

БУЯНОВ Сергей Игоревич

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИССЛЕДОВАНИЙ И НАСТРОЙКИ
ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ АНЕМОМЕТРОВ И СПИРОМЕТРОВ

Специальность 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, 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, 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, выносимые на защиту:

- Разработан импульсный метод измерения позволяющий разделить во времени модовые составляющие принимаемого сигнала, что дает возможность обработки сигнала, очищенного от помех;
- Построена математическая модель распространения акустических колебаний в волноводе-воздуховоде в импульсном режиме измерения.
- 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 выводов, положений 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 RU.C.28.001.A № 45849 на анемометры портативные акустические АПА-1, RU.C.28.001.A № 49696 на установку аэродинамическую А-02 и RU.C.29.001.A № 38384, на преобразователь расхода акустический «Спиросенс» (Приложение В).

- наличием патента на изобретение № 2284015 на «Способ измерения расхода потока и устройство для его осуществления» (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.

Практическое значение работы состоит:

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 результатов 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.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (102 наименований).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы исследований, сформулирована цель диссертационной работы, изложены основные научные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая ценность работы, указаны сведения об апробации работы. Обоснована необходимость разработки *автоматизированной системы исследований и настройки параметров в системах аэроакустического взаимодействия «волновод-воздуховод» в волноводах с газовой воздушным потоком* для проектирования акустических анемометров.

В первой главе проанализированы существующие методы анемометрии, дана оценка реализованным на их основе средствам измерения: рассмотрены их основные достоинства и недостатки. Проанализированы перспективы и задачи акустической анемометрии.

Постоянно растут требования к техническим характеристикам измерительных приборов анемометров и спирометров. От точности их измерений зависят как качество проветривания горных выработок, так и точность диагноза при заболевании органов дыхания.

В настоящее время среди методов, заложенных в основу приборов, распространены тахометрический, термоанемометрический, оптический, вихревой, метод перепада давлений и акустический. Каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками, что позволило выделить критерии их сравнения. Наиболее перспективным методом измерения является акустический способ измерения.

На основании вышеизложенного были сформулированы **основные задачи исследования:**

1. Найти оптимальный способ излучения акустического сигнала, позволяющий разделить по времени прихода различные гармонические составляющие сигнала – моды, что позволит повысить точность измерения.

2. Разработать математическую модель распространения акустического сигнала в волноводе-воздуховоде для импульсного режима излучения, позволяющую автоматизировать процесс исследования аэроакустического взаимодействия.

3. На основании результатов моделирования аэроакустического взаимодействия в канале разработать алгоритм обработки акустического сигнала в импульсном режиме измерения для автоматизированной системы научного исследования акустического анемометра и определения его оптимальных параметров.

4. Оценить чувствительность разработанной математической модели к допустимым изменениям входных параметров, включая состав измеряемого воздуха.

5. Экспериментально оценить адекватность результатов моделирования лежащего в основе импульсного режима измерения.

Во второй главе рассматривается прототип акустического анемометра, работающего в непрерывном режиме излучения. Проводится анализ модели работы акустического анемометра в непрерывном режиме излучения.

Рассмотрены погрешности фазового метода измерения скорости воздушного потока применительно к акустическому анемометру.

В «лаборатории средств аэрометрического контроля» Московского государственного горного университета под руководством профессора Шкундина С.З. был разработан акустический анемометр, работающий в непрерывном режиме излучения. В соавторстве с Кремлёвой О.А. и Румянцевой В.А. была разработана математическая модель распространения акустических колебаний в анемометрическом канале для непрерывного режима излучения.

При реализации фазового метода измерения существует ряд проблем. Невозможно компенсировать погрешность, связанную с модовым способом распространения сигнала из-за громоздкости расчетов. 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.

Для решения данной проблемы предложен импульсный метод измерения.

Далее построена модернизированная математическая модель модового распространения сигнала в анемометрическом канале в импульсном режиме измерения и распространение импульса, отражённого от концов волновода.

В ходе выполнения диссертационной работы были проведены исследования нового импульсного акустического метода измерения скорости воздушного потока.

Для данного типа приборов создана математическая модель анемометрического канала, изображённого на рис. 2.2, учитывающая его конечность. Полученная модель позволяет рассчитать акустическое давление на принимающих преобразователях в анемометрическом канале, рассчитать его геометрию и метрологию.

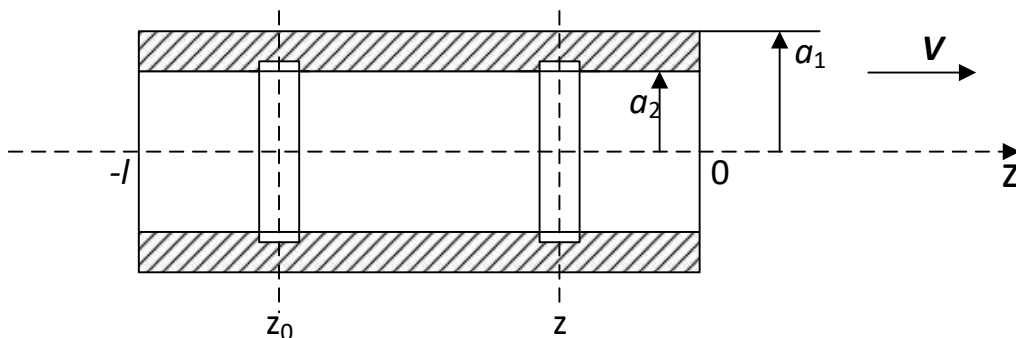


Рис. 2.2. Анемометрический канал

Задача о распространении акустических волн в бесконечном цилиндре в движущейся среде была решена для источника, излучающего непрерывный

гармонический сигнал (3.4). Это решение обобщается здесь на случай источника, работающего в импульсном режиме (3.5).

В непрерывном режиме: $f(t) = f_{\text{непр}}(t) = \exp(i\omega t)$ (3.4)

В импульсном режиме: $f(t) = f_{\text{имп}}(t) = \begin{cases} \exp(i\omega t) & t \in [nT, \tau + nT] \\ 0 & t \notin [nT, \tau + nT] \end{cases}$ (3.5)

На (рис. 2.3) показаны теоретическая фазовая кривая (зависимость фазы принимаемого сигнала от скорости потока), например, для второй моды ($m=2$), распространяющейся в анемометре.

При следующих параметрах:

$$a = 1.4 \text{ см},$$

$$\omega = 2\pi \times 30 \text{ кГц},$$

$$c = 343 \text{ м/с},$$

число распространяющихся мод
равно трем ($m = 0, 1, 2$).

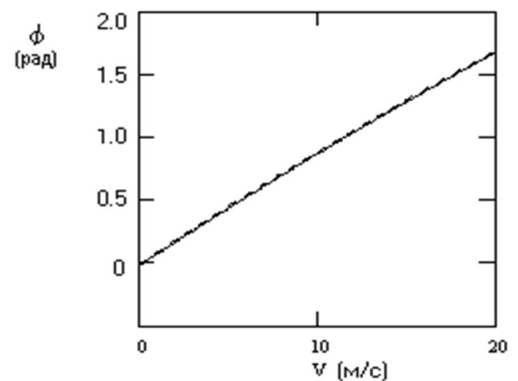


Рис. 2.3. Фазовая характеристика акустического анемометра, работающего в импульсном режиме

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

Для моделирования воспользуемся методом электромеханических аналогий, и представим преобразователь в виде электрической схемы замещения. 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. 2.4.

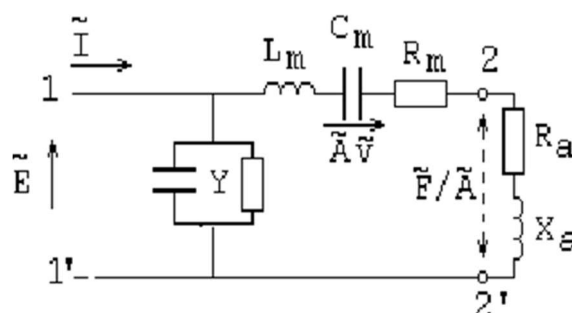


Рис. 2.4. Схема замещения пьезоэлектрического излучателя звука.

Схема замещения приемного преобразователя показана на рис. 2.5.

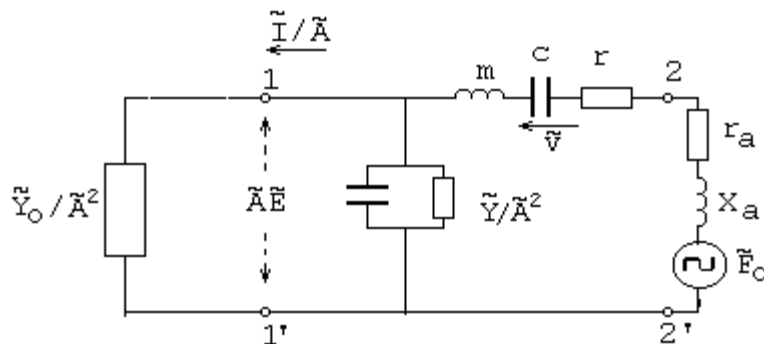


Рис.2.5. Схема замещения пьезоэлектрического приемника

В **третьей главе** представлен процесс разработки автоматизированной системы научных исследований на базе математической модели распространения акустического сигнала в анемометрическом канале в импульсном режиме излучения.

Акустический анемометр состоит из первичного преобразователя и электронного блока (рис.3.1), содержащего дисплей или интерфейс для передачи данных. Первичный преобразователь акустического анемометра представляет собой цилиндрический волновод-воздуховод с встроенными в его стенки пьезоэлектрическими кольцами.

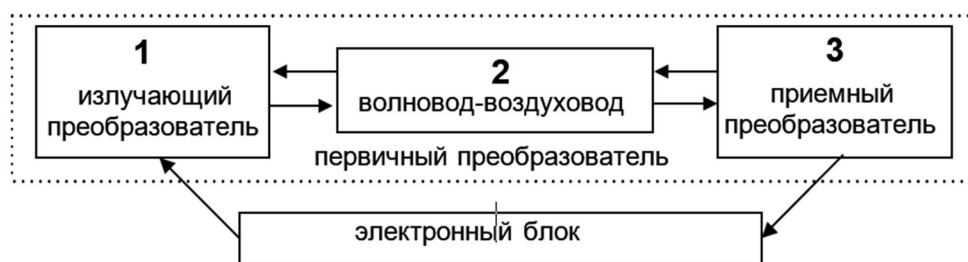


Рис. 3.1. Модель датчика

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.

Излучающие и приёмные электромеханические преобразователи представлены электрическими схемами замещения.

На рис. 3.2. изображена структурная схема пьезоэлектрического излучателя.

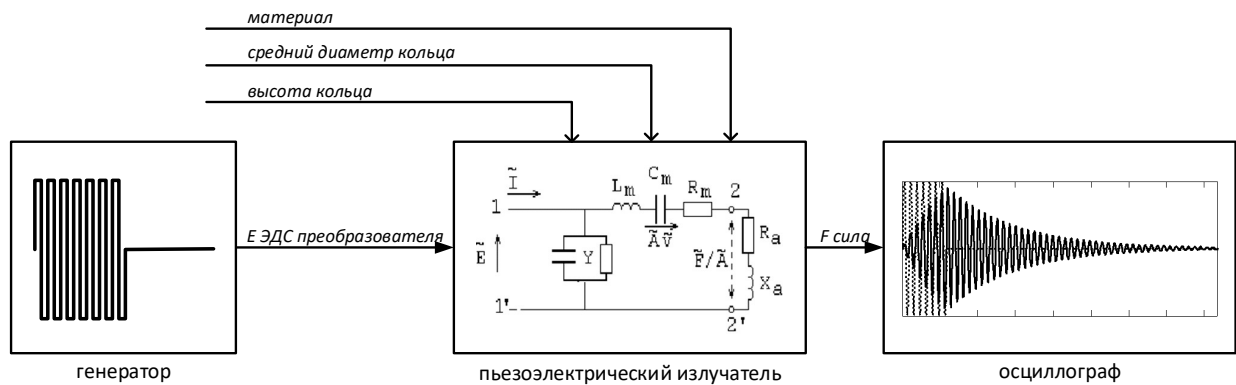


Рис. 3.2. Структурная схема замещения пьезоэлектрического излучателя

Параметры схемы замещения могут быть определены теоретически, исходя из физического смысла каждого из них. Кроме того, они могут быть определены подбором, исходя из амплитудофазочастотной характеристики, которая снимается косвенным методом, поскольку выход является механическим, а не электрическим.

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

Рассмотрим схему на рисунке 2.4. 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.

С использованием данной схемы замещения были построены частотные характеристики кольца, работающего в режимах приемника и излучателя, и эти характеристики были использованы для моделирования анемометрического канала с учетом свойств пьезопреобразователей.

На рисунке 3.3 приведены графики АЧХ и ФЧХ излучателя для реального пьезокерамического преобразователя. На графиках видно практически полное совпадение реальных и смоделированных характеристик. Пьезоэлектрический излучатель является полосовым фильтром. Он характеризуется частотами резонанса, антирезонанса, добротностью.

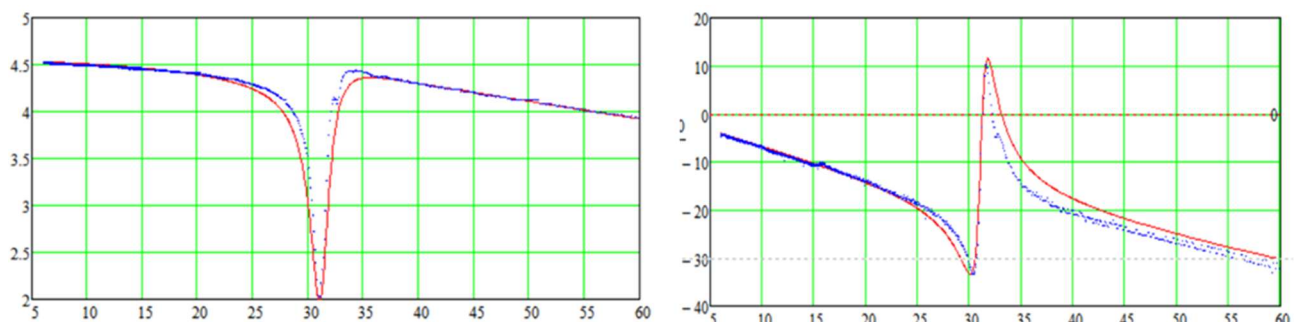


Рис. 3.3. АЧХ и ФЧХ излучателя

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

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.

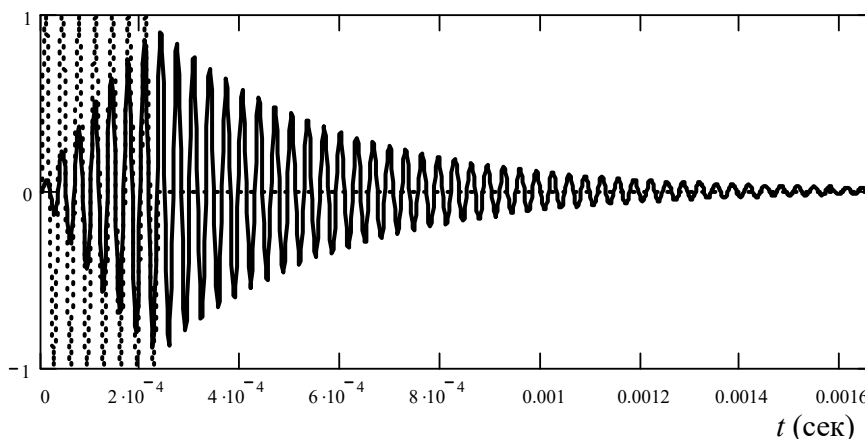


Рис. 3.4. Зависимости сигнала на входе (пунктирная линия) и выходе (сплошная линия) электроакустического излучателя от времени.

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.

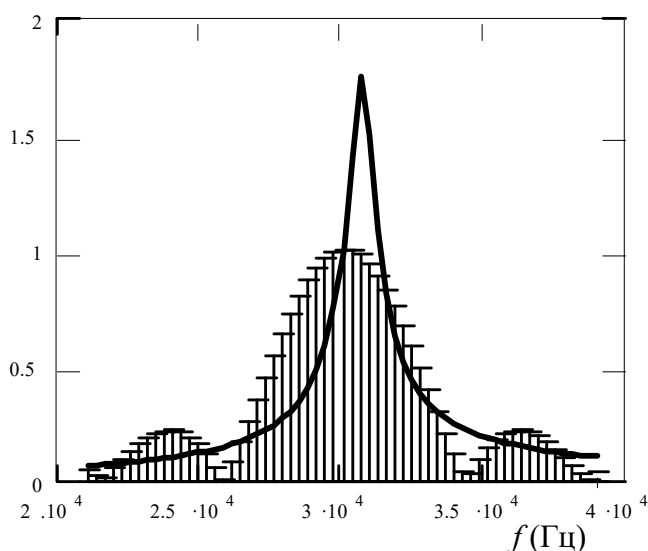


Рис. 3.5. Амплитудный спектр сигнала на входе и АЧХ излучающего преобразователя (сплошная линия)

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.

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. 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.

По аналогии с излучателем построена электрическая схема замещения приёмного преобразователя. Схема замещения приемного преобразователя показана на рис. 2.4.

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 .

Этот параметр является входным для третьего блока модели (см. рис.2.4). Выходным параметром является напряжение на обкладках преобразователя – E .

На рис.3.6. представлена структурная схема пьезоэлектрического приёмника.

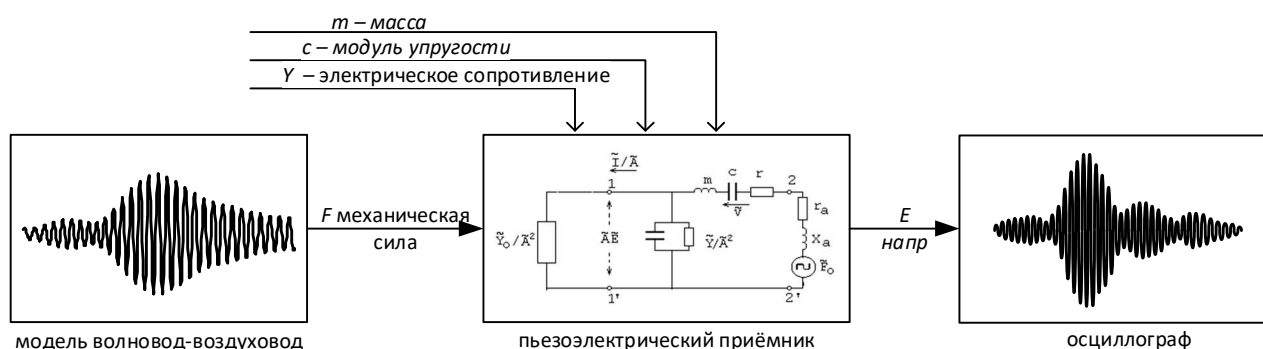


Рис. 3.6. Структурная схема замещения пьезоэлектрического приёмника

Здесь приёмное кольцо (рис.3.7) тоже обладает резонансными свойствами, при определенном радиусе, называемом антирезонансом – он смещён относительно резонанса излучателя – 31 КГц при резонансе 30 КГц, возможно работать только в узком диапазоне частот вблизи антирезонанса.

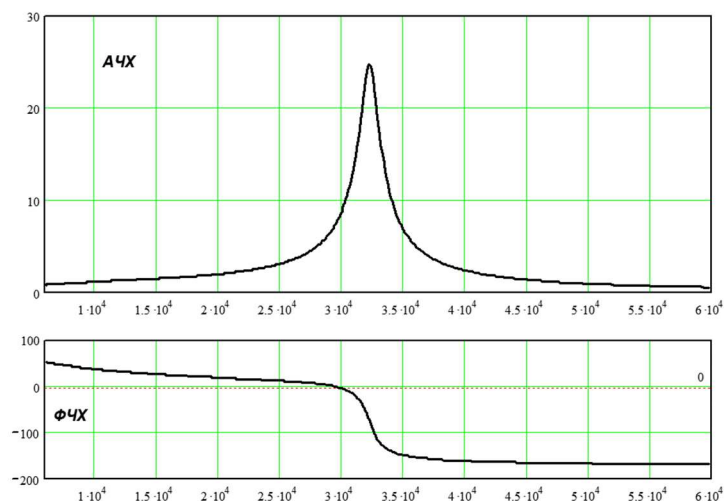


Рис.3.7. АЧХ и ФЧХ приемника

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

Анемометрический канал представлен на рис. 3.8. в виде модели распространения акустического сигнала внутри волновода-воздуховода с учётом геометрических размеров датчика и параметров окружающей среды.

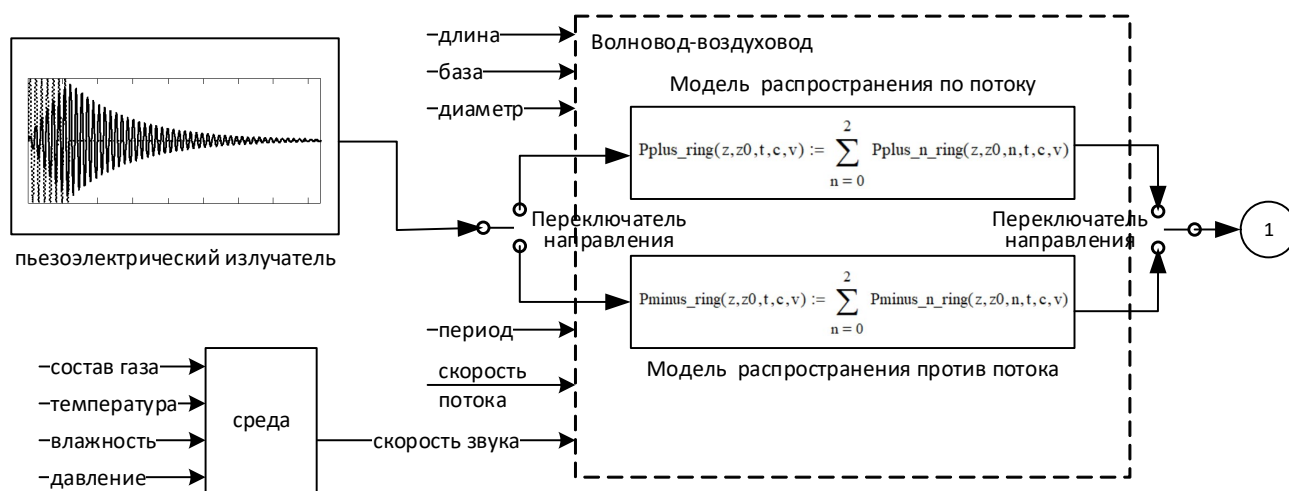


Рис. 3.8. Структурная схема замещения волновода-воздуховода

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.

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

В модели учитываются c – скорость звука среды, t – температура среды, n – количество импульсов в излучаемом сигнале, z – длина датчика, $z0$ – расстояние между кольцами, a – радиус канала, ω – частота излучаемого сигнала, v – скорость потока. Для распространения сигнала по потоку выражение имеет вид:

$$P_{plus_n}(z, z0, n, t, c, v) := \sum_{nn = Nom - 30}^{Nom + 30} \frac{2 \cdot v0 \cdot \rho \cdot (\omega0 \cdot nn + v \cdot sp(\bullet)) \cdot \sin\left(\frac{sp(\bullet) \cdot h}{2}\right) \cdot (\exp(i \cdot sp(\bullet) \cdot z) \cdot \exp(-i \cdot sp(\bullet) \cdot z0) \cdot \exp(i \cdot \omega0 \cdot nn \cdot t) \cdot C(nn))}{sp(\bullet) \cdot \text{sq}\left[\left(\frac{\omega0 \cdot nn}{c} \cdot a\right)^2 - \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \cdot (\mu_n)^2\right]}$$

Для распространения сигнала против потока:

$$P_{minus_n}(z, z0, n, t, c, v) := \sum_{nn = Nom - 30}^{Nom + 30} \frac{2 \cdot v0 \cdot \rho \cdot (\omega0 \cdot nn + v \cdot sn(\bullet)) \cdot \sin\left(\frac{sn(\bullet) \cdot h}{2}\right) \cdot (\exp(i \cdot sn(\bullet) \cdot z) \cdot \exp(-i \cdot sn(\bullet) \cdot z0) \cdot \exp(i \cdot \omega0 \cdot nn \cdot t) \cdot C(nn))}{sn(\bullet) \cdot \text{sq}\left[\left(\frac{\omega0 \cdot nn}{c} \cdot a\right)^2 - \left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \cdot (\mu_n)^2\right]}$$

Где волновые числа для распространения в положительном и отрицательном направлении:

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

В **четвёртой главе** показаны примеры применения АСНИ для различных ситуаций. Так же продемонстрированы возможности отдельных блоков для исследования влияния различных параметров на измерительный тракт.

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.

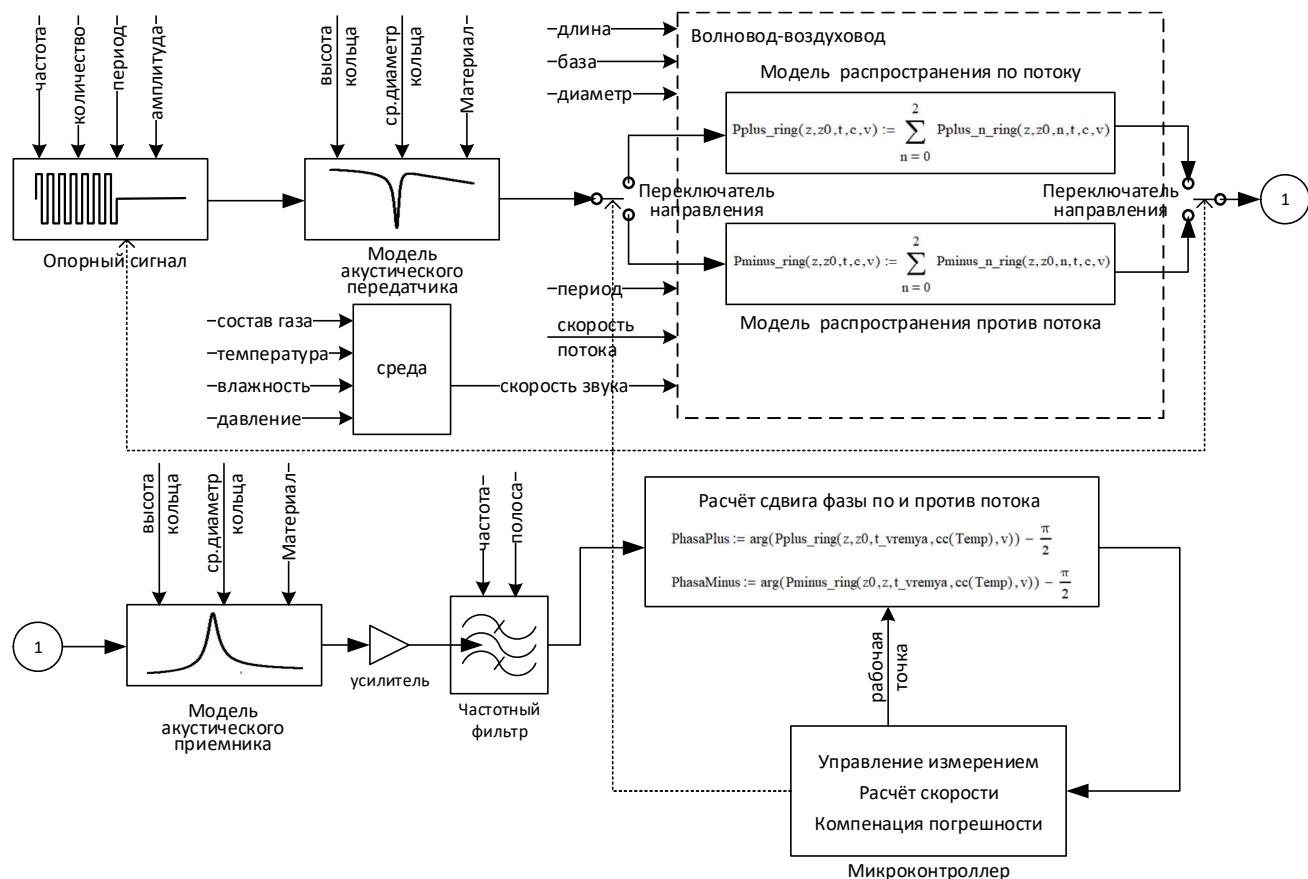


Рис. 4.1. Функциональная схема разработанной системы управления

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 и рис.4.3 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.

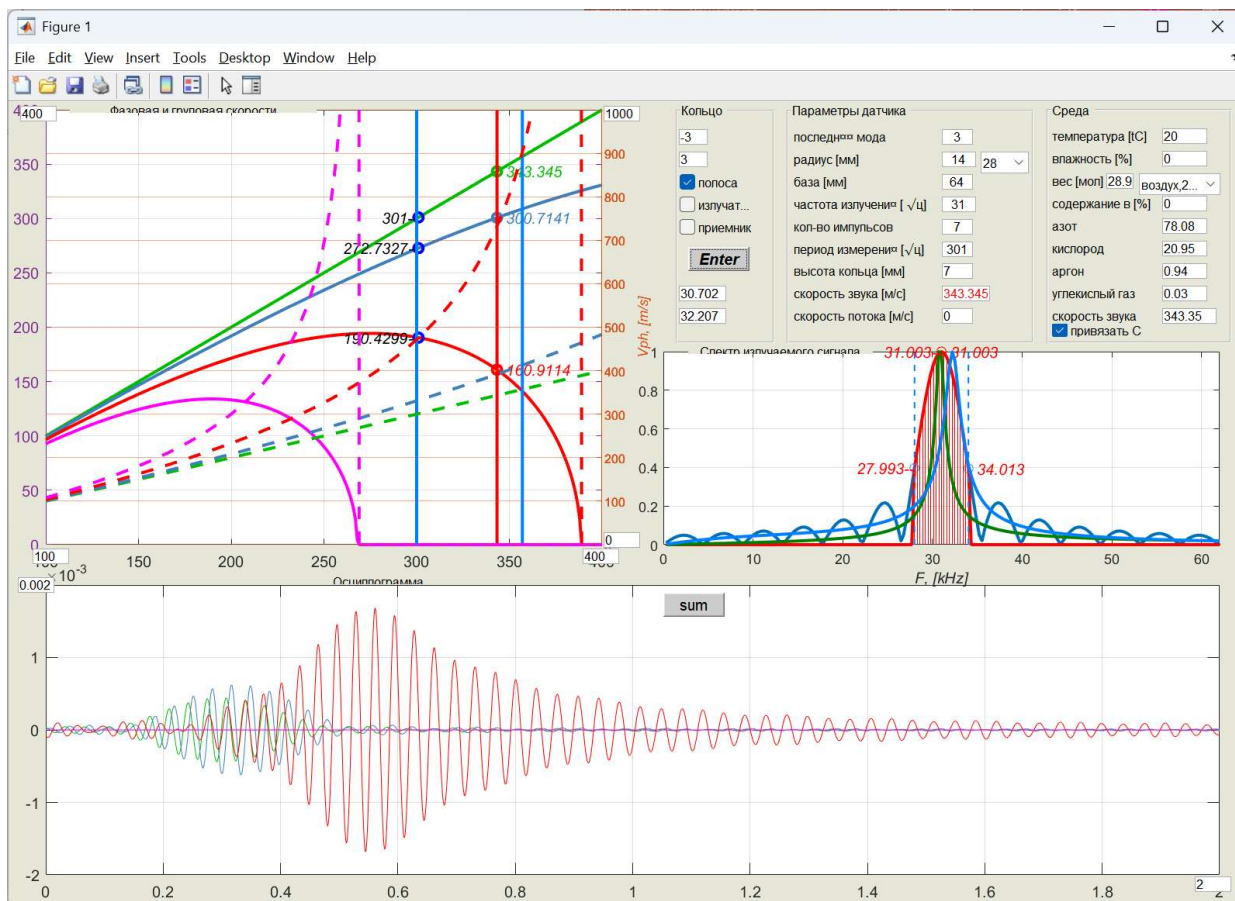


Рис. 4.2. Интерфейс управления АСНИ на примере работы в воздушной среде

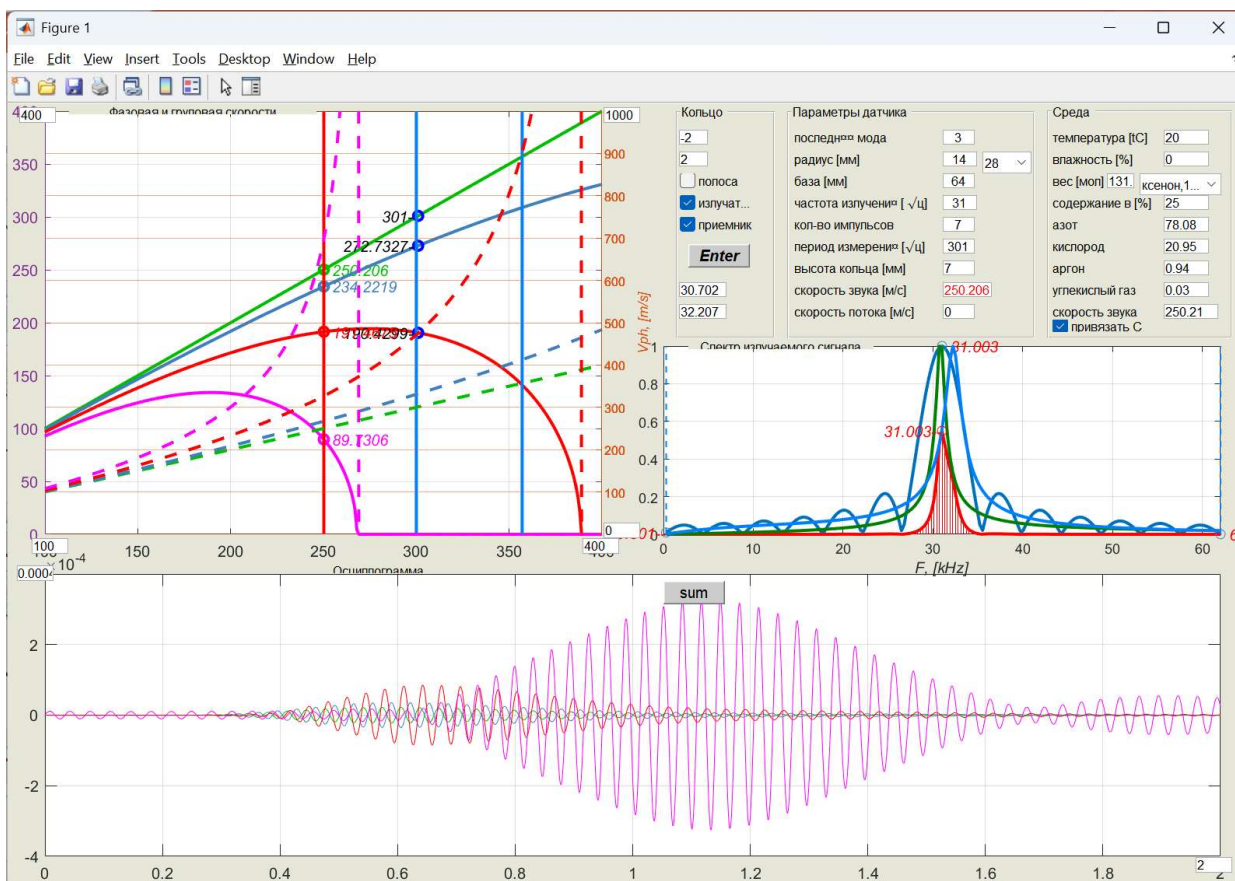


Рис. 4.3. Интерфейс управления АСНИ на примере работы в ксеноновой среде

Например, на рис.4.2 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.

На рис.4.3 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.

При помощи параметров, представленных на рисунке 4.4 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. 4.4. 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. 4.5.

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.

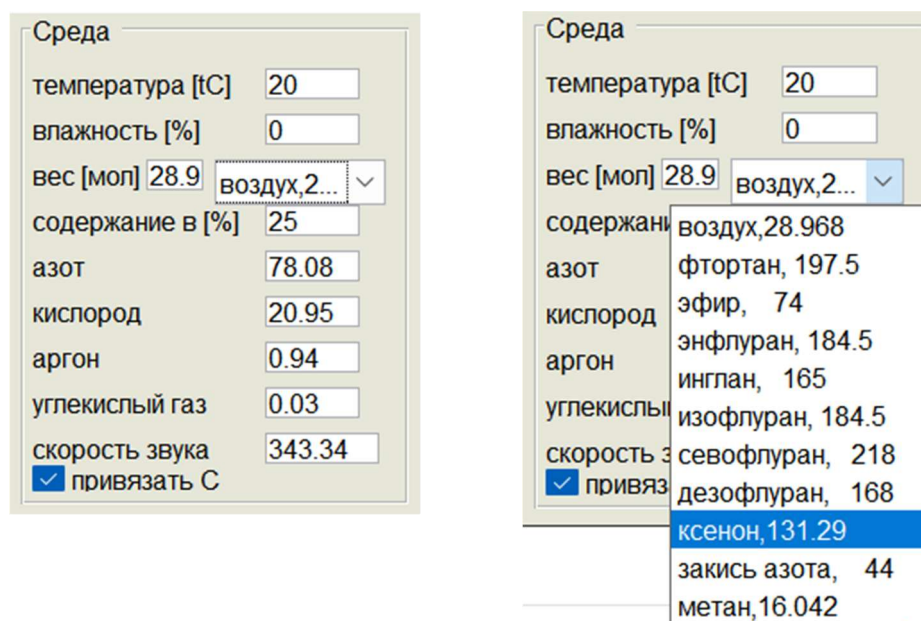


Рис. 4.5. Настройка рабочих параметров датчика

На рис. 4.6 показан интерфейс выбора резонансных свойств излучателя и приёмника.

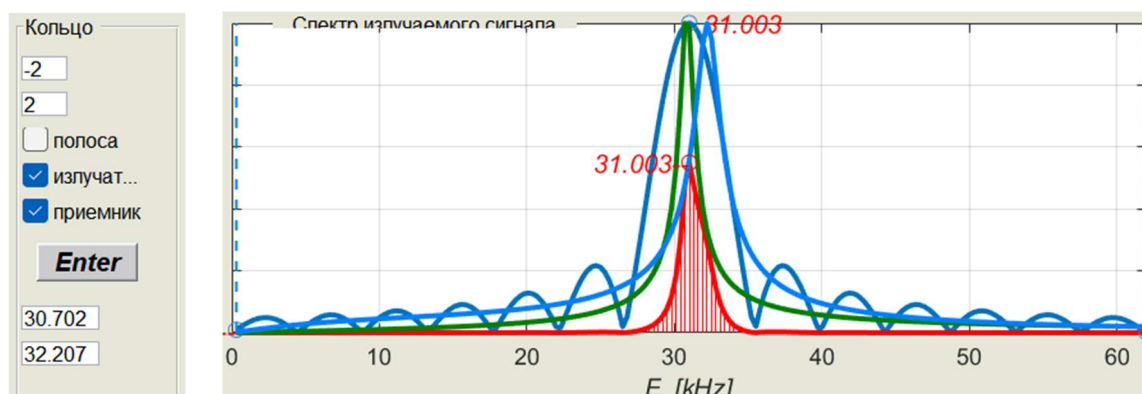


Рис. 4.6. Настройка полосы пропускания излучателя и приёмника

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.

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.

В результате исследования влияния температуры на резонансные характеристики колец получили следующие данные. На рис. 4.7 показана зависимость резонанса от температуры.

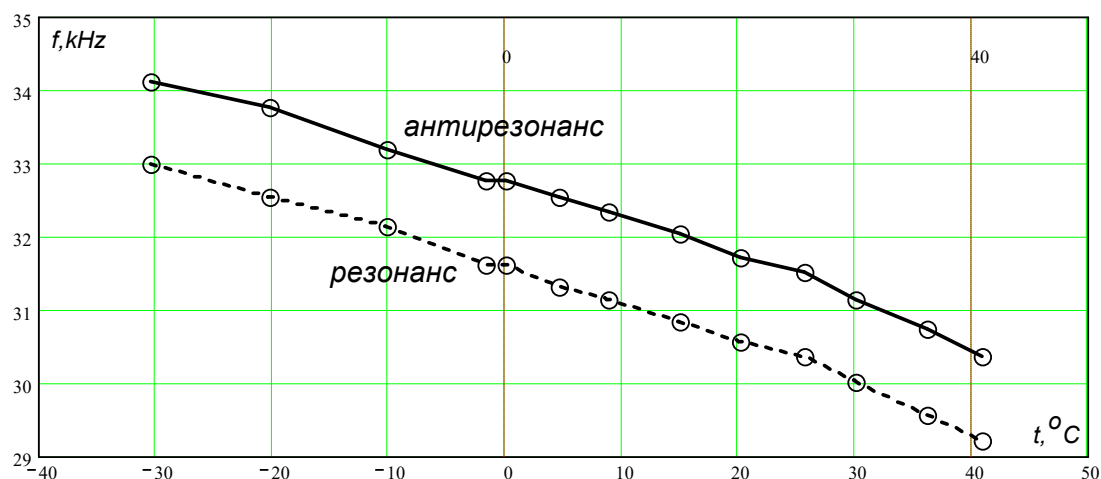


Рис. 4.7. Зависимость частоты резонанса и антирезонанса от температуры.

При помощи разработанной АСНИ промоделируем влияние частоты резонанса на излучаемый сигнал.

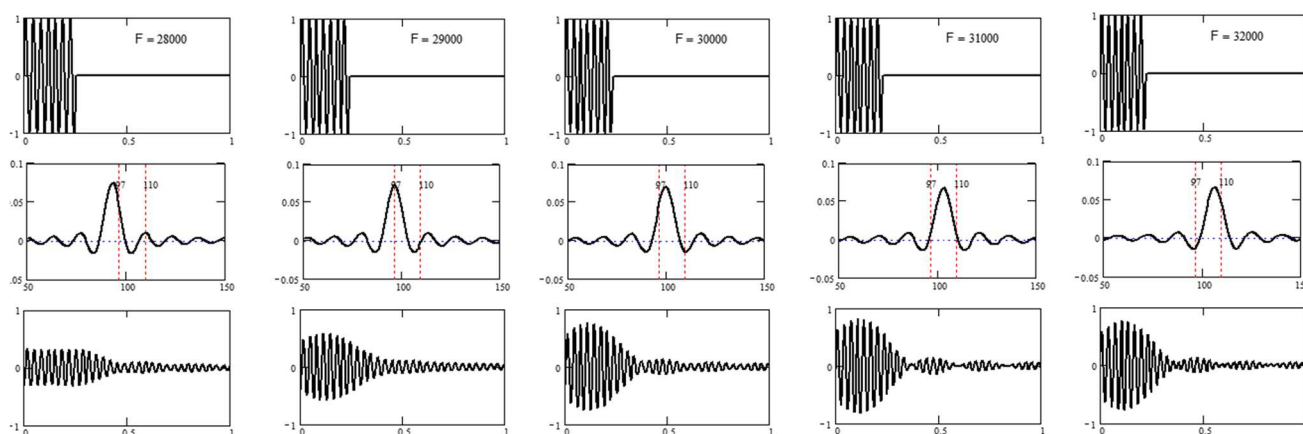


Рис 4.8. Изменение формы сигнала при его электромеханическом преобразовании

На рис. 4.8 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. 4.8 28-32 КГц).

В зависимости от частоты заполнения спектр импульса будет смещаться относительно полосы пропускания преобразователя, которая в данной модели привязана к номеру моды, поскольку частота основной гармоники, 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.

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

- частоте излучения, которая связана с диаметром волнового канала и средним диаметром 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. 4.9 показано, как влияет количество импульсов в пачке на форму излучаемого сигнала. Построены графики аналогичные рис. 4.8, 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.

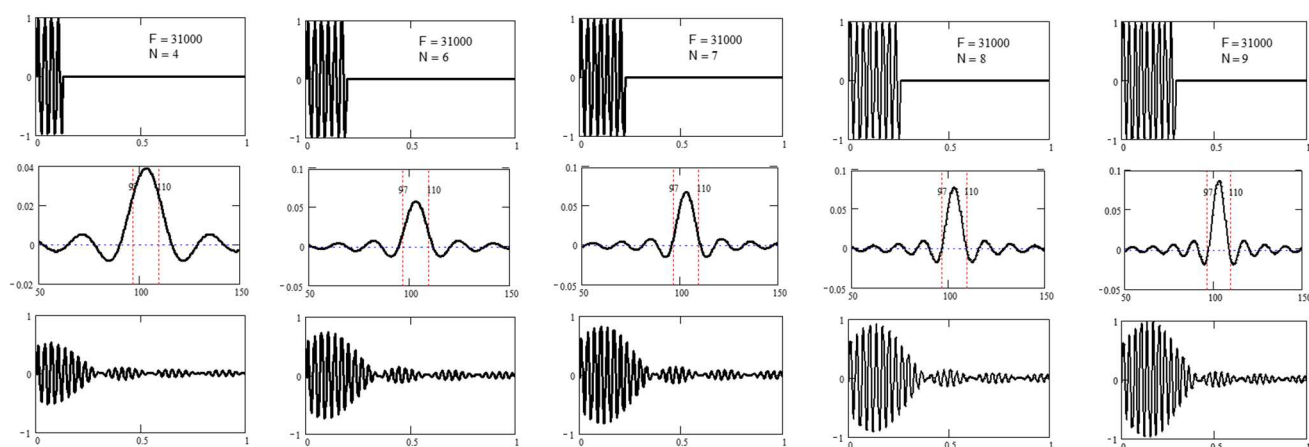


Рис 4.9. Влияние количества импульсов в пачке на форму излучаемого сигнала

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 количества периодов частоты заполнения в пачке.

АСНИ позволяет определять 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;

Помимо получения расчётных величин, можно симулировать отдельные элементы системы – смотреть зависимости между параметрами и осциллограммы на приёмном преобразователе.

Разработанный инструмент – автоматизированная система исследования сокращает время на моделирование и конструирование, приборов с заданными характеристиками, а также позволяет избегать ошибок при проектировании и снизить производственные затраты.

В качестве технического обеспечения для контроля и обработки данных, полученных в результате экспериментов, использовались стандартные средства измерения в том числе климатокамера КТК-800 и специальные стенды для проведения экспериментов.

На рисунке 4.10 представлен стенд для исследования спирометров. Он состоит из источников воздушного потока, таких как компрессор для атмосферного воздуха и баллона с сжиженным газом, ресивера для смешивания газов, вольюмо-спирометра для определения объёма расходуемого газа, микроманометр для определения расхода газа. Так же в установку входят различные измерительные устройства, такие как осциллограф, манометр, барометр, гигрометр, а также блок питания и компьютер для управления и записи данных эксперимента.



Рис 4.10. Стенд для исследования спирометров

Пятая глава посвящена практической реализации импульсного метода измерения акустического анемометра/спирометра и погрешностям, возникающим в этом методе.

Представлена структурная схема прибора и блок схема алгоритма работы импульсного метода измерения. В «приложении Д» представлен интерфейс программы взаимодействия с прибором при его настройке и мониторинге.

Оценена погрешность метода измерения по сравнению с фазовым методом измерения.

Проанализированы возможные погрешности измерения, вызванные представленным методом измерения и способы борьбы с ними. Рассмотрены динамические характеристики нового метода измерения, основанного на разделении распространения разных мод акустических колебаний в анемометрическом канале.

В конце пятой главы приведены различные примеры реализации акустических анемометров, созданных при помощи разработанной АСНИ (Приложение Г).

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 выводы, научные и практические результаты, полученные в работе:

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

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

3. 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.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ:

Научные работы в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России.

1. Шкундин С.З. Буянов С.И., Румянцева В.А. Оценка влияния состава контролируемого потока на погрешность акустического анемометра (статья) / Горный информативно-аналитический бюллетень. -М: МГГУ, №10, 2000, с. 181-182.

2. Шкундин С.З. Буянов С.И., Румянцева В.А. Исследование распространения акустического импульса в цилиндрическом волноводе с движущимся воздушным потоком (статья) / М: “Научноёмкие технологии”, №1, 2002

3. 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.

4. Степанян И.В., Карпишук А.В., Буянов С.И. Информационная система спирометрического анализа / Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 9. С. 297-303.

5. С.З Шкундин, Буянов С.И., А.А.Жердев. Совершенствование акустического спирометра. / Препринт, М, изд «Горная книга». 2011

6. 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.

7. С.З. Шкундин, Буянов С.И., Румянцева В.А., Стучилин В.В. Измеритель дебита метана в подземных дегазационных скважинах / Горный информационно-аналитического бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – №1. – С. 504–511.

8. С.З. Шкундин, Буянов С.И., Воронцов А.В., Стучилин В.В. Автоматизация метрологического обеспечения безопасности угольных шахт РФ / Горный информационно-аналитического бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №1. – С. 333–341.

9. 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.

10.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

11.Буянов С.И. Уменьшение погрешности измерения импульсного режима акустического спирометра / журнал Научно-технический вестник Поволжья №6 2025, стр. 159.

12.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.

13.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

В патентах

14.Патент на изобретение №2284015 «Способ измерения расхода и устройство для его осуществления».

Scopus

15.Buyanov S., Rumyantseva V.A. Model development for physical processes in sensing device for CAD system of sonic anemometer / Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021, (5), стр. 169–178 Q2 (Scopus)

Труды конференции

16.Буянов С.И., Румянцева В.А. Пути компенсации дополнительной погрешности акустического анемометра, связанной с изменением состава контролируемого

потока (доклад «Неделя горняка 2006») / Горный информативно-аналитический бюллетень. -М: МГГУ, №6, 2006, с. 330-339.

17.Буянов С.И., Румянцева В.А. Датчик скорости звука для системы измерения скорости газовой воздушного потока с изменяющимся составом. (доклад «Неделя горняка 2007») / Горный информативно-аналитический бюллетень. -М: МГГУ, №6, 2007, с. 244-253.

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

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

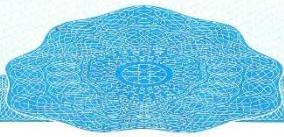


В.Н.Крутиков
27 " 02 " 2015 г.

Продлено до
" " г.

Заместитель
Руководителя

" " 20 г.



380384

Приложение Г. Примеры реализации акустических анемометров, созданных при помощи разработанной АСНИ.

При помощи разработанной АСНИ были созданы ряд уникальных по своим характеристикам приборов.

Прибор АПА-1 (акустический портативный анемометр), который успешно прошел метрологические и шахтные испытания. Внешний вид прибора представлен на рис. 1а.

Так же был создан прототип спирометра, изображённого на рис. 1б.

На рис. 2 и рис. 3 приведён пример аэродинамических установок А-02в и А-02з.



Рис.1. а) - Анемометр АПА-1/3
б) - спирометр



Рис. 2. Прямоточная аэродинамическая установка А-02в.



Рис. 3. Установка аэродинамическая замкнутого типа А-02з

Приложение Д. 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.

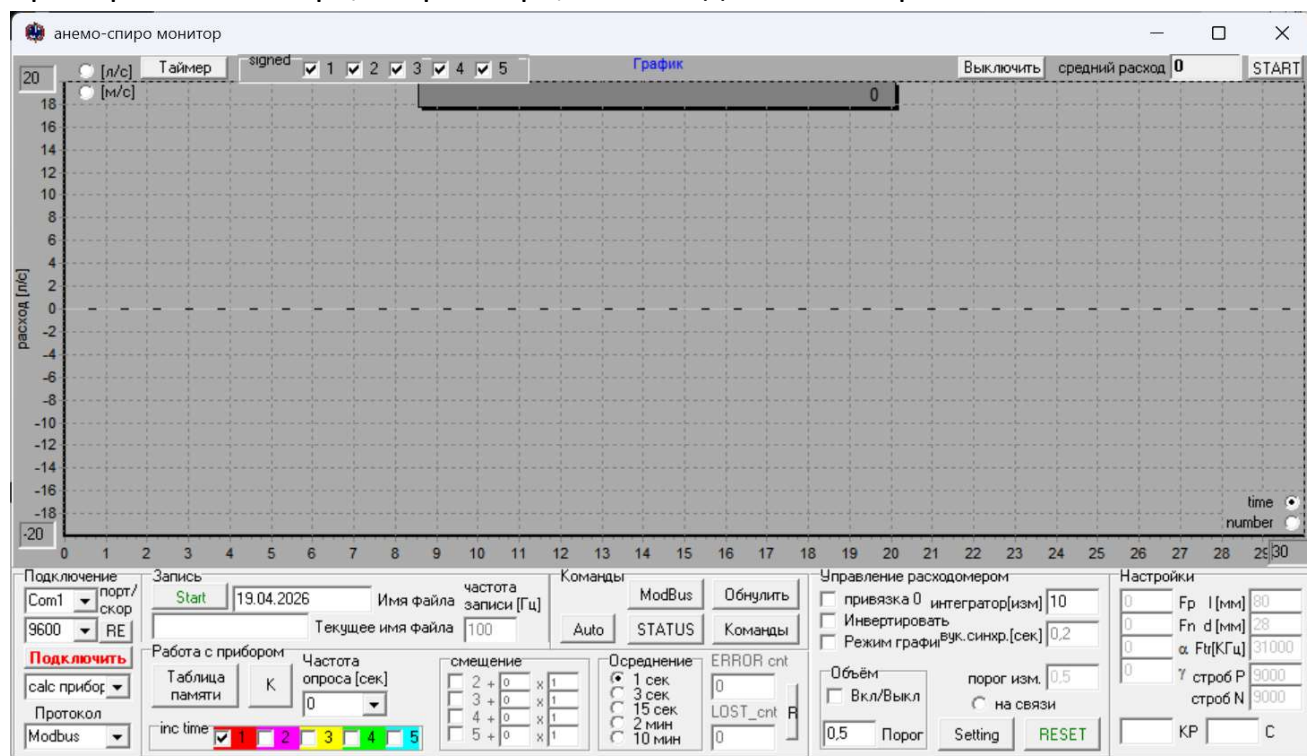
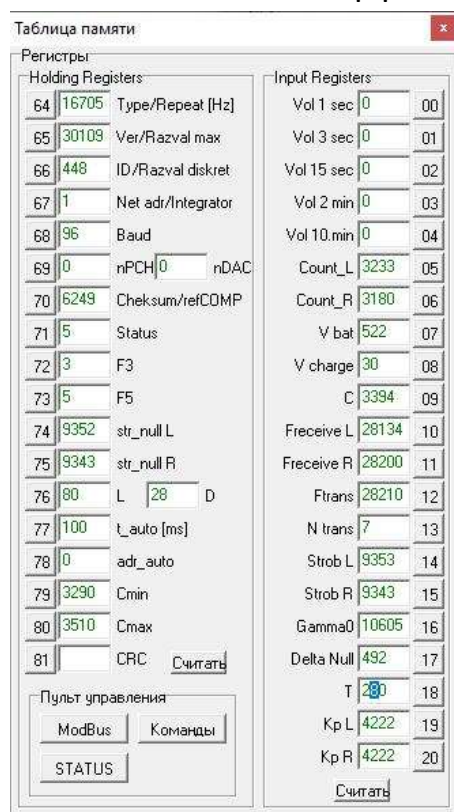
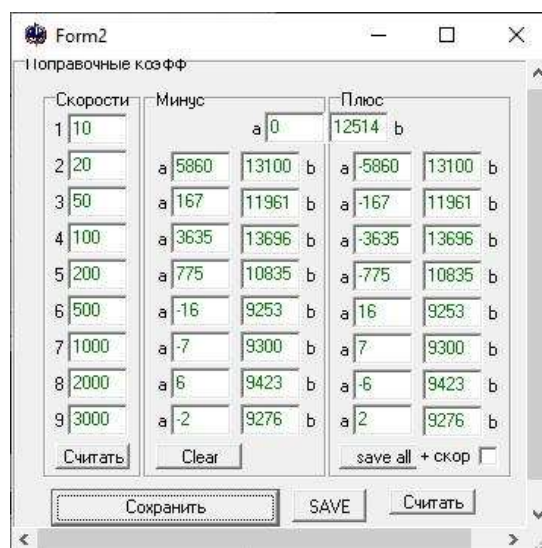


Рис. 1. Интерфейс программы работы с датчиком



а)



б)

Рис. 2. а) Настройка параметров импульсного метода измерения.
б) Калибровка прибора.