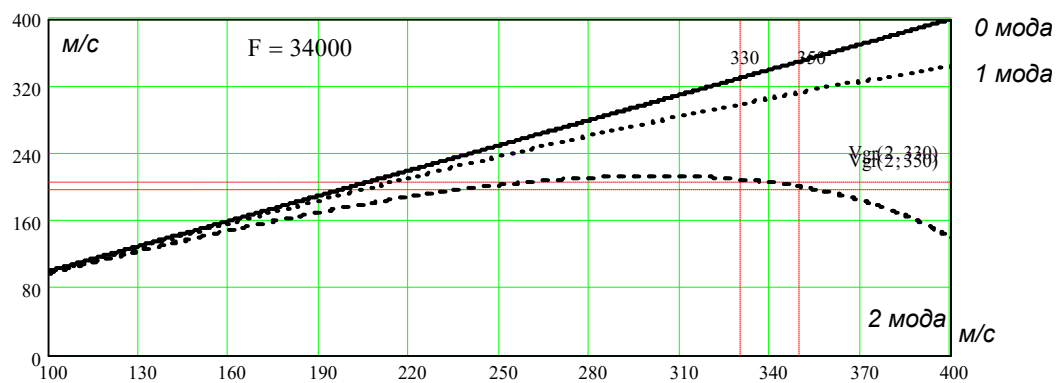
г)



d)



e)



ж)

Рис. 4.16. Зависимости групповой скорости распространения трех первых мод от скорости звука для разных значений частот.

Из графиков видно, что для низких значений частот изменения температуры, а, следовательно, и скорости звука существенно влияют на групповую скорость второй моды. Следовательно, при работе на второй моде показания анемометра будут подвержены влиянию изменения параметров окружающей среды.

При отклонении рабочей частоты от полосы пропускания кольца излучаемый сигнал размывается, что негативно влияет на излучаемый сигнал, из-за размывания составляющих мод, накладывающихся на сигнал.

Прохождение излученного сигнала от передатчика до приемника по волноводу-воздуховоду также зависит от частоты этого сигнала. При меньшей частоте – медленнее распространяется 2 мода.

На приемном преобразователе сигнал тоже зависит от частоты пришедшего сигнала. Полоса пропускания приёмника располагается выше полосы пропускания излучателя примерно на величину, равную разнице резонанса и антирезонанса. Что, в свою очередь, ведёт к размыванию составляющих сигнала и большей составляющей ошибки.

Таким образом, видно, что подбор частоты излучения очень важная и трудная задача. Она включает в себя учет многих параметров: степень искажения излучаемого и принимаемого сигнала, скорость распространения моды на краях диапазона изменения внешних воздействий (температуры, состава газа).

От количества импульсов в пачке зависит, насколько мощный сигнал будет излучен в канал и его длительность. Время приема модальных сигналов напрямую зависит от количества импульсов в пачке. Необходимо помнить, что кольцо является фильтром, и форма выходного сигнала зависит от этого.

На рис. 4.17 показано, как влияет количество импульсов в пачке на форму излучаемого сигнала. Построены графики аналогичные рис. 4.15, но для различного количества импульсов в пачке. В данной модели импульсу в пачке соответствует период частоты заполнения радиоимпульса. Чем больше

периодов заполнения, тем уже спектр импульса, тем больше вероятность, что его основной пик попадет в полосу пропускания преобразователя. Однако длительность импульса должна быть мала, чтобы информативный сигнал и отражения можно было бы разнести во времени, сохраняя длину волновода достаточно малой.

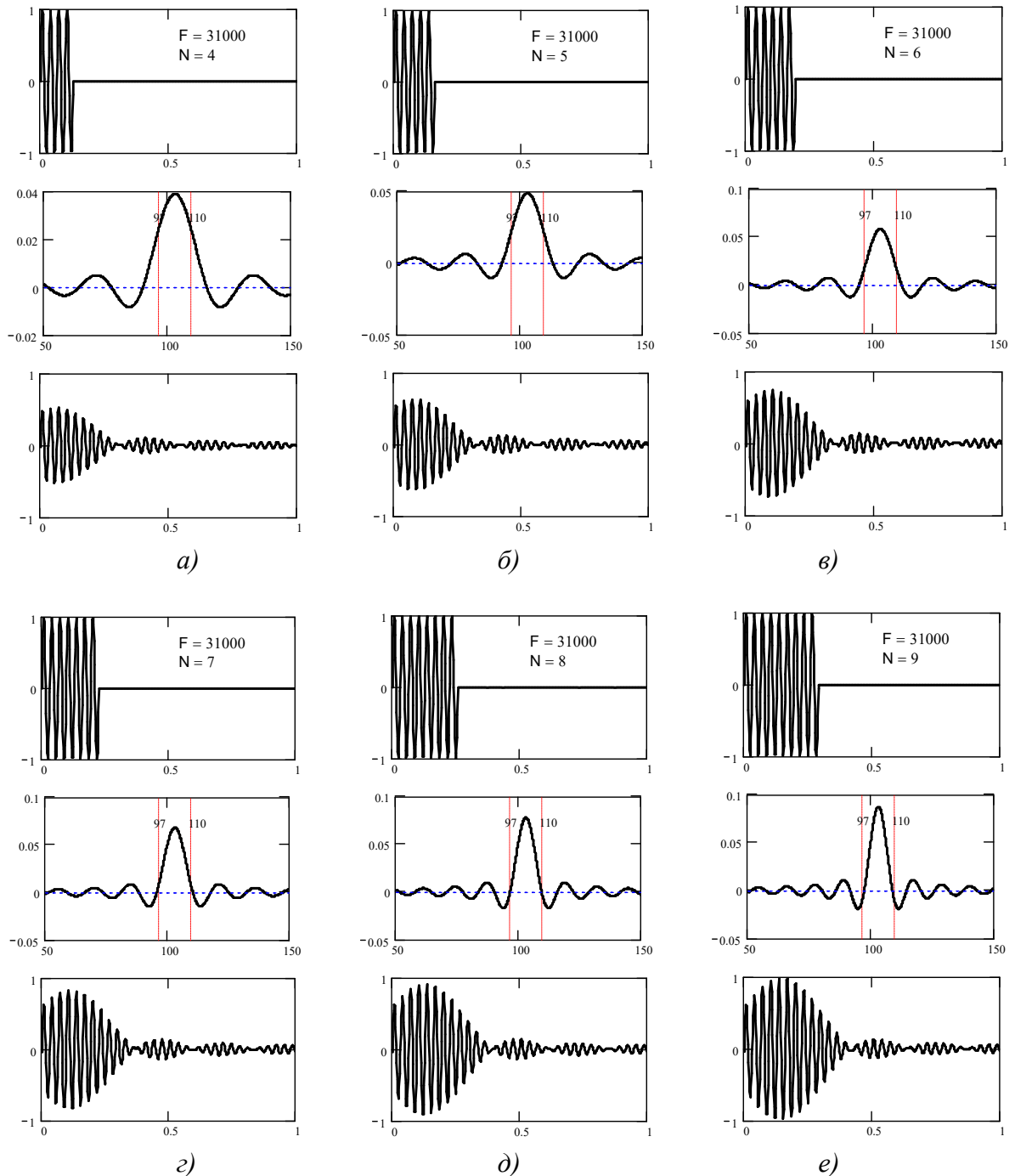


Рис. 4.17. Сигнал на входе преобразователя (верхний график), спектр входного сигнала и границы полосы пропускания преобразователя (средний график), сигнал на выходе преобразователя с учетом обрезания спектра по указанным границам.

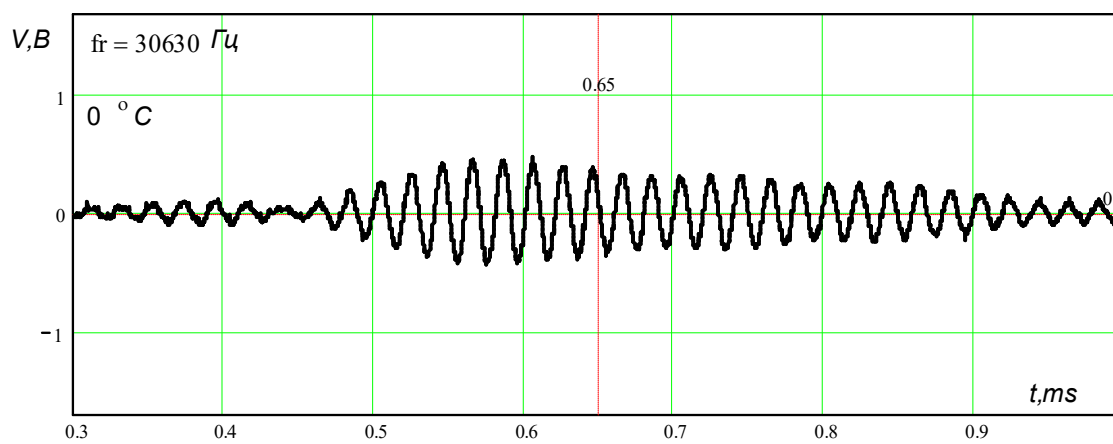
Интервал, разделяющий моды друг от друга, зависит как от количества импульсов, так и от длины базы. Ясно, что при увеличении расстояния, количество импульсов тоже может быть увеличено.

Подбор пьезокерамических преобразователей очень важная задача. Кольца должны быть подобраны из расчета стабильности работы датчика на всём диапазоне изменения окружающей среды. При изменении температуры кольцо может изменить свою резонансную и антирезонансную характеристику, причём у разных (не согласованных) колец эта величина будет разной, что приведёт к разным сдвигам фаз сигналов, что будет интерпретировано как скорость потока в канале. Также при разных частотах при измерении в одну и другую сторону аналоговый фильтр в электрической схеме, будет приносить ошибку по сдвигу фазы измеряемых сигналов из-за того, что фильтр настроен на резонанс, а вблизи резонанса сдвиг фаз имеет большие значения при малых вариациях частоты, что также приведёт к ложному приращению скорости.

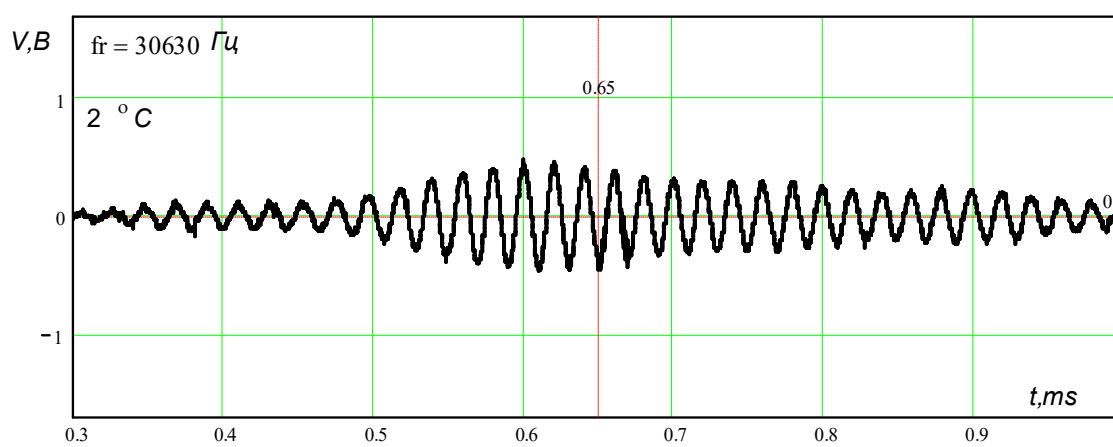
4.4. Сигнал на приемнике, как функция времени

Для комплексного исследования влияния изменения параметров окружающей среды на показания анемометра были сняты осциллограммы напряжения на приемном преобразователе при разных температурах (рис. 4.18). Данные были получены для анемометрического канала с размерами: 160мм – длина, 80мм – расстояние между преобразователями, 28мм – диаметр.

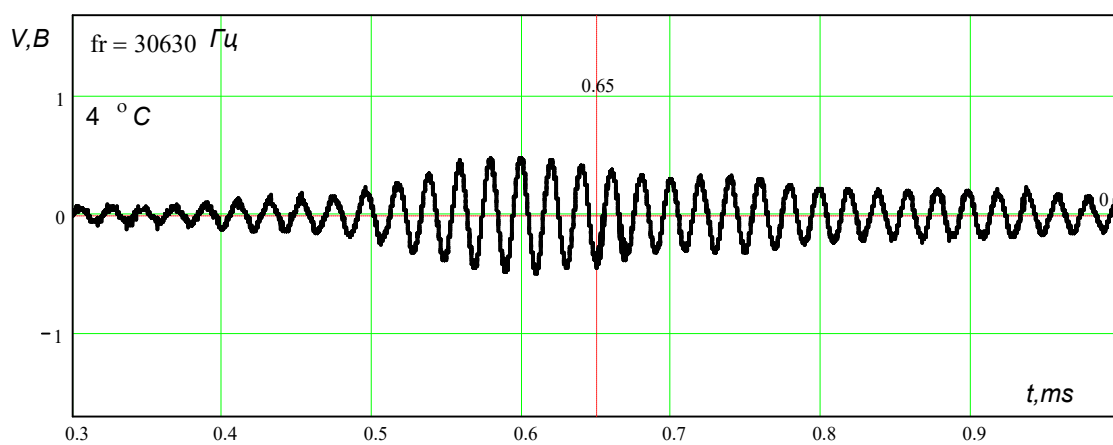
Данные снимались в климатокамере КТК-800 с помощью цифрового осциллографа АСК-3151, количество импульсов в пачке – 7имп.



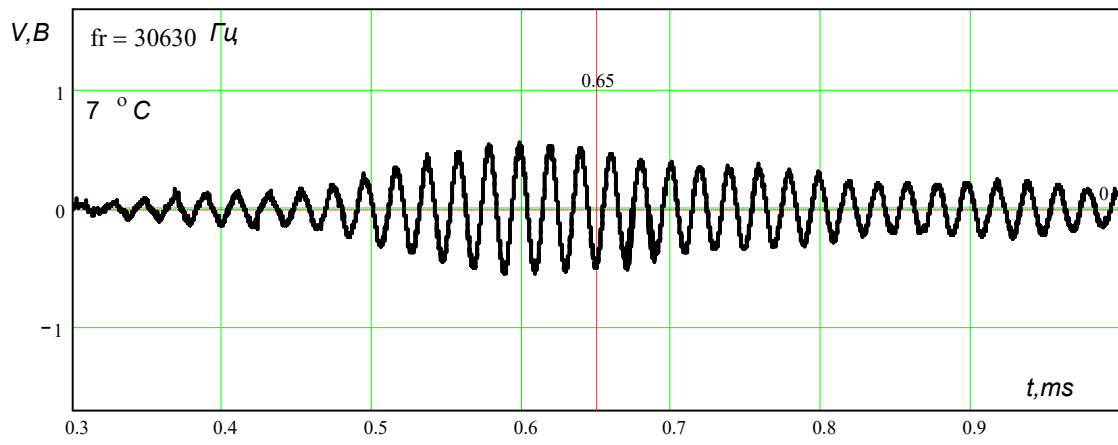
a)



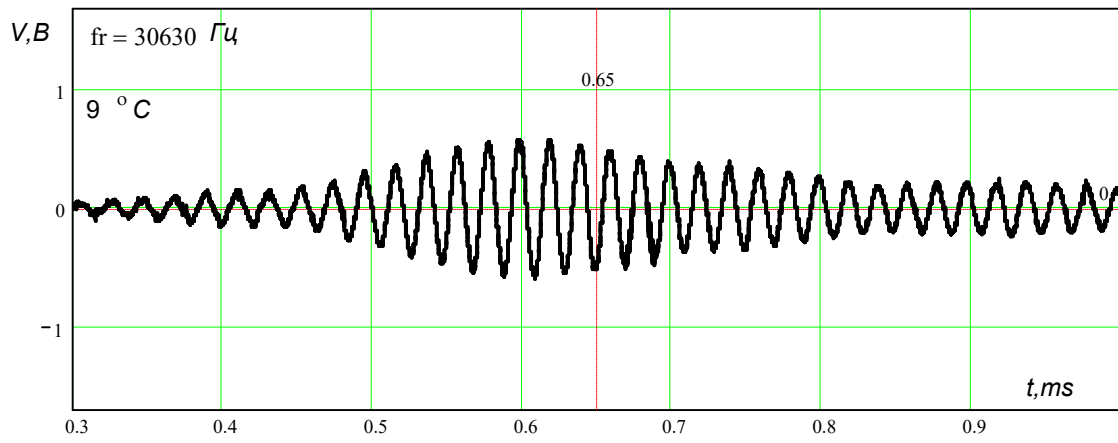
б)



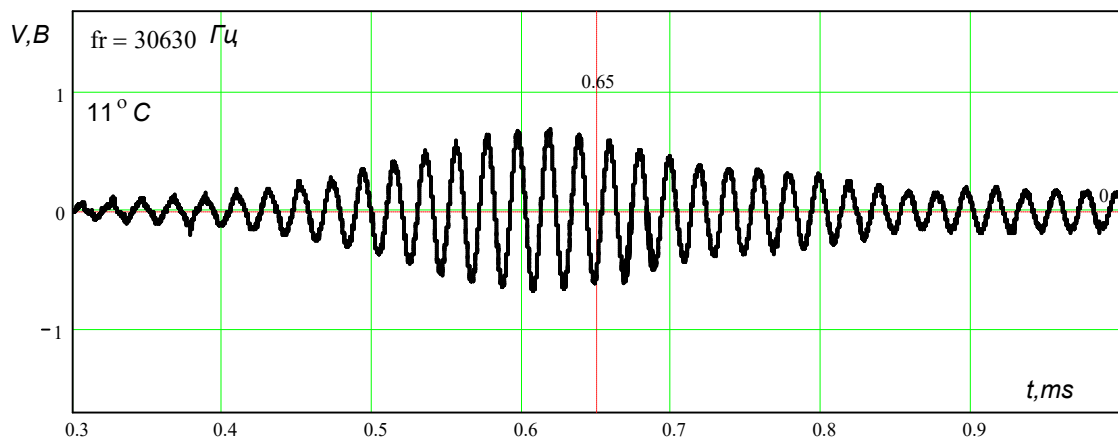
в)



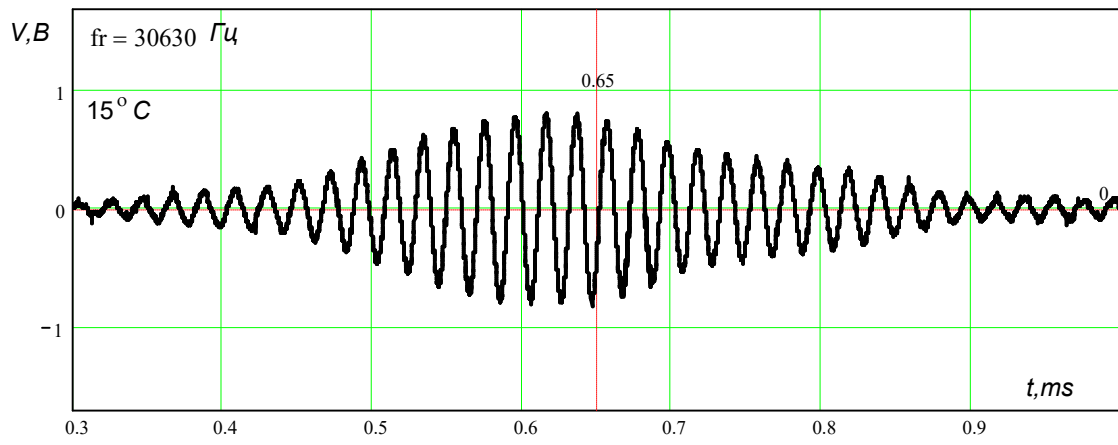
e)



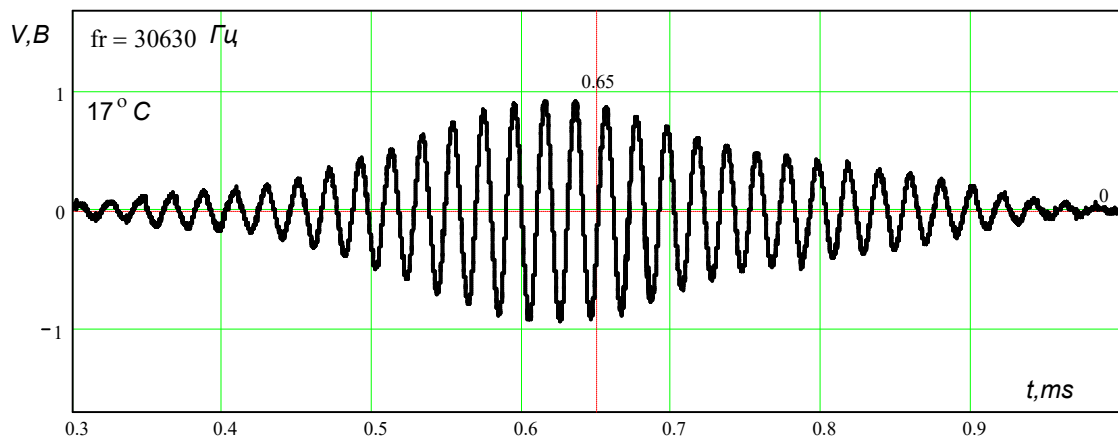
д)



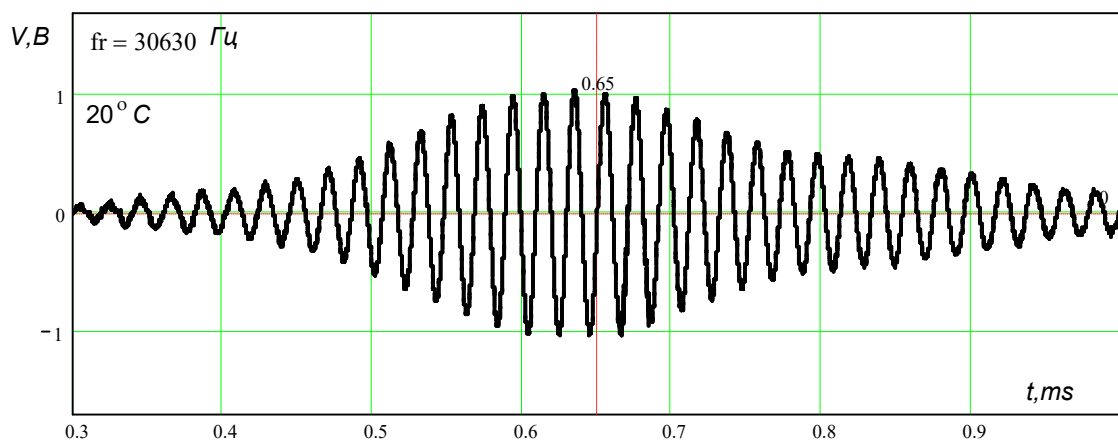
e)



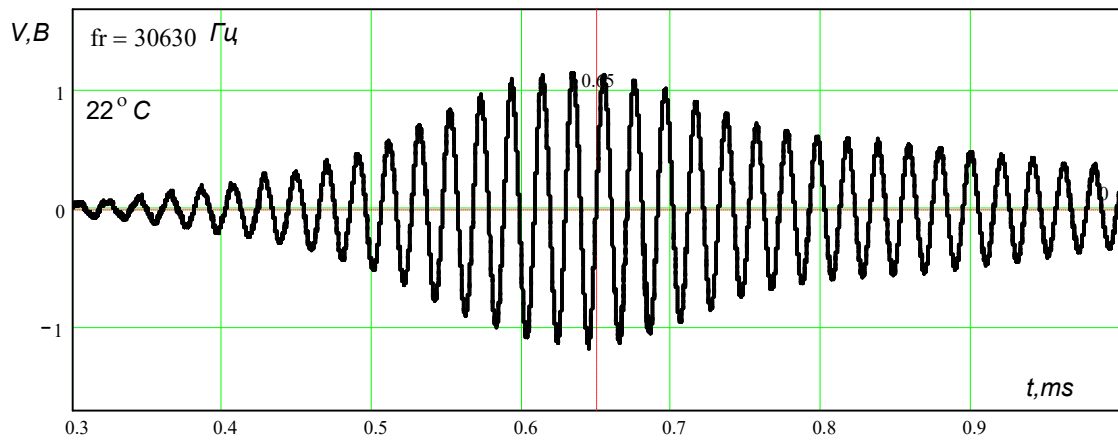
$\mathcal{H})$



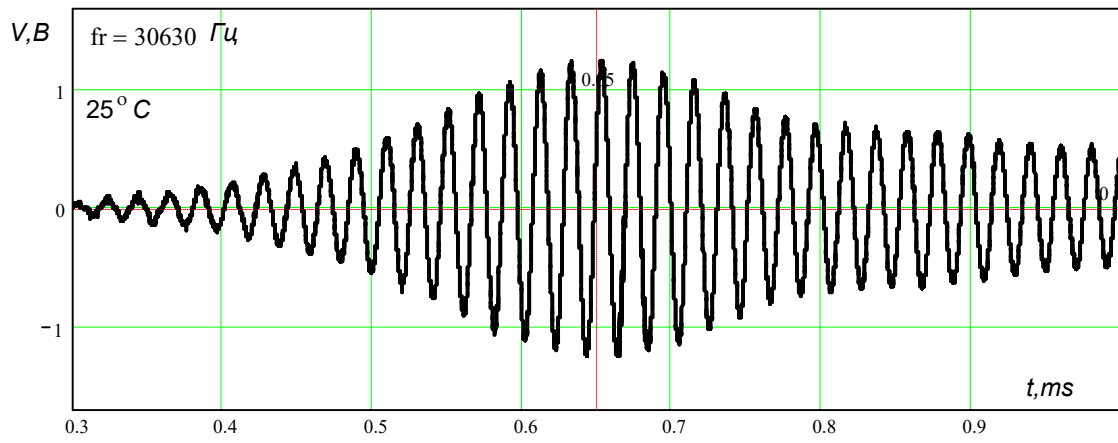
3)



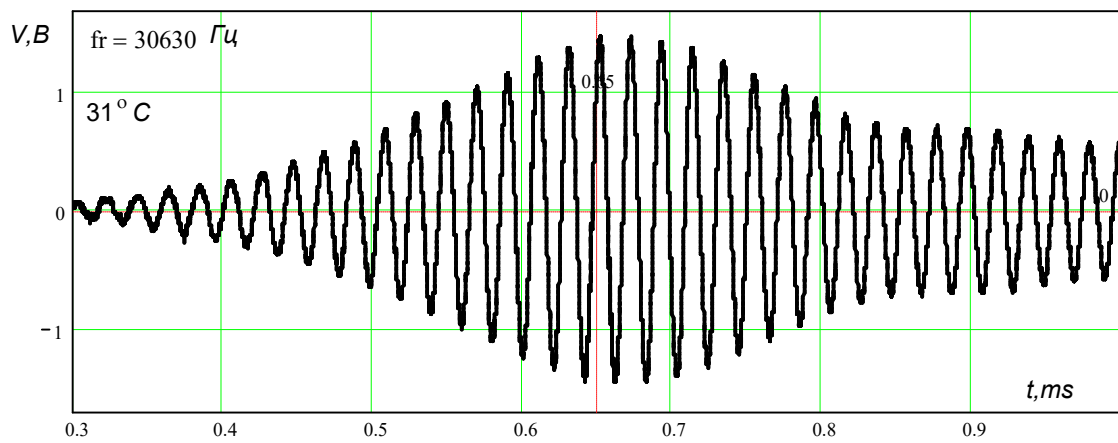
$u)$



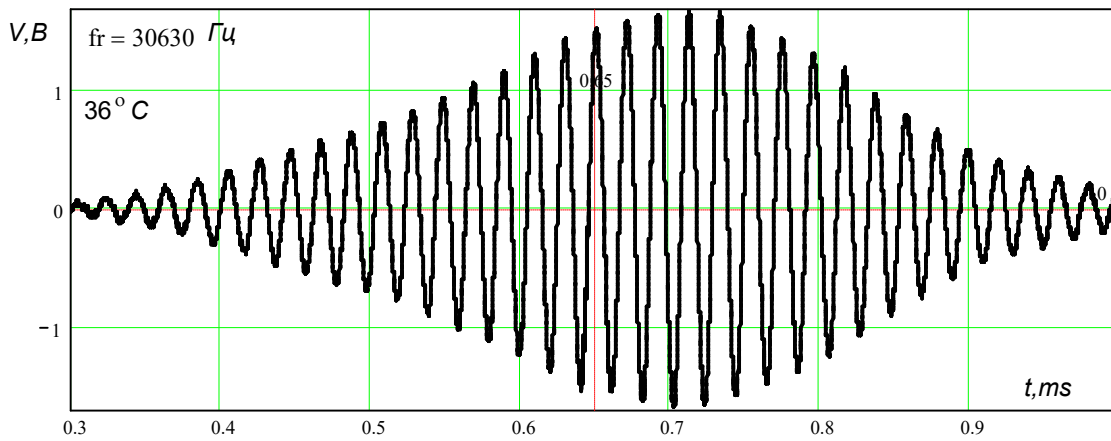
$\kappa)$



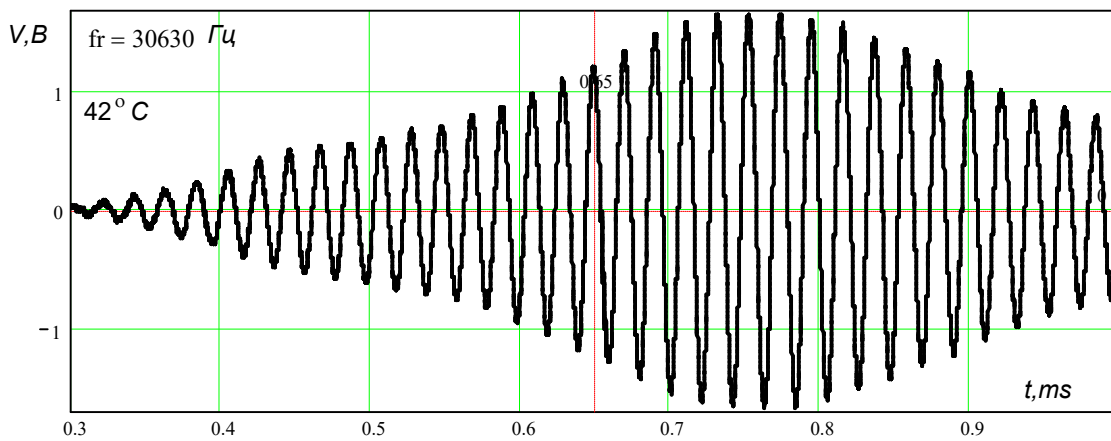
$\pi)$



$\mathcal{M})$



н)



о)

Рис. 4.18. Осциллограммы сигналов на приемном преобразователе при разных температурах (а-о)

Как видно из осциллограмм амплитуда сигнала, соответствующая приходу второй моды, увеличивается с увеличением температуры (рис. 4.18 (а-о)). Кроме этого, с изменением температуры меняется форма огибающей и колебания резонансной (заполняющей) частоты сдвигаются по фазе. Для оценки зависимости сдвига фазы от температуры был построен график (рис. 4.19), на котором по горизонтальной оси отложено время прихода некоторой определенной фазы, а по вертикальной оси – соответствующая температура.

Также подтверждается теория, согласно которой с приближением частоты к пороговому значению при прочих неизменных условиях увеличивается амплитуда принимаемого сигнала.

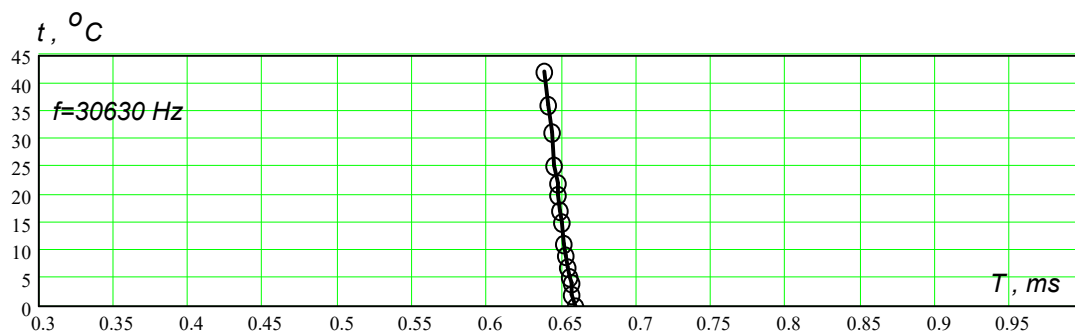


Рис 4.19. График зависимости температуры и фазового сдвига.

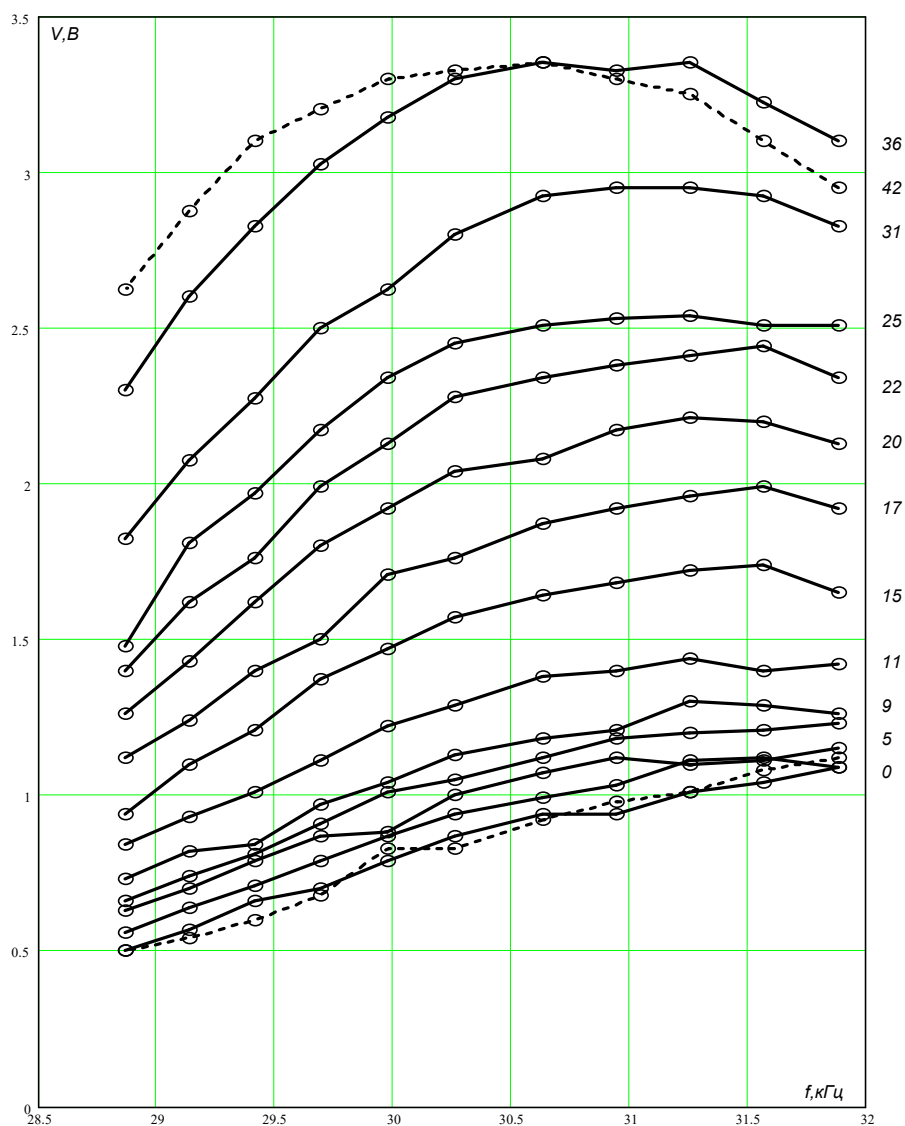


Рис. 4.20. Зависимости амплитуды принимаемого сигнала от частоты излучения при различных значениях температуры

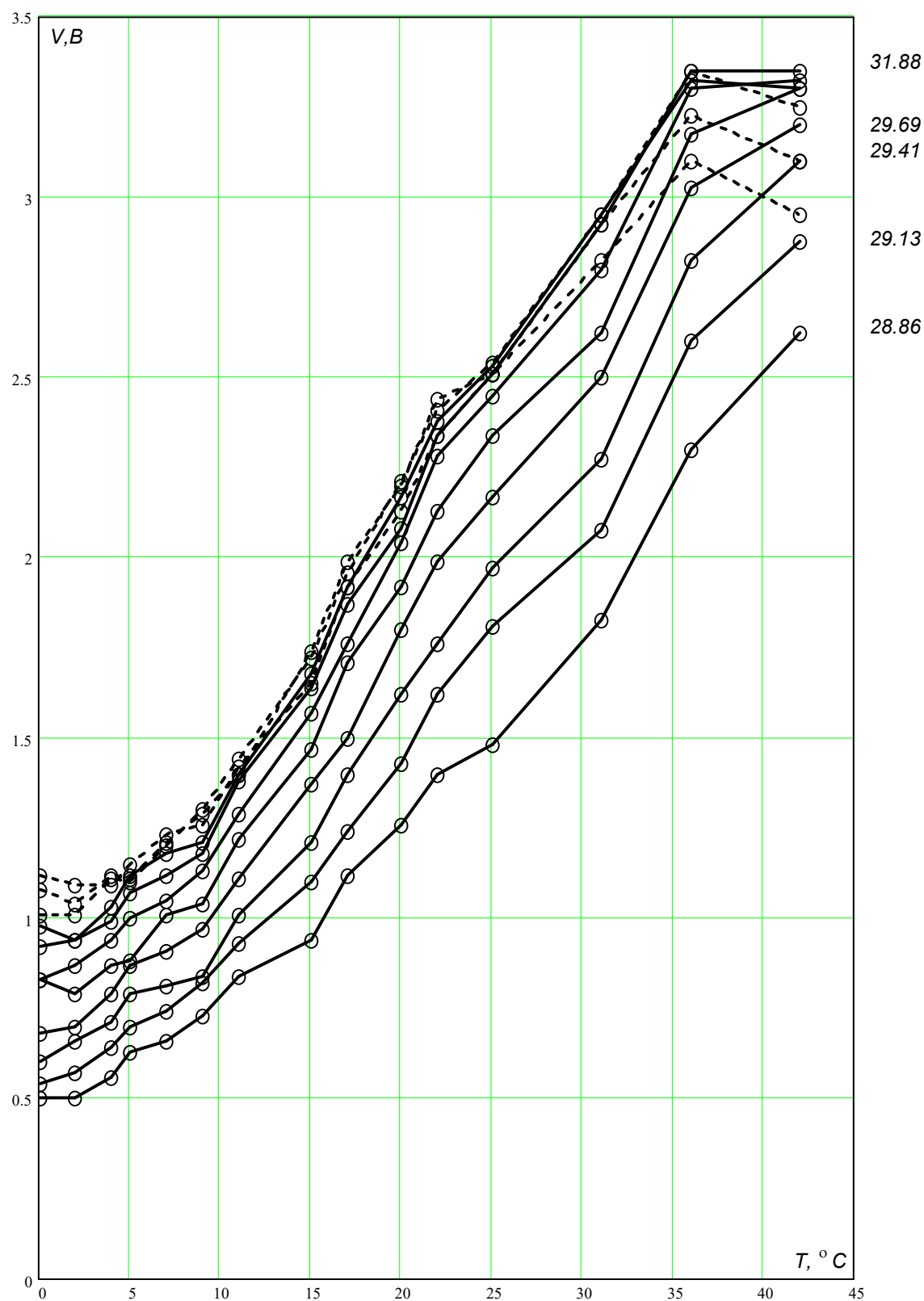


Рис. 4.21. Зависимости амплитуды принимаемого сигнала от температуры при различных значениях частоты излучения.

Зависимости амплитуды от частоты и температуры представлены на рис. 4.20 и 4.21.

Из экспериментальных зависимостей видно, что с увеличением температуры увеличивается амплитуда принимаемого сигнала на всём диапазоне частоты, что подтверждает теорию модового распространения сигнала в анемометрическом канале. Согласно теоретическим расчётам, амплитуда последней распространяющейся моды растёт с приближением скорости звука к пороговому значению, при неизменных прочих параметрах.

5. Практические результаты проектирования акустического анемометра, работающего в импульсном режиме излучения

5.1. Практическая реализация алгоритма измерения скорости потока в импульсном режиме.

Из описанной во 3-ем разделе математической модели распространения пачки импульсов в волноводе видно, как принимаемые сигналы разделяются во времени, т. е. как не происходит наложения принимаемых мод и их отражений от торцов друг на друга. Это дает возможность очистить измеряемый сигнал от мешающих составляющих, и увеличить точность обработки полученных данных. Из (рис. 5.1) видно, что теоретические и экспериментальные данные практически совпадают.

Как уже было сказано выше, задача нового метода измерения заключается в том, чтобы разделить во времени распространение мод акустического сигнала в анемометрическом канале в импульсном режиме измерения. На рисунке видно, что в диапазоне времён $0,65 - 0,9$ [мс] распространяется только одна 2^{ая} рабочая мода.

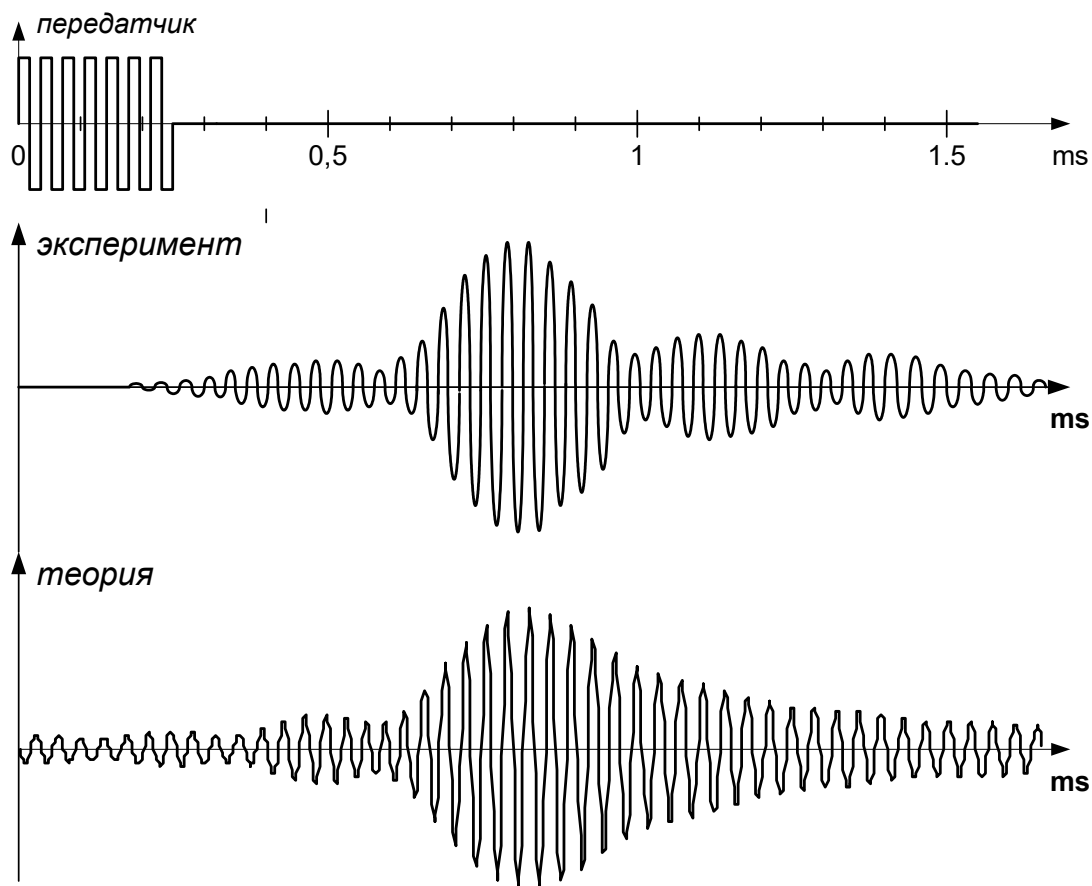


Рис. 5.1. Зависимости напряжения на излучающем (верхний график) и приемном преобразователях от времени в импульсном режиме работы анемометра. Средний график – экспериментальная кривая, нижний график – теоретическая.

Так как во время приёма в рабочей точке распространяется только одна вторая мода, то, согласно проведенным теоретическим исследованиям, мы можем взять в качестве зависимости времени приёма сигнала формулу из модели распространения второй моды в непрерывном режиме излучения. Фазы отдельно взятой второй моды с разложением её в ряд Фурье для импульсного метода измерения будут совпадать с распространением второй моды при непрерывном методе излучения. Исходя из этого мы можем записать формулу расчёта фазы приёма второй моды, распространяющейся по потоку (5.1) и против потока (5.2).

$$\Phi_1 = \omega \cdot t_1 - \frac{-kM + \sqrt{k^2 + \beta^2 \frac{\mu_2^2}{a^2}}}{\beta^2} \cdot l \quad (5.1)$$

$$\Phi_2 = \omega \cdot t_2 - \frac{-kM - \sqrt{k^2 + \beta^2 \frac{\mu_2^2}{a^2}}}{\beta^2} \cdot l \quad (5.2)$$

где $k = \frac{\omega}{c}$ – волновое число

$M = \frac{V}{c}$ – число Маха

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота акустических колебаний

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

$\mu_2 = 7.0159$ – второй корень уравнения $J_1(x) = 0$, где $J_1(x)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка.

$a = 0.014$ м – внутренний радиус канала

V – скорость потока

c – скорость звука

$f = 30000$ Гц – частота излучения колец

$l = 0.064$ м – расстояние между кольцами

Алгоритм работы анемометра состоит в том, что мы измеряем время прихода на приемник определенной фазы, например нулевой. Пусть t_1, t_2 – время прихода этой фазы сигнала, распространяющегося по потоку и против него, соответственно. Обозначим:

$$\gamma = t_1 + t_2 \quad (5.3)$$

$$\alpha = t_1 - t_2 \quad (5.4)$$

Полагая в (4.11) и (4.12) $\Phi_1 = \Phi_2 = 0$, складывая и вычитая эти выражения получим.

$$\omega \cdot (t_1 + t_2) = \frac{\sqrt{k^2 + \beta^2 \left(\frac{\mu_2}{a}\right)^2}}{\beta^2} \cdot 2 \cdot l \quad (5.5)$$

$$\omega \cdot (t_1 - t_2) = \frac{\omega \cdot V}{c^2} \cdot 2 \cdot l \quad (5.6)$$

Учитывая (5.3) и (5.4), находим из (5.5) и (5.6)

$$c = \sqrt{\frac{\omega^2}{\frac{\omega^2 \gamma^2}{4l^2} \beta^2 + \left(\frac{\mu_2}{a}\right)^2 \beta^2}} \quad (5.7)$$

$$V = \frac{\omega^2 \alpha}{\frac{\omega^2 \gamma^2}{2l} \beta^2 + 2l \left(\frac{\mu_2}{a}\right)^2}, \quad (5.8)$$

$$\text{где } \beta^2 = 1 - \frac{V^2}{c^2}. \quad (5.9)$$

Погрешность вычисления скорости потока и звука данным методом в первом приближении представлена на рис. 5.2. Она вычислялась по формулам (5.10), (5.11). Для ее вычисления использовалась математическая модель работы анемометра. Предполагалось, что истинные значения скоростей потока и звука равны c и V . Далее вычислялись значения параметров α и γ по формулам (5.3) – (5.6), а уже из них вычислялись приближенные значения измеряемых скоростей по формулам (5.7) и (5.8), как функции c и $V - v(V, c)$ и $c(V, c)$.

В формулах (5.7) и (5.8) значения скоростей потока и звука выражены через величины α и γ . Но кроме того, они неявно присутствуют в правой части этих выражений, поскольку величина β^2 зависит от c и V .

Для вычисления c и V по формулам (5.7) и (5.8), в первом приближении, пренебрегаем значением β^2 , принимая его равным $\beta^2 = 1$. Его истинное значение «в худшем случае», при наибольшем для проводимых измерений числе Маха ($V = 30$ м/с и $c = 330$ м/с), равняется $\beta^2 = 0,992$.

$$\delta v(V, c) = \frac{|V - v(V, c)| \cdot 100}{V} \quad (5.10)$$

$$\delta c(V, c) = \frac{|c - c(V, c)| \cdot 100}{c} \quad (5.11)$$

Как видно из графиков погрешность определения скорости звука не превышает 0,2 % при скорости потока $V = 30$ м/с. Погрешность определения скорости потока при $c = 330$ м/с и $V = 30$ м/с составляет 0,52 %.

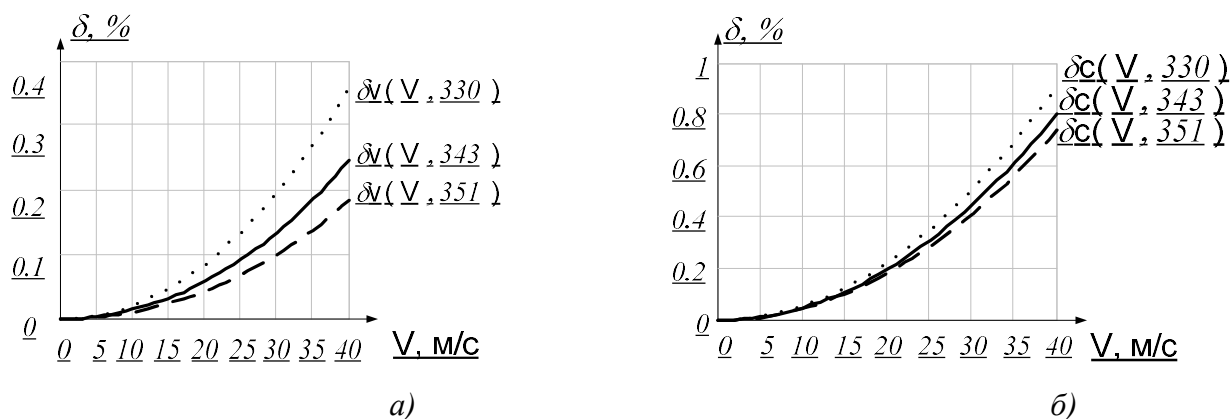
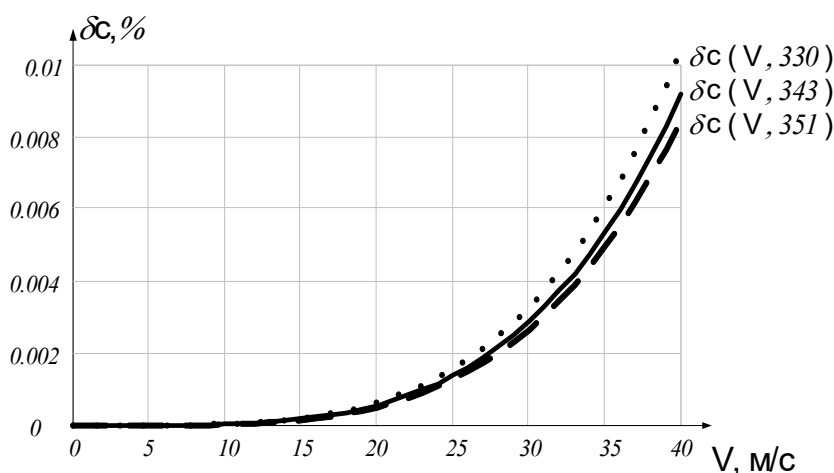


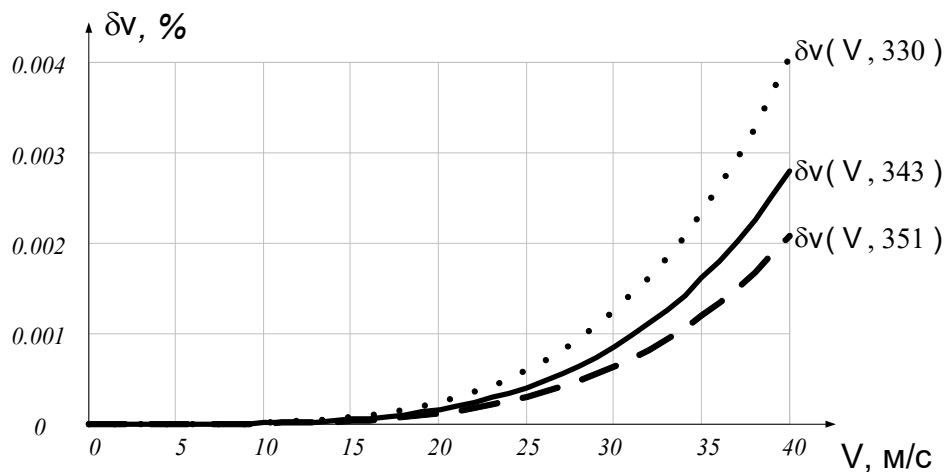
Рис. 5.2 Относительная погрешность измерения скорости потока и звука при приближенных расчетах (первое приближение) в зависимости от скорости потока.

Теперь известны в первом приближении скорость потока (V) и скорость звука (c). Подставим эти значения в формулу (4.18) для определения β^2 , которым мы вначале пренебрегли, и пересчитаем значения скоростей потока и звука по формулам (5.7) и (5.8).

В результате мы получаем окончательные выражения для определения скорости потока и скорости звука (второе приближение). Графики зависимостей относительной погрешности вычисления для скорости звука и скорости потока представлены на рис. 5.3 а) и б) соответственно.



а)



б)

Рис. 5.3. Относительные погрешности измерения скорости потока а) и звука б) в зависимости от скорости потока.

Как видно из графиков, погрешность определения скорости звука не превышает $3 \cdot 10^{-3} \%$ в интересующем нас диапазоне, а погрешность вычисления скорости потока $1,25 \cdot 10^{-3} \%$.

Абсолютная погрешность измерения скорости звука для постоянного излучения не превышает 2 м/с (см. п. 2.2.1, рис. 2.4). Для импульсного способа измерения это значение составляет 0,01 м/с при скорости потока равном 30 м/с (см. рис.5.4).

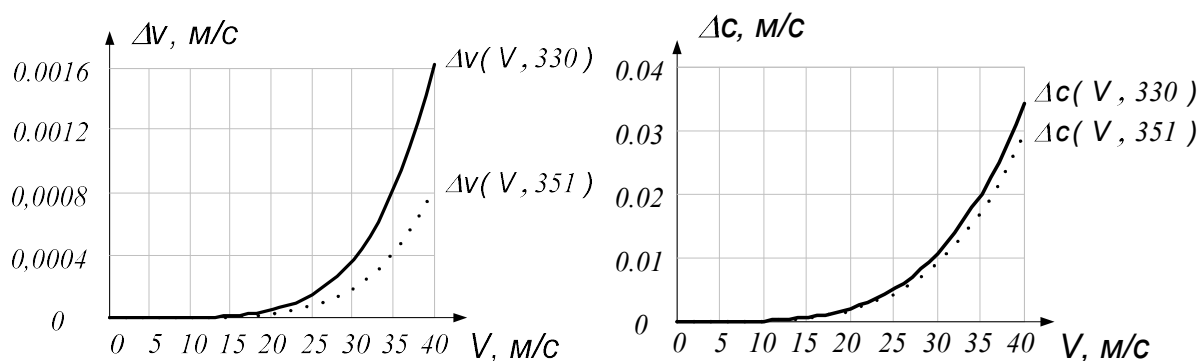


Рис.5.4. Абсолютные погрешности измерения скорости потока а) и звука б) в зависимости от скорости потока.

Из всего вышесказанного очевидно преимущество импульсного метода обработки сигнала перед постоянным излучением. Прежде всего, это выражается в независимости измерений от внешних факторов, влияющих на

скорость звука в измеряемом потоке, таких как: изменение температуры, влажности, давления, состава воздуха. Отсутствие влияния отраженных волн на работу прибора, в отличие от приборов, работающих на постоянном сигнале. Диапазон работы такого прибора, при поддержании необходимой точности очень большой. Он ограничивается: скоростью звука - от 330 м/с до 360 м/с, и скоростью потока – от 0,01 м/с до 30 м/с. Этот метод представляет собой времяимпульсный способ измерения, т. к. информативным параметром является время прохождения импульсом прозвучиваемой базы, но способ обработки полученных данных основан на сдвиге фаз между прозвучиваниями по потоку и против него, т. е. можно говорить о фазовом методе обработки сигнала. Как известно, фазовый метод считается наиболее точным.

5.2. Структурная схема прибора.

В лаборатории средств аэрологического контроля Московского Государственного Горного Университета был разработан и собран прибор, работающий в импульсном режиме излучения сигнала. Его структурная схема представлена на (рис.5.5.).

Генератор вырабатывает импульсы с частотой 80 МГц. Они используются для измерения сдвига фазы сигнала. Счетчик под управлением микроконтроллера считает эти импульсы. Он также выдает необходимые для работы микроконтроллера тактовые импульсы с частотой 20 МГц. Микроконтроллер формирует пачку импульсов частотой 30 КГц и подает их через коммутатор на передающее кольцо. Он также управляет коммутацией колец, подключая их попеременно то в качестве передатчика, то в качестве приемника. Сигнал с коммутатора через усилитель попадает на аналоговый вход микроконтроллера, где находится встроенный компаратор. Через интерфейсное устройство из микроконтроллера данные поступают на последовательный порт компьютера.

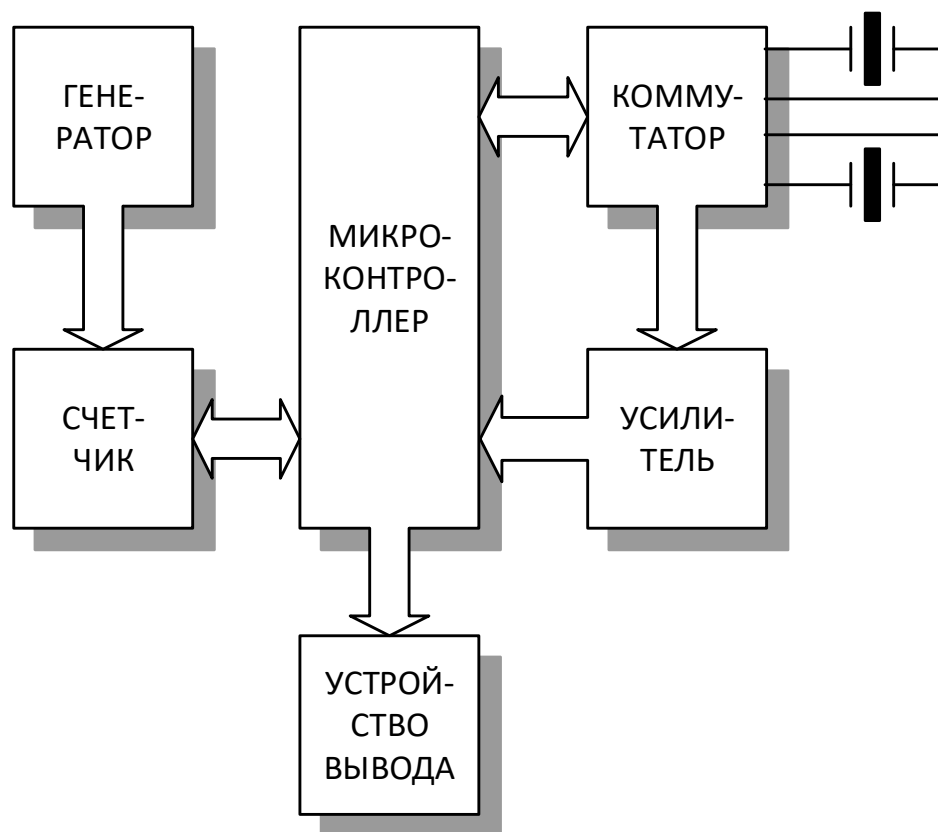


Рис.5.5. Структурная схема прибора

5.3. Описание алгоритма работы акустического анемометра, работающего в импульсном режиме измерения.

Временные диаграммы представлены на рис.5.6. Пачка (на рис. 5.6 передатчик) состоит из семи тридцатикилогерцовых импульсов. Она распространяется по анемометрическому каналу и принимается приемным кольцом в виде графика, изображенного на рис.5.6 (приемник). Максимумы огибающей приемного сигнала соответствуют его модам, разнесенным во времени и их отражениям от торцов.

Максимальный пик огибающей соответствует 2-ой моде, за ней следуют отраженные сигналы. Время измерения производится от начала передачи пачки импульсов до переднего фронта, заполняющей на максимуме огибающей 2-ой моды (см. рис.5.6 *Тизм*). Далее показана коммутация колец в качестве передатчика и приемника. *Тпер* – время коммутации, оно же и период одного измерения.

Рассмотрим подробнее процесс измерения времени прихода фронта импульса. График (рис.5.6, С) – сигнал с приемника после компаратора. Точка 2 – фронт измерительного импульса. Микроконтроллер вырабатывает задержку 1. Счетчик начинает считать импульсы с частотой 80 МГц от времени $T_{зад}$ до $T_{изм}$. Время задержки хранится в памяти микроконтроллера. $T_{зад}$ всегда отстает от $T_{изм}$ на четверть периода для того, чтобы не произошло ложного срабатывания от предыдущего фронта $\Delta t1$

Алгоритм работы приемной программы показан на рис. 5.7а. Две ветви этого алгоритма соответствуют двум направлениям прозвучивания канала – по потоку и против потока. Изменение направления прозвучивания происходит на каждом шаге. Показания счетчиков ($T_{изм}$) на текущем шаге и предыдущем вычитаются и складываются, и по этим разности и сумме определяются скорости потока и звука на каждом шаге измерения.

Алгоритмы вычисления скорости потока и вычисления времени задержки детализируются на рис. 5.7 б, в. При вычислении скорости потока используются тарифовочные коэффициенты, определяемые экспериментально при поверке приборов. Их наличие связано с отличием средней скорости внутри анемометрического канала и снаружи.

Метод совместного вычисления скоростей звука и потока подробно описывается и теоретически обосновывается в п. 5.11.

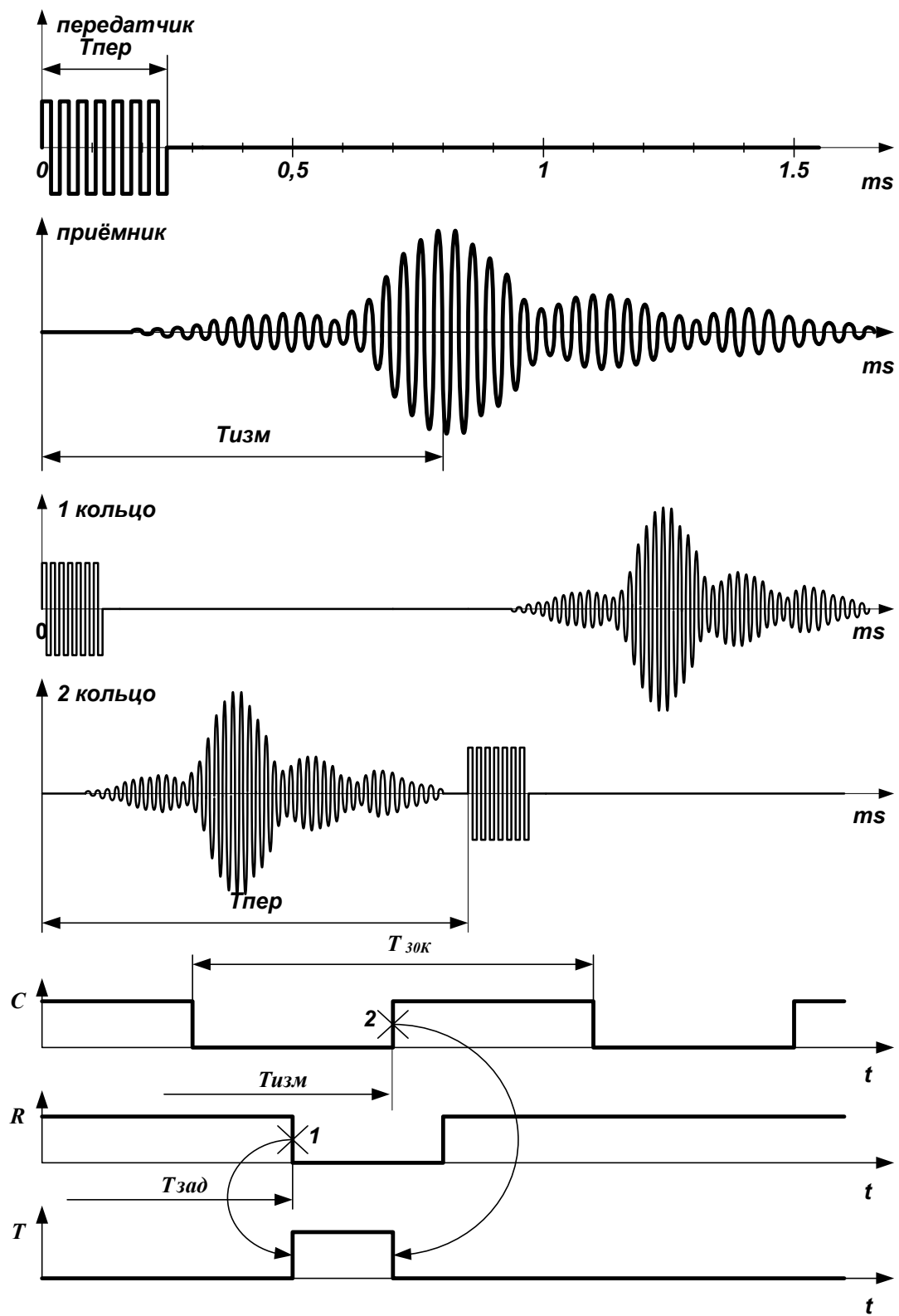
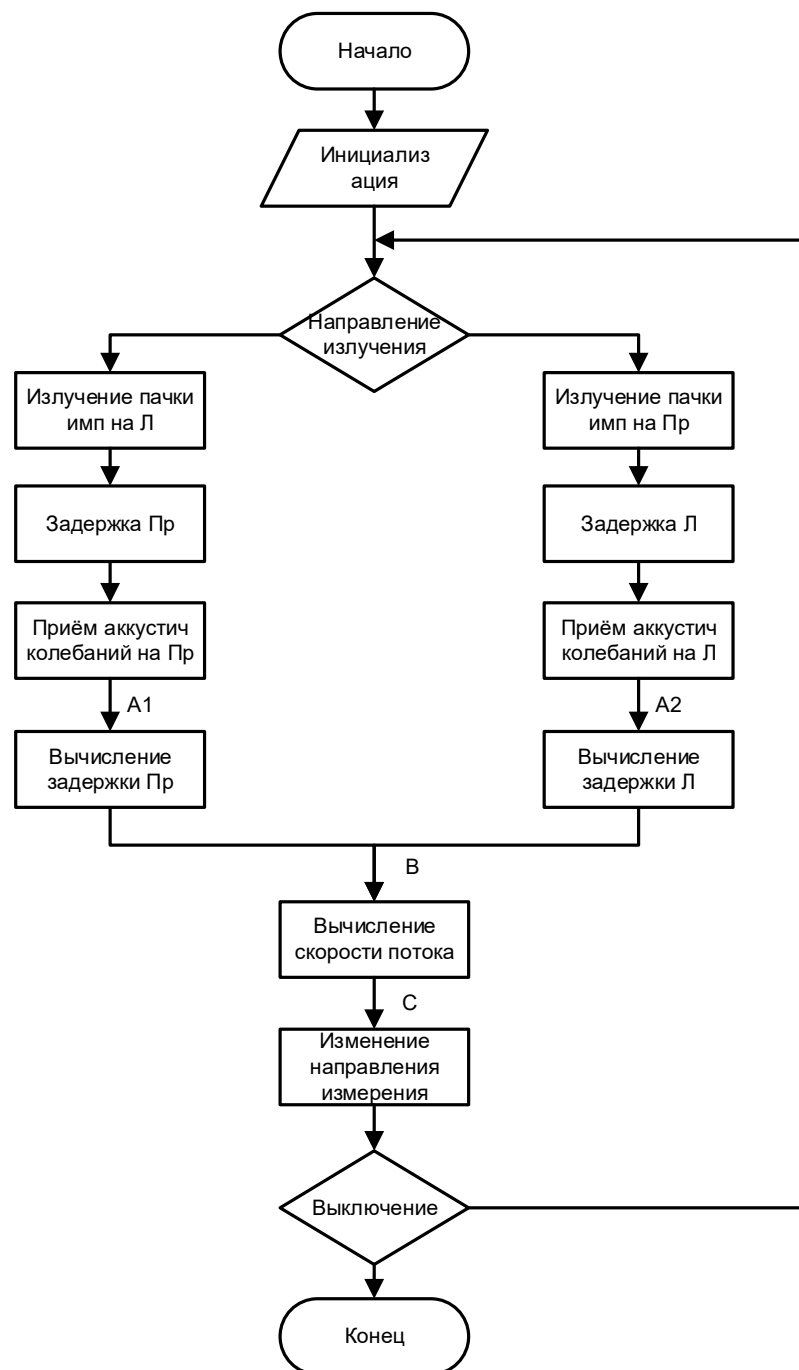


Рис.5.6 Временные диаграммы



a)

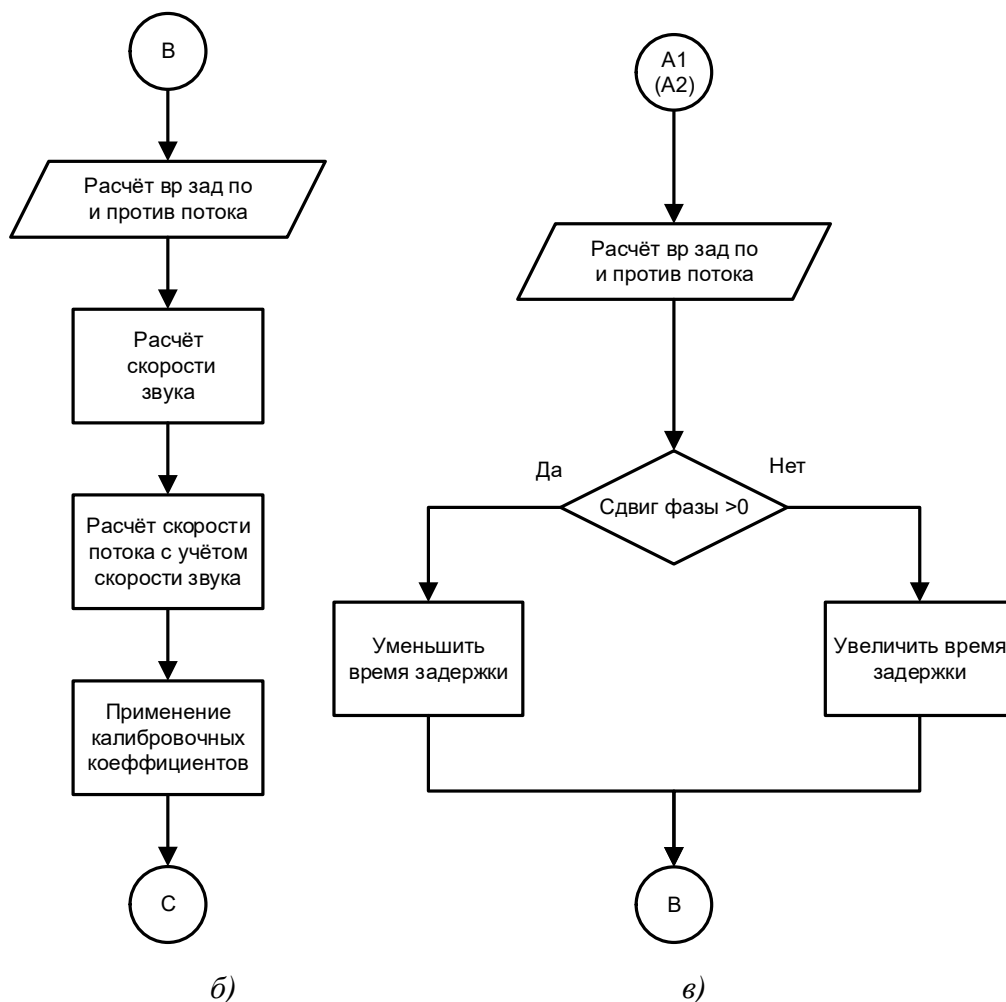


Рис. 5.7 Блок схема алгоритма работы приемной программы датчика

Описанный алгоритм был реализован на микроконтроллере фирмы Atmel Corporation на базе Advanced RISC architecture ATmega328P.

В качестве среды разработки написания программ для микроконтроллера использовалась платформа IAR Ebedded Workbench IDE.

На рисунке 5.8 представлен рабочий интерфейс среды разработки IAR.

Для приёма данных, контроля и настройки параметров, а также калибровки датчиков написана специальная программа с поддержкой необходимого интерфейса. Внешний вид программы представлен в Приложении Г.

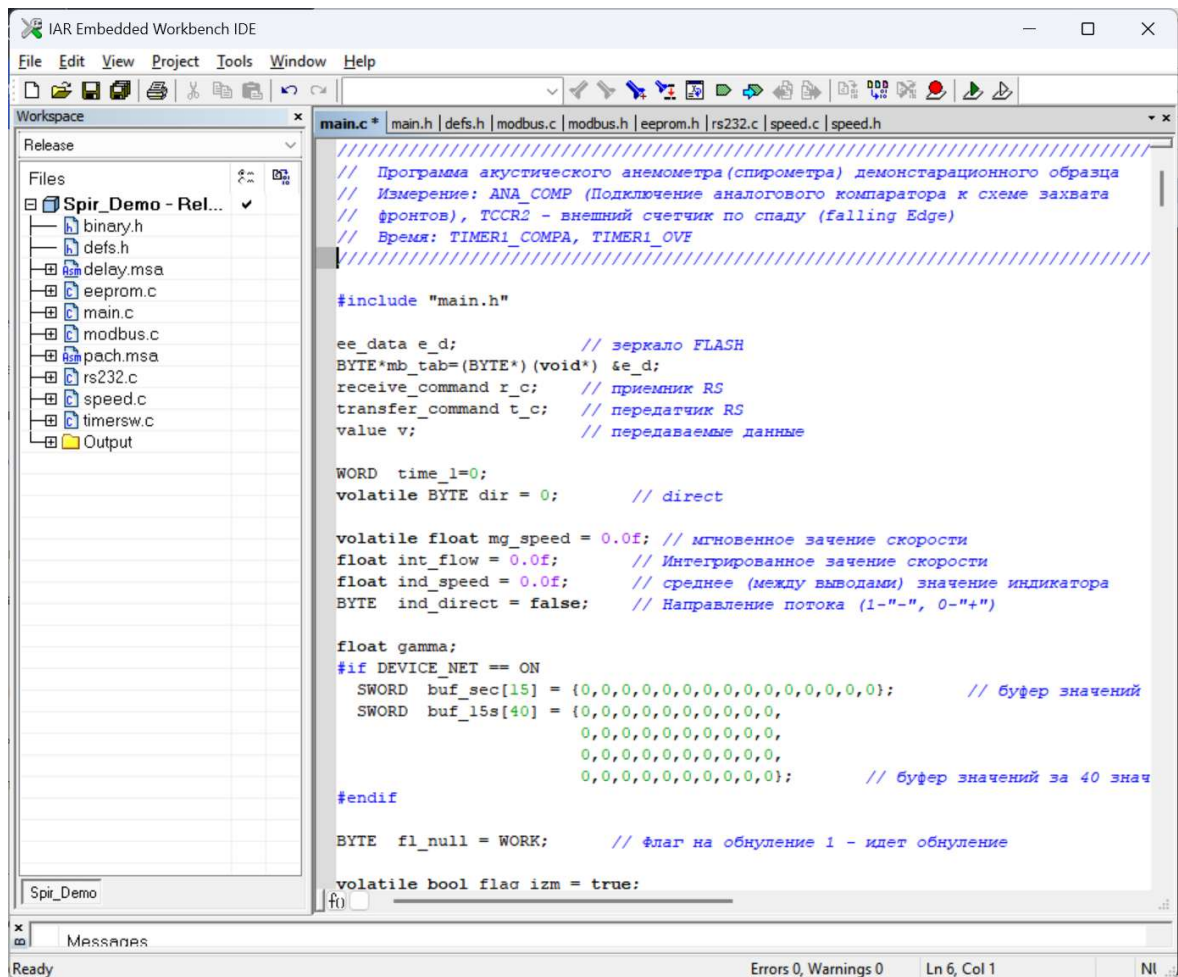


Рис. 5.8. Интерфейс среды разработки IAR

5.4. Реализация работы

На основании предложенного метода был создан прибор АПА-1 (акустический портативный анемометр). Прибор АПА-1/3, изображённый на рис. 5.9, при разработке которого были использованы вышеописанные исследования, успешно прошел метрологические и шахтные испытания.



Рис. 5.9 Прибор АПА-1/3

Методы измерения и повышения точности измерения используются и при разработке других акустических приборов (спирометров и расходомеров). На основе этого прибора были разработаны аэродинамические установки прямого (рис.5.11) и замкнутого (рис.5.10) принципа действия [71, 72]:

- А-02н низкоскоростная прямоточная аэродинамическая установка для скоростей до 3 м/с;
- А-02в высокоскоростная прямоточная аэродинамическая установка для скоростей до 30 м/с;
- А-02з установка аэродинамическая замкнутого типа для скоростей до 30 м/с;



Рис.5.10 Установка аэродинамическая замкнутого типа А-02з



Рис.5.11 Установка аэродинамическая А-02з

Рис. Высокоскоростная прямоточная аэродинамическая установка А-02в(н)

Были проведены метрологические испытания приборов в ФГУП «ВНИИМ им. Менделеева» и получено свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.28.001.А № 49696 на установку аэродинамическую А-02.

В качестве эталонного измерителя скорости газовоздушного потока для замкнутой трубы использовался акустический датчик с увеличенной длиной волновода – 300 мм и диаметром измерительного канала – 28 мм.

Для прямоточной трубы был разработан датчик диаметром 100 мм и длиной 1 м.

5.5. Влияние изменения скорости звука на фазу принимаемого сигнала.

Предыдущие изыскания показали, что скорость звука оказывает существенное влияние на работу акустического анемометра [51,64]. Для исследования этого влияния был проведён эксперимент, связанный с изменением состава газовой среды. Скорость звука изменялась посредством добавления водорода в состав измеряемой среды.

Все полученные выше результаты справедливы для некоторых, так называемых, нормальных условий. Следующей задачей является – определить, насколько изменения температуры, влажности, состава воздуха окажут влияние на показания анемометра. Влияние всех этих факторов выражается в изменении c - скорости звука.

Для вычисления c воспользуемся формулой (5.12) для скорости звука в идеальном газе [44].

$$c = \sqrt{\kappa \frac{RT}{\mu}} \quad (5.12)$$

Здесь $\kappa=1.401$ - показатель адиабаты (зависит от количества атомов в молекуле газа), T – абсолютная температура, $R=8.31 \cdot 10^3$ Дж/кмоль·град – универсальная газовая постоянная, μ – молярный вес газа.

Молярный вес смеси газов, состоящей из N составляющих, вычислим по формуле:

$\mu = \sum_{i=1}^N \mu_i \cdot n_i$, где μ_i – молярный вес, а n_i – молярная концентрация i -го компонента.

Для того чтобы учесть влажность, будем считать водяные пары одним из компонентов воздуха. Концентрация водяных паров зависит от температуры и вычисляется по формуле: $n_{H_2O} = \frac{a \cdot V_\mu}{\mu_{H_2O}}$, где $V_\mu=22.414 \cdot 10^{-3}$ м³ – молярный объем, $\mu_{H_2O}=18$ – молярный вес воды, a – количество водяного пара (г/м³) при 100%

влажности. Таблица значений a при разных температурах приводится в [45]. По этой таблице зависимость $a(T)$ можно аппроксимировать полиномом (5.13):

$$a(T) = 4.844 + 0.334T + 0.01T^2 + 1.723 \cdot 10^{-4}T^3 + 1.711 \cdot 10^{-6}T^4 + 1.058 \cdot 10^{-8}T^5 \quad (5.13)$$

На (рис. 5.12.) показана теоретическая зависимость скорости звука от концентрации водорода в воздухе при температуре 20°C и влажности 20%.

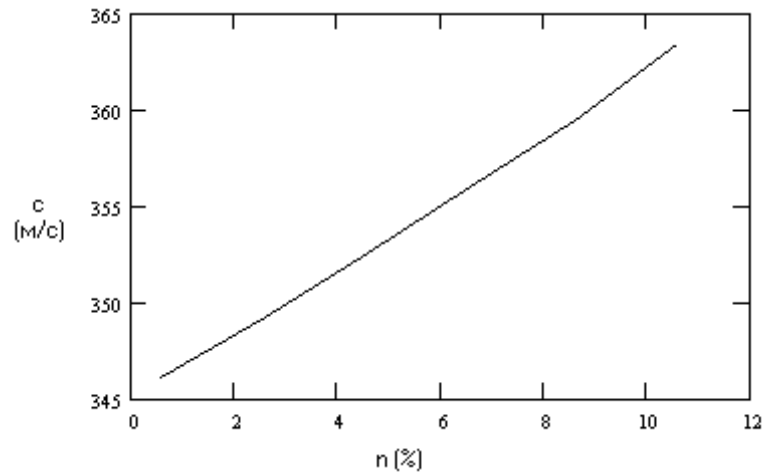


Рис. 5.12. Зависимость скорости звука от концентрации водорода в воздухе.

Рассмотрим, как влияют изменения скорости звука на фазовую и групповую скорость волны (5.14) (5.15), распространяющейся в анемометре, например, в положительном направлении.

Фазовая скорость n -й моды:

$$V_{faz} = \frac{\omega}{s_{+n}} = \frac{\omega \beta^2}{-Mk + \sigma_n}. \quad (5.14)$$

Групповая скорость n -й моды:

$$V_{gp} = \frac{\partial \omega}{\partial s_{+n}} = \left(\frac{\partial s_{+n}}{\partial \omega} \right)^{-1} = \frac{\beta^2 c}{M + \sigma_n k}. \quad (5.15)$$

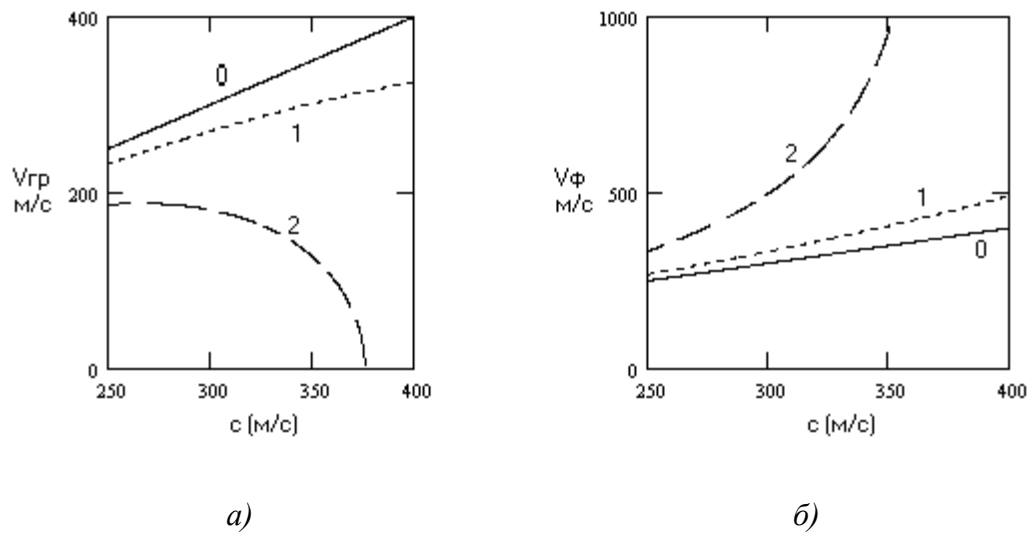


Рис. 5.13. Зависимости групповой а) и фазовой б) скорости от скорости звука для $t=0, 1, 2$. ($M=0$)

Зависимость сдвига фазы от изменения концентрации водорода в воздухе в отсутствие потока представлена на (рис.5.14.).

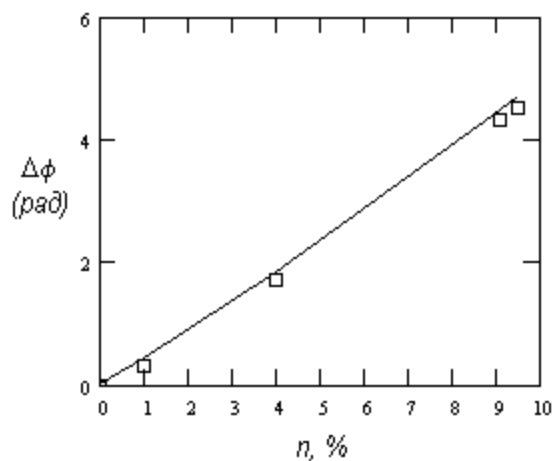


Рис. 5.14. Изменение фазы принимаемого сигнала в зависимости от концентрации водорода в воздухе (теоретическая кривая и экспериментальные точки).

Мы видим, что экспериментальные данные хорошо соотносятся с расчетом (п. 5.1).

В результате проведенных теоретических исследований показано, что наличие дополнительных гармоник, появляющихся вследствие замены непрерывного режима излучения импульсным, практически не искажает фазовую характеристику анемометра.

Изменение скорости звука в воздухе влияет на показания акустического анемометра [51, 52]. Поэтому введение в электронную схему анемометра алгоритма, позволяющего учесть величину скорости звука, существенно повысит точность измерений. Для компенсации погрешности измерения скорости потока применяется метод измерения разности и суммы фаз сигналов, распространяющихся по и против потока.

5.6. Погрешности импульсного метода измерения.

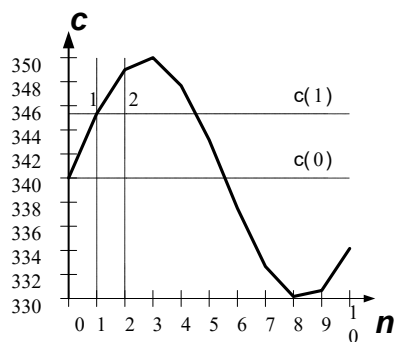
5.6.1. Погрешность, связанная с реализацией схемотехнических решений.

Погрешность, связанная с реализацией схемотехнических решений в первую очередь связана с погрешностью, вносимую усилителями, компараторами и дискретностью заполнения измерительного тракта цифровой части.

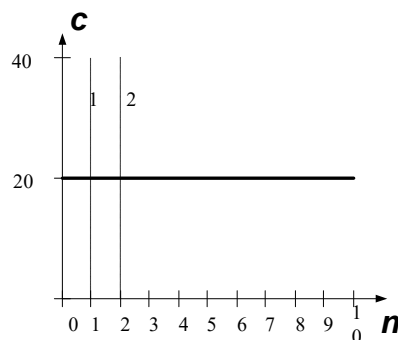
Данная погрешность рассчитывается исходя из параметров элементной базы [87]. Она выбирается исходя из соображений требуемой точности. В нашем случае достигается удовлетворительная точность на элементной базе общего применения, и погрешностью электронного блока мы пренебрегаем. Для оценки погрешности мы будем использовать погрешность квантования, а она должна быть соизмерима с погрешностью, вызванной колебаниями скорости воздуха в отсутствие потока.

5.6.2. Погрешности метода измерения, связанные с неодновременностью прозвучивания канала в разные стороны

Предположим, что резко изменилась скорость звука в измеряемом потоке, так как это показано на рисунке (рис. 5.15: а, б).



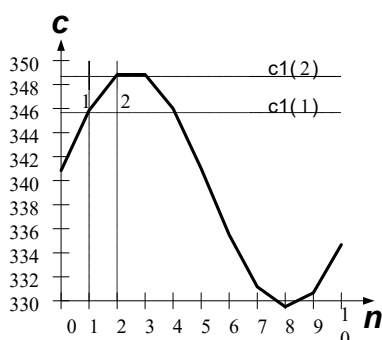
а) Скорость звука



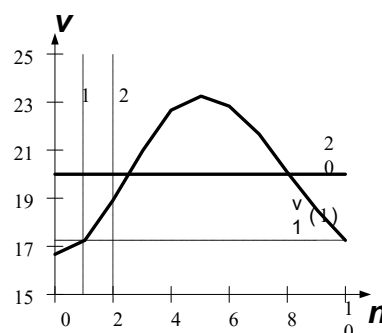
б) Скорость потока

Рис. 5.15. Изменения окружающей среды

Из-за неодновременности прозвучивания анемометрического канала по потоку в момент времени $t1$ и против него (в момент времени $t2$) получаем ошибку при вычислении скоростей потока и звука. Потому, что за время $(t2-t1)$ набегает ошибка в виде изменения этих скоростей (см. Рис.5.16: а, б).



а) Скорость звука



б) Скорость потока

Рис. 5.16. Показания прибора без компенсации погрешности, связанной с дискретностью измерений

Для компенсации этой погрешности предлагается интерполировать данные, получаемые с датчиков [47]. Т. е. берется время, полученное в результате прозвучивания канала по потоку $t1$ и время, интерполированное к тому же времени прозвучивания против потока $t2$ (рис. 5.17.).

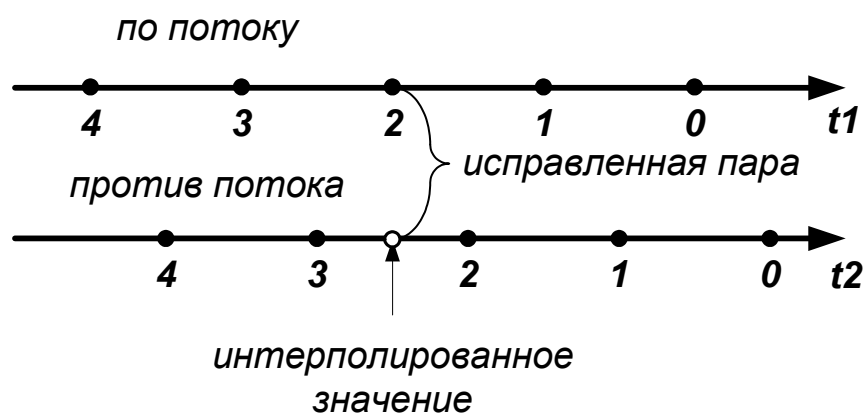


Рис. 5.17 Интерполяция данных

Интерполируем полиномом четвертой степени координаты точек по потоку и против потока (в каждом случае таких точек по пять) и находим коэффициенты $a_0 - a_4$ для обоих случаев.

$$t2_s := a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s^3 + a_4 \cdot s^4$$

s – интересующее нас время интерполяции.

$$a_0 := t2_n$$

$$a_1 := \frac{-3 \cdot t2_{n-4} + 16 \cdot t2_{n-3} - 36 \cdot t2_{n-2} + 48 \cdot t2_{n-1} - 25 \cdot t2_n}{12}$$

$$a_2 := \frac{11 \cdot t2_{n-4} - 56 \cdot t2_{n-3} + 114 \cdot t2_{n-2} - 104 \cdot t2_{n-1} + 35 \cdot t2_n}{24}$$

$$a_3 := \frac{-3 \cdot t2_{n-4} + 14 \cdot t2_{n-3} - 24 \cdot t2_{n-2} + 18 \cdot t2_{n-1} - 5 \cdot t2_n}{12}$$

$$a_4 := \frac{t2_{n-4} - 4 \cdot t2_{n-3} + 6 \cdot t2_{n-2} - 4 \cdot t2_{n-1} + t2_n}{24}$$

Получив эти коэффициенты, мы можем получить любое интересующее нас время в промежутке от $t2_0$ до $t2_4$. Нас интересует время $t2$ при $s = 2.5$. Графики компенсированных скоростей звука и потока представлены на (рис.5.18.) и (рис.5.19.).

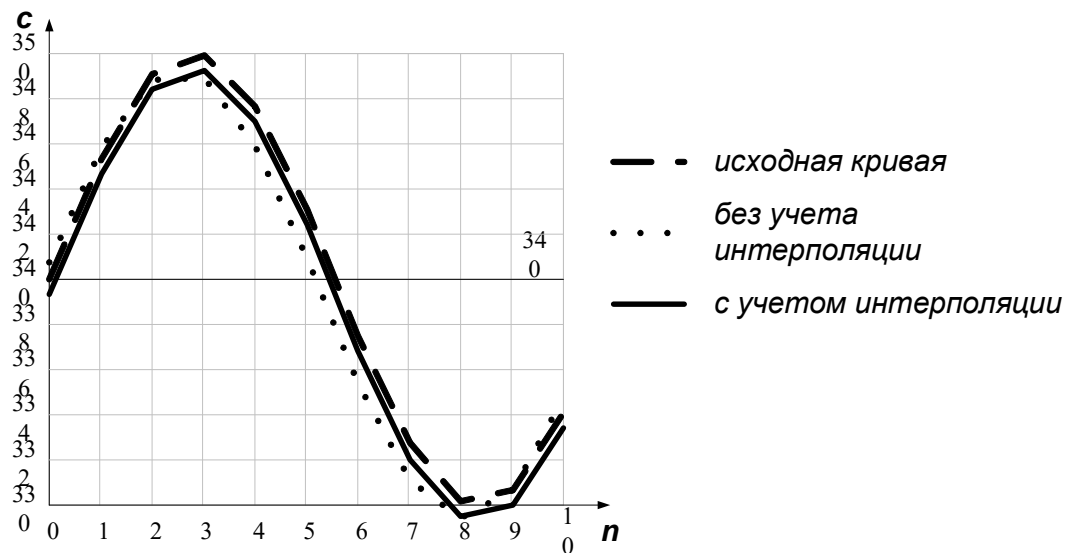


Рис.5.18. Скорость звука

Как видно из графиков ошибка, вызванная временным сдвигом между прозвучиванием трубы по потоку и против него, практически полностью компенсируется путем применения метода интерполяции к сдвинутым во времени измерениям.

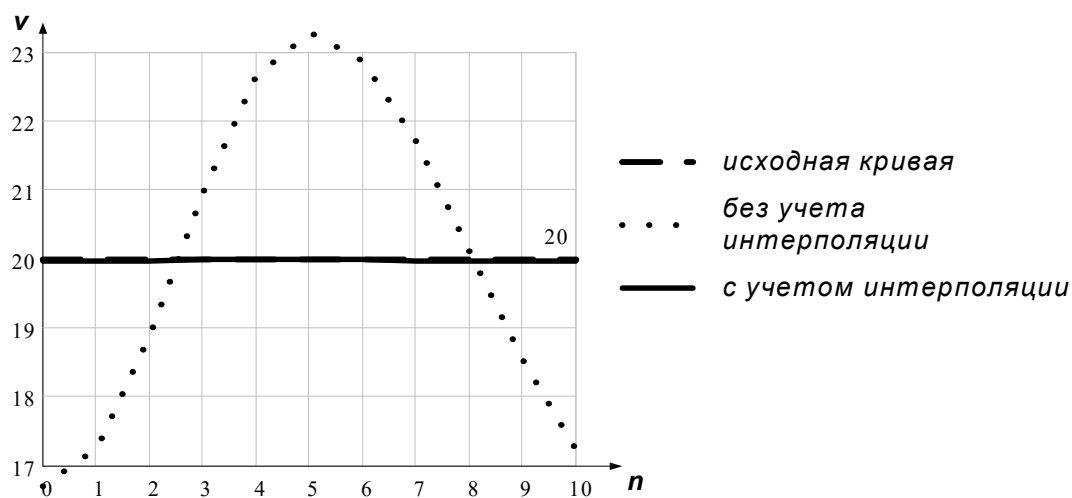


Рис. 5.19 Скорость потока

5.6.3. Погрешность, вызывающая дрейф нуля.

В связи с невозможностью компенсации погрешности наложения сигналов, зависящих от параметров системы в реальном времени, возникает различие времен прихода рабочей фазы по и против потока. Это различие является

признаком наличия потока. Также сдвиг фаз может быть вызван уходом характеристик колец при изменении параметров внешней среды, например, температуры. Все это приводит к дрейфу нуля.

Также погрешность может быть вызвана наложением стоячей волны, формирующейся в результате отражений излучаемых сигналов от измерительного канала.

5.7. Исследование динамических характеристик анемометра

5.7.1. Переходные характеристики анемометра

Для дальнейшего моделирования акустического анемометра были проведены исследования по вычислению передаточной функции анемометра, где входным параметром является скорость потока в аэродинамической трубе, а выходным параметром показания анемометра.

Для снятия передаточной функции анемометра необходимо получить его переходную характеристику, полученную из результатов эксперимента. В качестве воздействия на объект можно подать импульс бесконечной амплитуды с бесконечно малым временем, или подать единичный скачок на вход измеряемой системы. Выбираем второй вариант, для этого поместим анемометр в воздушный поток, а вход анемометра закроем заслонкой, которую быстро убираем. По виду реакции на ступенчатое возмущение можно заключить, что анемометр представляет собой инерционное звено.

На рис. 5.20. можно увидеть результат проделанного эксперимента – переходную характеристику анемометра. Передаточная функция инерционного звена описывается формулой (5.16) [42]:

$$H(p)=1/(1+\tau p); \tau =0.01 \quad (5.16)$$

Формула (5.17) описывает переходную характеристику анемометра:

$$f(t)=V_0(1-e^{-t/\tau}) \quad (5.17)$$

Параметр инерционного звена τ подобран так чтобы теоретическая переходная характеристика стала максимально близка к экспериментальным

данным, изображённым на рисунке 5.20, V_0 – установившееся значение скорости воздушного потока.

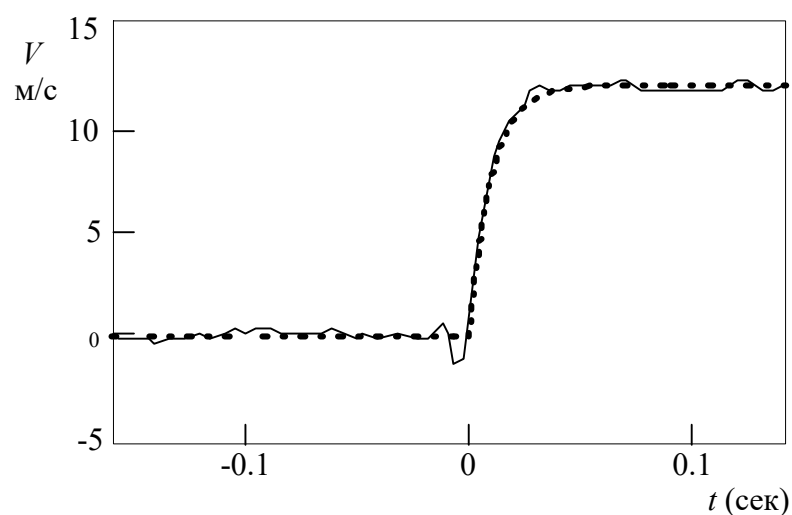


Рис.5.20. Переходная характеристика акустического анемометра.

Сплошная линия соответствует экспериментальным данным, пунктирная линия – теоретическая характеристика, с инерционным звеном $\tau=0.01$ сек.

Заключение

В диссертационной работе представлено решение актуальной научной задачи – разработка автоматизированной системы исследования и настройки акустических анемометров на основе построенной математической модели и разработанных алгоритмах для системы аэроакустического взаимодействия в волноводах-воздуховодах с воздушным потоком, позволяющей повысить эффективность проектирования акустических анемометров.

Основные научные выводы и практические результаты заключаются в следующем:

- Разработан импульсный метод измерения акустических колебаний в волноводе-воздуховоде позволяющий разделить во времени модовые составляющие принимаемого сигнала, что позволило повысить точность измерения газовоздушных потоков.

- Построена математическая модель распространения акустических колебаний в волноводе-воздуховоде в импульсном режиме измерения для программно-алгоритмического обеспечения АСНИ.

- Разработан аппаратно-программный комплекс для автоматизированной системы научного исследования акустических анемометров и спирометров, учитывающий все влияющие на процесс измерения составляющие – геометрические размеры прибора, метрологические характеристики и среду измерения.

Литература.

1. Пучков Л.А., Шкундин С.З., Соболев В.В. Метрологическое обеспечение анемометрии в горнодобывающей промышленности // Безоп. труда в пром-ти. №3.1996.
2. Карпов Е.Ф., Басовский Б.И. Контроль проветривания и дегазации в шахтах: Справочное пособие. М.: "Недра".1994.
3. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И. Аэрология горных предприятий: Учеб. для вузов. М.:Недра,1987. 421с. С.336-344.
4. Кремлева О. А. Совершенствование акустического способа измерения скоростных параметров газовоздушных потоков в горных выработках. канд. дис. М, 1997
5. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. Л.:Машиностроение,1989. 701с.
6. Шкундин С.З. Физико-техническое обоснование акустического контроля скоростей газовоздушных потоков в системах обеспечения безопасности шахт: Дис.докт.тех.наук: 05.15.11,05.26.01/МГИ.-М.,1990.313с.
7. Румянцева В.А. Совершенствование средств измерения аэродинамических параметров вентиляционных систем. дис.канд.тех.наук. –М.: 2001.
8. Шорников Е.А. Применение различных расходомеров на электростанциях и в тепловых сетях «Совершенствование средств измерения расхода жидкости, газа и пара» (под ред. Кремлевского П.П.) Тр. междунар. науч.-техн. конф., 22-24 окт. СПб.: МЦЭНТ, 1996
9. Н.Н. Куприянова. Анализ импорта в Россию в 2002 году расходоизмерительных приборов. 25-летие Тюменской научно-производственной школы расходометрии: материалы общерос. науч.-практ. конф. [под общ. ред. Г.С. Абрамова] М.: ВНИИОЭНГ, 2004, с. 30-37
10. В.С. Болдин. Опыт разработки и производства вихревых счетчиков промышленного назначения. 25-летие Тюменской научно-

- производственной школы расходомерии: материалы общерос. науч.-практ. конф. [под общ. ред. Г.С. Абрамова] М.: ВНИИОЭНГ, 2004, с. 38-46
- 11.Ю.Г. Асцатуров, Ю.Б. Ханжонков, В.В Семенов, Устройство для оценки способности зданий сохранять тепло (Опубликовано в INTERNET)
- 12.Ватин Н.И. Пространственно-временная корреляция пульсаций скорости жидкости в развитом турбулентном течении в круглой трубе / СПб: Изд-во СПбГТУ, 1999.
- 13.Бродин И.С., Билоус В.М. Оптические квантовые генераторы в системах измерения расхода газа. Расчет и конструирование расходомеров. Л.:Машиностроение,1978, с.143-147.
- 14.Шкундин С.З., Кремлева О.А., Румянцева В.А. Теория акустической анемометрии. М.: изд-во «Академии горных наук», 2001.
- 15.Бражников Н.И. Ультразвуковая фазометрия –М: Энергия, 1968
- 16.Биргер Г.И., Бражников Н.И. Ультразвуковые расходомеры –М: Металлургия, 1964
- 17.Гуманюк Н.Н., Архипенко И.И, Захарченко В.И. Ультразвуковой прибор для измерения расхода и скорости движения воздуха в шахтных выработках. – Уголь Украины, 1968, №4.
- 18.Бойко В.А., Когород Л.И., Карбовский Ю.М. Принципы создания ультразвукового расходомера воздуха в шахтных выработках. –В сб.: Совершенствование проветривания шахт. Труды Днепропетровского филиала Института механики АН УССР.-М., Недра, 1967, вып.1.
- 19.Шкундин С.З., Лашин В.Б. Фазовый способ акустической анемометрии// Метрология.1990.№ 7.С.39-43.
- 20.David I. Plaut and John G. Webster, Design and Construction of an Ultrasonic Pneumotachometer, IEEE 1980
- 21.A.H. Kou, W.R. Peickert, E.E. Polenske, M.G. Busby, A Pulsed Phase Measurement Ultrasonic Flowmeter for Medical Gases, Annals of Biomedical Engineering, Vol. 12, pp.263-280, 1984

22. В.Е. Чередниченко Применение акустических периодических структур для измерения объемного расхода газа. – Современные средства измерения расхода и количества. Перспективы. Расчет. Эксперимент: Сб. науч. тр. – М: НИИТеплоприбор, 1990, с.77
23. В.И. Филатов Гидродинамические погрешности ультразвуковых расходомеров. «Совершенствование средств измерения расхода жидкости, газа и пара» (под ред. Кремлевского П.П.) Тр. междунар. науч.-техн. конф., 22-24 окт. СПб.: МЦЭНТ, 1996
24. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. –М. «Наука», 1981.
25. Ландау Д.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М:1988, с.733.
26. Лапин А.Д. Об излучении и распространении звука в цилиндрической трубе при наличии потока// Акустико-аэродинамические исследования: сборник. Под ред. Римского-Корсакова. -М.: 1975. С. 57-60.
27. Шкундин С.З., Бондарев А.М., Лихачев А.А. Аналитическое описание распространения акустических волн в анемометрическом канале // Горный журнал. Изв .ВУЗов, № 9, 1987.
28. K.Ogimoto. Sound radiation from a finite length unflanged circular duct with uniform flow. UTIAS Report, № 231, 1978.
29. Шкундин С.З., Кремлева О.А. Метод приближенного расчета акустического поля внутри анемометрического канала с потоком с учетом дифракции на открытых концах//Акустика на пороге XXI века: Сборник трудов VI сессии Российского акустического общества. - М.: Издательство Московского государственного горного университета. 1997.504с. С.321-324.
30. Кремлева О.А. Расчет акустического давления внутри канала анемометра для контроля проветривания горных выработок. Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.:МГГУ. Вып.4, 1997.
31. Шкундин С.З., Кремлева О.А. Метод приближенного расчета акустического поля внутри анемометрического канала с потоком с учетом дифракции на

- открытых концах//Акустика на пороге XXI века: Сборник трудов VI сессии Российского акустического общества. - М.: Издательство Московского государственного горного университета. 1997.504с. С.321-324.
- 32.Шкундин С.З., Румянцева В.А. Повышение точности измерения скорости воздушного потока акустическим анемометром, -Измерительная техника, №1, 2001, с. 54-57.
- 33.Шкундин С.З., Стучилин В.В., Румянцева В.А. «Автоматизация проектирования акустического анемометра для угольных шахт» Сборник докладов конференции «Горняк-2000».
- 34.Шкундин С.З., Стучилин В.В., Румянцева В.А. Автоматизация проектирования акустического анемометра. Сборник статей международной научно-практической конференции «Интеллектуальные электромеханические устройства». Часть 2. – Новочеркасск, ЮРГТУ (НПИ), 2000, с6-11.
- 35.Стучилин В.В. Система автоматизированного проектирования анемометрических приборов в горнорудной промышленности. канд.дис. –М: 2002.
- 36.Канторович Л.В., Крылов В.И. Приближенные методы высшего анализа Л.– М., Физматгиз, 1962
- 37.Ультразвуковые преобразователи. Под ред. Е. Кикучи. Москва “Мир” 1972
- 38.Основы теории цепей: Учебник для вузов/ Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил, С.В.Страхов.- 5-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1989. -528 с.: ил.
- 39.Шкундин С.З., Буянов С.И., Румянцева В.А. “Исследование распространения акустического импульса в цилиндрическом волноводе с движущимся воздушным потоком. ” –М: “Наукоёмкие технологии”, №1, 2002 г
- 40.Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М:1977, с.785.

- 41.Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики.-М: «Наука» 1977. 736с. С.623-636.
- 42.Теория автоматического управления. Ч.1. Коллектив авторов. Под ред. проф. А.В. Нетушила. «Высшая школа», 1967.
- 43.Вентцель Е.С. Теория вероятностей. –М: Гос. изд-во физико-математической литературы. 1958.
- 44.Яворский Б.М, Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов.// М:”Наука”. 1974. 942с.
- 45.Физическая энциклопедия. Т.1. / Гл.ред. А.М.Прохоров. М: 1988. С.286.
- 46.Калашников Е.А., Буянов С.И. Автоматизация проектирования акустического анемометра и спирометра, работающего в импульсном режиме измерения / Известия Санкт-петербургского государственного технологического института (технического университета) № 71(97)/2024 – СПб, 132 стр.
47. Буянов С.И. Уменьшение погрешности измерения импульсного режима акустического спирометра / журнал Научно-технический вестник Поволжья №6 2025, стр. 159.
48. Пучков Л.А., Шкундин С.З., Буянов С.И. Способ измерения расхода потока и устройство для его осуществления. Московский государственный горный университет. Патент на изобретение №2284015 от 01.04.2004 г.
49. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. — М.: Издательство «Наука», 1977. — 872 с.
- 50.Буянов С.И., Румянцева В.А. Разработка моделей физических процессов первичного преобразователя для САПР акустического анемометра // Горный информационно-аналитический бюллетень № 5. 2021 С. 169-178. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_169.
- 51.Шкундин С.З., Буянов С.И., Румянцева В.А. Оценка влияния состава контролируемого потока на погрешность акустического анемометра // Горный информативно-аналитический бюллетень // 2000. № 10. С. 181-182.

- 52.Буянов С.И., Румянцева В.А. Пути компенсации дополнительной погрешности акустического анемометра, связанной с изменением состава контролируемого потока // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. №6. С. 330-339.
- 53.Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: учебник.6-е издание М: изд-во Московского университета, 1999. С. 523-533.
- 54.Кремлева О.А. Разработка математической модели распространения акустических волн в канале анемометра для контроля проветривания горных выработок. Канд. дисс. –М: 1997.
- 55.Яворский Б.М, Детлас А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов.// М:»Наука». 1974. 942 с.
- 56.Dhruv T., Nimit K., Rohan M. Design and simulation of MEMS anemometer / Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Pune.
- 57.Zhongliang Luo, Zhe Li, Chengchen Gao, Yilong Hao, Yufeng Jin Anemometer with three dimensional directionality for detection of very low speed air flow and acoustic particle velocity detecting capability / 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS). 2017, pp. 1029—1032.
- 58.Jedermann R., Hartgenbusch N., Borysov M., Lang W. Design parameters for the housing of two-dimensional air flow sensors. IEEE Sensors Journal, 2018, vol. 18, no. 24, pp. 10154—10162.
59. Bo Sun, Wei Zhou, En-Quan Fang, Min-Zheng Yuan, Ning Gan A Cylindrical vehiclemounted anemometer based on 12 pressure sensors—principle, prototype design, and validation. IEEE Sensors Journal. 2018, vol. 18, no. 17, pp. 6954—6961.
60. Dian Milchev Iliev Research and development of a strain gauge anemometer // IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics (ET). 2018.

61. Vipin Prakash Yadav, Alakh Sinha, Arun Khosla Design and implementation of ultrasonic anemometer / 4th International Conference on Power, Control & Embedded Systems (ICPCES). 2017. DOI: 10.1109/ICPCES.2017.8117645.
62. S.Shkundin, S.Buyanov, V.Stuchilin New acoustics devices for air-gas flow rates measurements. / 2nd Congress of Alps-AdriaAcoustic Association.June, 2005, Opatija, Croatia.
- 63.Arens E., Ghahramani A., Przybyla R., Andersen M., Min S., Pefferer T., Raftery P., Zhu M., Luu V., Zhang H. Measuring 3D indoor air velocity via an inexpensive low-power ultrasonic anemometer // Energy and Buildings. 2020, vol. 211, no. 15, article 109805.
64. Шкундин С. З., Буянов С. И., Румянцева В. А., Стучилин В. В. Измеритель дебита метана в подземных дегазационных скважинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № S1. — С. 504—511.
65. Johnston G. W., Ogimoto K. Sound radiation from a finite length unflanged circular duct with uniform axial flow. I. Theoretical analysis // Journal of the Acoustical Society of America. 1980, vol. 68, no. 6, pp. 1858—1870.
66. Кремлева О. А. Шкундин С. З. Метод расчета акустического поля внутри конечного цилиндрического канала с потоком // Акустический журнал. — 1998. — т. 44. — № 1. — С. 84.
67. Шкундин С. З., Стучилин В. В., Румянцева В. А. Автоматизация проектирования акустического анемометра для угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2001. — № 10. — С. 175—180.
- 68.Воронцов А. В., Румянцева В. А. Моделирование калибровочной характеристики акустического анемометра // Горный информативно-аналитический бюллетень. —2013. — № 10. — С. 331—336.

69. Румянцева В. А. Исследование распространения акустической волны в неоднородном воздушном потоке в канале шахтного акустического анемометра // Научный вестник МГГУ. — 2013. — № 10 (43). — С. 81—89.
70. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И. Аэрология горных предприятий. -М: Недра. 1987.
71. Установка аэродинамическая А-02вм. Руководство по эксплуатации 4311-001-80705693-2013 РЭ.
72. Установка аэродинамическая А-02вм. Технические условия 4311- 001-80705693-2013 ТУ.
73. Нестеров А.Л. Проектирование АСУТП. - М: Издательство: ЛЕАН. 2006 г.
74. Шишмарев В.Ю. Автоматика. - М: Издательство: Академия, 2008 г.
75. Semyon Shkundin, Evgeny Kalashnikov, Sergei Bouyanov, Slava Kotya kin. New Acoustic Sensors for Breathing Investigations. RECENT ADVANCES on SYSTEMS, SIGNALS, CONTROL, COMMUNICATIONS and COMPUTERS. Proceedings of the 7th International Conference on Sensors and Signals (SENSIG '15) Budapest, Hungary December 12-14, 2015
76. О. А. Кремлева, С. З. Шкундин МЕТОД РАСЧЕТА АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВНУТРИ КОНЕЧНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КАНАЛА С ПОТОКОМ. АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 1998. том 44. № 1. с. 84-88
77. Воскресенский Г.В., Плисс А.И. Об одном конструктивном методе решения граничных задач дифракции на телах конечных размеров, основанном на факторизации // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 1975. Т. 15. № 3. С. 672-681.
78. Шейдеров ЕЛ. Излучение звука при осесимметричных колебаниях конечной открытой трубы // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 1. С. 138-147.
79. Басовский В.Г., Гомилко А.М., Мелешко В.В. Излучение звука жесткой цилиндрической оболочкой конечной длины // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 6. С. 983-989.

80. Рубанов ИЛ., Свердлин Г.М. Излучение звука радиально колеблющимся отрезком трубы // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 6. С. 1071-1076.
81. Миттра Р., Ли С.В. Аналитические методы теории волноводов / Пер. с англ. А.И. Плисса. Под ред. Г.В. Вознесенского. М., 1974. С. 327.
82. Haj-Hariri H. Generalized modal expansion: A Wiener-Hopf problem // J. Acoust. Soc. Am. 1994. 96(6). P. 3039-3048.
83. Корн Г., Корн Т Справочник по математике для научных работников и инженеров.// - М.: 1977,. гл. 4. §11.
84. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики.// - М.: 1966. гл. 2. §3.
85. Яворский Б.М, Детлас А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов.// - М.: Наука. 1974. 942 с.
86. Физическая энциклопедия. Т.1. / Гл. ред. А.М. Прохоров. - М: 1988. - С. 286.
87. Хоровиц П. Хилл У. Искусство схемотехники. - М. Мир. 1998 г., 700 с.
88. С.З. Шкундин, А.Л. Иванников. Новые акустические приборы для измерения скоростей и расходов газоздушных потоков. семинар 19 доклад на симпозиуме "неделя горняка 2000"
89. С.З. Шкундин, В.В. Стучилин, В.А. Румянцева, Автоматизация проектирования акустического анемометра для угольных шахт. семинар 18 доклад на симпозиуме "неделя горняка -2001"
90. под. ред. Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи. – М., Мир. 1972.
91. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. – М., Мир. 1971.
92. Тютюнник П.М. Коробейников Н.С. Ультразвуковая и звуковая техника. ч1, – М., МГИ, 1984.
93. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. – Л., Судостроение, 1976.
94. Ando Y. Sound Radiation from Semi-Infinite Circular Pipe of Certain Wall Thickness. *Acustica*. Vol. 22 (1969/70).

95. Шкундин С.З. Буянов С.И., Румянцева В.А. Спектральный анализ пульсаций скоростей потока, измеренных акустическим анемометром (статья) / «Измерительная техника» 2004, №4, с.46-48.
96. Степанян И.В., Карпишук А.В., Буянов С.И. Информационная система спирометрического анализа / Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 9. С. 297-303.
97. Буянов С.И., Румянцева В.А. Датчик скорости звука для системы измерения скорости газовой воздушной смеси с изменяющимся составом. (доклад «Неделя горняка 2007») / Горный информационно-аналитический бюллетень. -М: МГГУ, №6, 2007, с. 244-253.
98. С.З. Шкундин, Буянов С.И., А.А. Жердев. Совершенствование акустического спирометра. / Препринт, М, изд «Горная книга». 2011.
99. С.З. Шкундин, Буянов С.И., А.А. Жердев. Требования к современным спирометрам / Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). – 2011. – №5. – С. 5–10.
100. С.З. Шкундин, Буянов С.И., Воронцов А.В., Стучилин В.В. Автоматизация метрологического обеспечения безопасности угольных шахт РФ / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №1. – С. 333–341.
101. Shkundin S., Buyanov S., Stuchilin V., Vorontsov A. METROLOGY SUPPORT OF COAL INDUSTRY VENTILATION CONTROL / REPORTS OF THE XXIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM «MINER'S WEEK – 2015» с. 350–355.
102. Shkundin S.Z., Buyanov S., Rumyantseva V.A., Vorontsov A.V. MODELING AERODYNAMIC TRANSIENT PROCESSES IN AN AEROMETRIC PLANT / Measurement Techniques. 2015. T. 57. № 12. С. 1396-1402.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2284015

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ПОТОКА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Патентообладатель(ли): *Московский государственный горный университет (МГГУ) (RU)*

Автор(ы): *Пучков Лев Александрович (RU), Шкундин Семен Захарович (RU), Буянов Сергей Игоревич (RU)*

Заявка № 2004109828

Приоритет изобретения 01 апреля 2004 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 сентября 2006 г.

Срок действия патента истекает 01 апреля 2024 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

Приложение Б. Акт о внедрении



Акционерное общество
«Центральный Научно-
Исследовательский Институт
«ВОЛНА»

109147, Москва, ул. Марксистская, д. 20,
стр.5, пом. 19А
Тел.: +7 (495) 799-23-71,
эл. почта: arseniev50@mail.ru
ОКПО: 93457873, ОГРН: 1067746246700
ИНН: 7709657825, КПП: 770901001

Исх. № 137/2026 от « 08 » июня 2026 г.

В Диссертационный совет
НИТУ МИСИС

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертационной работы

Материалы диссертации Буянова С.И. на тему: «Автоматизированная система исследований и настройки параметров акустических анемометров и спирометров», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук используются в практической деятельности Акционерное Общество "Центральный Научно-Исследовательский Институт "ВОЛНА" (АО «ЦНИИ «ВОЛНА»), в частности используется разработанный в диссертации метод импульсного измерения модового распространения акустических колебаний в анемометрическом канале.

Разработанный в рамках диссертации аппаратно-программный комплекс, использовался для проектирования анемометров серии АПА-1.

Прибор выпускается по техническим условиям УЕИС.407351.001ТУ.

«Анемометры портативные акустические АПА-1» внесены в Государственный реестр средств измерения, Регистрационный № 20727-00. Имеет все необходимые разрешительные сертификаты и свидетельства для работы на шахтах и рудниках.

Анемометр портативные акустические АПА-1 (рудничный) предназначен для измерения скорости воздуха в выработках рудников и шахт, в производственных и жилых зданиях при санитарных обследованиях, с выводом информации на цифровой индикатор.

Прибор АПА-1 первый анемометр в России, отвечающий требованиям Минздравсоцразвития РФ в сфере по обеспечению безопасных условий работы и охраны труда (Приказ от 9 сентября 2011 г. N 1034).

Генеральный директор
АО «ЦНИИ «ВОЛНА»



В.Г. Арсеньев

Приложение В. Свидетельство об утверждении типа средств измерений.




ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

об утверждении типа средств измерений

RU.C.28.001.A № 45849

Срок действия до 26 марта 2017 г.

НАИМЕНОВАНИЕ ТИПА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
Анемометры портативные акустические АПА-1

ИЗГОТОВИТЕЛЬ
ЗАО "ЦНИИ "Волна", г. Москва

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № 49354-12

ДОКУМЕНТ НА ПОВЕРКУ
МП 2550-0192-2011

ИНТЕРВАЛ МЕЖДУ ПОВЕРКАМИ 2 года

Тип средств измерений утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от **26 марта 2012 г. № 185**

Описание типа средств измерений является обязательным приложением к настоящему свидетельству.

Заместитель Руководителя
Федерального агентства

Е.Р.Петросян

"....." 2012 г.

Серия СИ

№ 004028

ОПИСАНИЕ ТИПА СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Анемометры портативные акустические АПА-1

Назначение средства измерений

Анемометры портативные акустические АПА-1 (далее - анемометры) предназначены для измерения скорости воздушного потока.

Описание средства измерений

Принцип действия анемометра основан на излучении и приеме звуковых волн между двумя пьезоэлектрическими преобразователями в волноводе-воздуховоде. Измеряется разность фаз между последовательностями ультразвуковых сигналов, посланных пьезокерамическими кольцами, попеременно излучающими и принимающими импульсы по потоку и против.

Генератор вырабатывает импульсы высокой частоты, с помощью которых измеряется время прохождения сигнала от излучателя к приемнику при помощи счетчика.

Конструктивно анемометр состоит из трех основных частей: анемометрического канала, корпуса и ручки, выполненных из алюминиевого сплава и покрытых снаружи полимерным покрытием.

Все три части соединены между собой герметично с помощью заливки эпоксидной смолой и резиновой прокладки, что обеспечивает степень защиты корпуса IP54 по ГОСТ 14254-80.

Внутри трубопровода расположены кольца пьезоэлектрических преобразователей, которые становятся то излучателями, то приемниками, измеряя скорости в прямом и обратном направлении.

В корпусе анемометра размещаются печатные платы, на которых смонтирован дисплей, микроконтроллер, кнопки и другие элементы электрической схемы. На задней стороне корпуса имеются 4 отверстия с резьбой для крепления прибора на жесткой поверхности.

В ручке анемометров АПА-1/1 и АПА-1/3 размещается аккумуляторная батарея, в состав которой входят четыре аккумулятора типоразмера AAA 1,2 В, с емкостью 1100 мА·ч, и цепи, обеспечивающие искробезопасность. В нижней части ручки под съемной крышкой имеется гнездо для подключения разъема зарядного устройства, обеспечивающего подзарядку батареи.

В модификации АПА-1/2 через разъем, расположенный на нижней части корпуса, подается питание и из анемометра передается в сеть информация об измерениях.

Модификации анемометра АПА-1 имеют следующие отличительные особенности:

АПА-1/1 - предназначен для ручного контроля вентиляционного режима и беспроводной передачи информации об измерениях, имеет автономное питание;

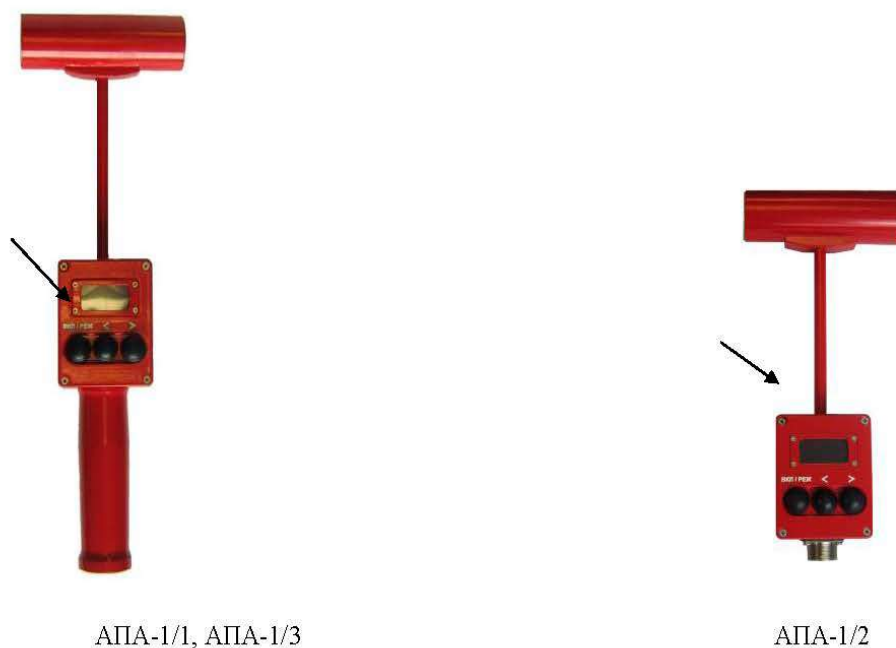
АПА-1/2 - предназначен для работы в составе автоматизированной системы контроля газовых потоков, отсутствует ручка.

АПА-1/3 - предназначен для эпизодических измерений скорости воздушного потока.

Все модификации предназначены для работы в горных выработках шахт, опасных по газу и пыли и могут применяться в других отраслях.

Анемометры АПА-1 имеют взрывозащищенное исполнение с маркировкой взрывозащиты Po ExiaI X.

Внешний вид анемометров показан на рисунке 1.



Стрелкой показано местоположение клейма ОТК
Рис. 1

Программное обеспечение

Идентификационные данные программного обеспечения приведены в таблице 1.

Идентификационные данные программного обеспечения

Таблица 1

Наименование программного обеспечения	Идентификационное наименование программного обеспечения	Номер версии (идентификационный номер) программного обеспечения	Цифровой идентификатор программного обеспечения (контрольная сумма исполняемого кода)	Алгоритм вычисления цифрового идентификатора программного обеспечения
FlowLab	FlowLab.cxc	20103	10724	CRC 16

Уровень защиты программного обеспечения от непреднамеренных и преднамеренных изменений по МИ 3286-2010 – С.

Влияние ПО на метрологические характеристики учтено при их нормировании.

Метрологические и технические характеристики

Диапазон измерений средней скорости воздушного потока, м/с 0,05 - 30,0

Пределы допускаемой абсолютной погрешности, м/с: $\pm (0,05 + 0,05 \cdot [V])$

где V- скорость воздушного потока, м/с

Потребляемый ток от источника питания при напряжении 5 В, мА, не более 130

Габаритные размеры, мм, не более

длина - для АПА-1/1, АПА-1/3 401

- для АПА-1/2 287

ширина 122

высота 58

Масса, кг, не более	- для АПА-1/1, АПА-1/3	0,95
	- для АПА-1/2	0,67
Полный средний срок службы, лет		10
Условия эксплуатации:		
диапазон температуры окружающего воздуха, °С		от 5 до 40
относительная влажность воздуха при температуре 35 °С, %		до 98
диапазон атмосферного давления, кПа (мм рт.ст.)		71,6-106,7 (537-800)
Средняя наработка на отказ, ч		32000

Знак утверждения типа

Знак утверждения типа наносят на боковую поверхность корпуса прибора в виде наклейки или гравировки и на титульный лист паспорта методом компьютерной графики.

Комплектность средства измерений

Составная часть комплекта	АПА-1/1	АПА-1/2	АПА-1/3
Прибор	+	+	+
Устройство зарядное УЗ-1000	+	-	+
Ключ специальный	+	-	+
Паспорт	БВТИ.407351.001ПС	БВТИ.407351.002ПС	БВТИ.407351.003ПС
Протокол информационного обмена	БВТИ.407351.001Д6	БВТИ.407351.002Д6	-
Приемник радиосигнала	+	-	-
Чехол	+	-	+

Поверка

осуществляется по методике: МП 2550-0192-2011 “Анемометры портативные акустические АПА-1. Методика поверки ” утвержденной ГЦИ СИ ФГУП “ВНИИМ им. Д.И. Менделеева” 21.10.2011 г.

Основные средства измерений, применяемые при поверке:

- эталонная аэродинамическая труба (ТУ25-7422.037-90) с диапазоном воспроизведения скорости воздушного потока от 0,1 до 30 м/с и погрешностью не более $\pm (0,015+0,015V)$ м/с, где V – скорость воздушного потока, м/с;
- измеритель скорости лазерный доплеровский ЛАД-0xx с диапазоном измерений скоростей воздушного потока от 0,02 до 100 м/с и с погрешностью $\pm 1\%$

Сведения о методиках измерений

Методика прямых измерений изложена в паспортах:

- БВТИ.407351.001ПС «Анемометр портативный акустический АПА-1/1. Паспорт»
- БВТИ.407351.002ПС «Анемометр портативный акустический АПА-1/2. Паспорт»
- БВТИ.407351.003ПС «Анемометр портативный акустический АПА-1/3. Паспорт»

Нормативные и технические документы, устанавливающие требования к анемометрам цифровым переносным АПА-1

1. ГОСТ 8. 542-86 «ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений скорости воздушного потока».

2. УЕИС.407351.001 ТУ «Анемометр портативный акустический АПА-1. Технические условия».

Рекомендации по областям применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений

осуществление деятельности по обеспечению безопасности при чрезвычайных ситуациях, осуществление производственного контроля за соблюдением установленных законодательством Российской Федерации требований промышленной безопасности к эксплуатации опасного производственного объекта, выполнение работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда

Изготовитель

ЗАО «ЦНИИ «Волна», г. Москва.

Адрес: 109147, г. Москва, ул. Марксистская, д. 20, стр.5

Тел. (495) 663-33-24 (коммутатор) (495) 799-23-71(директор)

факс: (495) 663-33-24 доб. 333.

Испытательный центр

ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», регистрационный номер 30001-10

Адрес: 190005, Санкт-Петербург, Московский пр., 19 Тел. (812) 251-76-01, факс (812) 713-01-14, e-mail: info@vniim.ru.

Заместитель

Руководителя Федерального
агентства по техническому
регулированию и метрологии

Е. Р. Петросян

М.п.

« »

2012 г.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

об утверждении типа средств измерений

PATTERN APPROVAL CERTIFICATE OF MEASURING INSTRUMENTS

RU.C.29.001.A

№ 38384

Действительно до
" 01 " января 2015 г.

Настоящее свидетельство удостоверяет, что на основании положительных
результатов испытаний утвержден тип преобразователей расхода акустических

"Спиросенс"

наименование средства измерений

ООО "Сирсенсор", г.Москва

наименование предприятия-изготовителя

который зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под
№ 43142-09 и допущен к применению в Российской Федерации.

Описание типа средства измерений приведено в приложении к настоящему
свидетельству.

Заместитель
Руководителя



В.Н.Крутиков

27 02 2015 г.

Продлено до

" " " г.

Заместитель
Руководителя

" " 20 г.

380384



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

об утверждении типа средств измерений

RU.C.28.001.A № 49696

Срок действия до 31 января 2018 г.

НАИМЕНОВАНИЕ ТИПА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
Установки аэродинамические А-02

ИЗГОТОВИТЕЛЬ
ООО "Сирсенсор", г.Москва

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № 52571-13

ДОКУМЕНТАЛ ПОВЕРКУ
МП 2550-0207-2012

ИНТЕРВАЛ МЕЖДУ ПОВЕРКАМИ 1 год

Тип средств измерений утвержден приказом Федерального агентства по
техническому регулированию и метрологии от 31 января 2013 г. № 48

Описание типа средств измерений является обязательным приложением
к настоящему свидетельству.

Заместитель Руководителя
Федерального агентства

Ф.В.Булыгин

"....." 2013 г.

Серия СИ

№ 008434

Приложение Г. Программа приёма данных, контроля и настройки параметров датчиков, работающих в импульсном режиме.

Данная программа предназначена для мониторинга входных данных с прибора анемометра/спирометра, а также для его настройки.

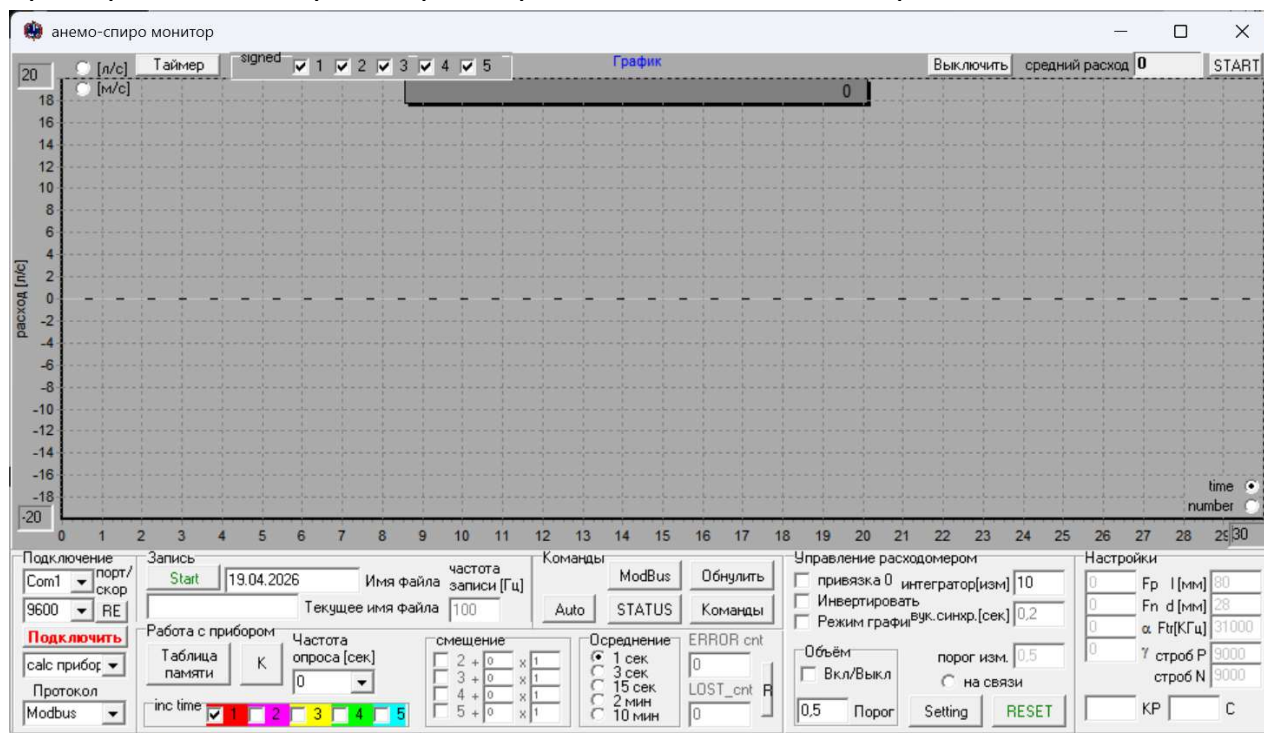
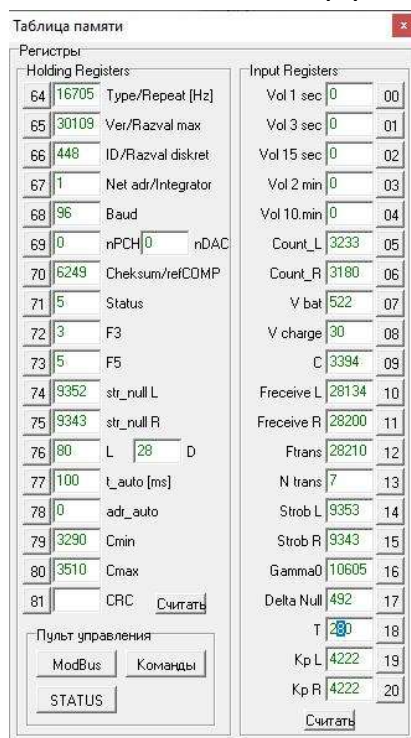
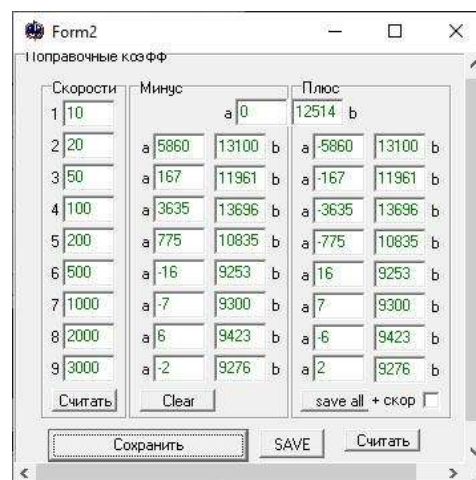


Рис. 1. Интерфейс программы работы с датчиком



а)



б)

Рис. 2. а) Настройка параметров импульсного метода измерения.

б) Калибровка прибора.