

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

АКТИВНОЕ ГАШЕНИЕ ШУМА В ТРУБОПРОВОДЕ

*Рекомендовано редакционно-издательской комиссией
по двигателям летательных аппаратов и энергомашиностроению
в качестве методических указаний*

САМАРА
Издательство Самарского университета
2017

Составитель: Т.Б. Миронова

Рецензент: канд. техн. наук, доц. Д. С. Лежин

Миронова Т.Б.

Активное гашение шума в трубопроводе: метод. указания / сост.
Т.Б. Миронова, Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. – 12 с.

Рассмотрены теоретические основы активных методов гашения шума. Дано описание оборудования National Instruments (NI) необходимого для проведения экспериментальных исследований. Изложены методы измерения акустических характеристик трубопровода до и после включения системы активного гашения. Подробно описана методика составления программы в LabVIEW для измерения акустических характеристик в системах с активным шумоподавлением.

Методические рекомендации предназначены для магистрантов.

Разработано на кафедре автоматических систем энергетических установок.

© Самарский университет, 2016

Содержание

Введение	4
1. Теоретические основы лабораторной работы	5
1.1 Классификация систем активного гашения	6
1.2 Алгоритм активного гашения шума	10
2. Программа для измерения акустических характеристик в системе с активным гашением шума	15
3. Экспериментальные исследования акустических характеристик в системе активного подавления шума в трубе.	17
3.1 Описание лабораторной установки	17
3.2 Порядок проведения измерений	20
4. Оформление результатов измерений и отчета	23
Контрольные вопросы	24
Список использованных источников	25

Введение

Существует большое количество способов гашения вибрации: воздействие на источник возбуждения, отстройка от режима резонанса, вибродемпфирование, вибропоглощение, виброизоляция. Активные методы гашения вибрации обладают рядом преимуществ по отношению к ним. Установка таких систем не требует вмешательства в конструкцию объекта гашения, что делает их универсальными в применении. Активные системы гашения вибрации многоразовые. Демонтаж и сборка производится одним человеком за короткий промежуток времени, зависящий от сложности системы. Активная система гашения вибрации управляется программно, это допускает возможность использования одной и той же системы на объектах с различными габаритами и параметрами гашения. Самым главным же достоинством таких систем является возможность гашения низкочастотных колебаний без увеличения габаритов самой системы. Чтобы эффективно гасить шум на низких частотах; глушители, вставки из звукоизолирующих материалов должны быть массивными и иметь большие габариты, сравнимые с длиной волны. Кроме того, пассивные средства создают дополнительное аэродинамическое сопротивление.

В настоящем методическом указании изложен метод определения акустических характеристик в трубе с активным шумоподавлением до и после включения системы.

Представлен алгоритм работы активной системы шумоподавления с помощью LMS фильтрации акустических сигналов.

1. Теоретические основы лабораторной работы

Принцип работы систем активного гашения виброакустических сигналов основан на введении дополнительного источника колебаний, который в результате интерференции с основным источником снижает величину сигнала. Первоначальный сигнал снимается датчиком или микрофоном, его выходное напряжение усиливается и подаётся в контроллер, который вырабатывает напряжение для подачи компенсирующего сигнала на пьезоактуатор или динамик соответственно. Сигналы интерферируют, в результате, происходит значительное снижение вибрации и шума.

Идея активного подавления (компенсации) шума и вибрации появилась еще в 30-х годах прошлого столетия и была основана на открытии в начале XVIII века Томасом Юнгом интерференции звука.

Общепризнанным родоначальником метода активной компенсации считается немецкий инженер Поль Луэг (Paul Lueg) [1] который в 1936 году, получил патент [2], излагающий основной принцип подавления исходной звуковой волны её копией, сдвинутой на 180 градусов. Такой эффект в иностранной литературе называется деструктивной интерференцией. Долгие годы технология не могла быть реализована потому, что на первый взгляд простая идея потребовала бурного развития электроники, сигнальных процессоров, эффективных и недорогих электроакустических компонент, а именно: усилителей класса D, громкоговорителей с недорогими, но эффективными постоянными магнитами, надежных и недорогих электретных микрофонов.

Активное снижение шума основано на следующем принципе. Источник акустических колебаний (громкоговоритель) генерирует колебания в противофазе с исходной волной. В результате их наложения происходит гашение колебаний. Если причиной шума является вибрация объекта, то в данном случае говорят об активных методах управления структурной вибрацией. Данный метод заключается в том, что источник вибрации

(вторичный излучатель) генерирует свое вибрационное поле, действующее на вибрационное поле объекта (первичного излучателя) и тем самым, воздействует на излучение этим объектом шума. Разделение систем активного гашения на данные направления является несколько произвольным, т.к. оба эти направления занимают снижением шума и вибрации технических средств.

1.1 Классификация систем активного гашения

Классификация систем активного гашения (компенсации) может вестись по различным признакам. Однако достаточно удобной, и к тому же самой распространенной является классификация по конструктивному исполнению. Системы активного гашения подразделяются на адаптивные замкнутые (обратносвязные (feedback control)) системы, адаптивные разомкнутые (переднесвязные (feedforward control)), комбинированные (обратносвязные-переднесвязные (feedforward and feedback control)) и неадаптивные [3, 4].

Адаптивные замкнутые системы, реализующие принцип Гюйгенса-Малюжинца, содержат приемники и излучатели монопольного и дипольного типов, обладающие свойством однонаправленного приема или излучения.

Техническая реализация таких систем предполагает: непрерывное распределение приемников и излучателей, т.е. бесконечное их число; связь каждого приемника и излучателя со всеми другими приемниками и излучателями; полное отсутствие обратной связи между приемниками и излучателями.

Обратносвязанная компенсация используется в тех случаях, когда отсутствует возможность измерения характеристик возмущающего поля до того, как возмущения дойдут до области в которой необходима компенсация. Обратносвязанные системы отличаются от переднесвязанных систем методом получения заглушающего сигнала. Если переднесвязанные системы основаны на некоторых предсказательных оценках поступающего нежелательного воздействия для генерирования надлежащего заглушающего воздействия, то

обратносвязанные системы имеют целью ослабление результирующих эффектов нежелательного воздействия, после того как оно прошло. Поэтому обратносвязанные системы наиболее подходят для снижения переходных характеристик систем, в то время как переднесвязанные системы лучше использовать для снижения характеристик установившегося (устойчивого) состояния. В структурах и акустических пространствах обратносвязанные контроллеры эффективно дополняют модальное демпфирование и в канальной системе, показанной на рисунке 1.1, обратносвязанный контроллер отражает поступающие волны путем изменения импеданса стенки канала на громкоговорителе антизвука.

Широкое применение получили разновидности адаптивных замкнутых систем, работающие не в распространяющихся по определенным направлениям волнах, а в установившихся полях по минимизации потенциальной энергии в некоторых областях помещений. [4].

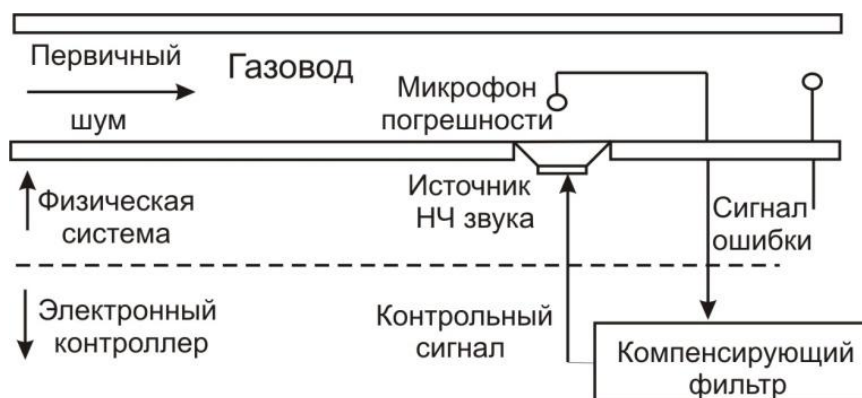


Рисунок 1.1 – Обратносвязная система активной компенсации плоской звуковой волны в канале

В области структурной вибрации использование обратносвязанной компенсации довольно распространено из-за наличия возможности сглаживания вибрации без необходимости предварительного измерения опорного сигнала.

Для обратносвязанных систем исполнение физической системы является важной частью дизайна контроллера. Также важны характеристики источника, который используется для компенсации, по сравнению с акустической (для компенсации звука) или структурной (для компенсации вибрации) длиной волны на низшей частоте, подвергаемой компенсации.

Адаптивные разомкнутые системы стали развиваться как системы снижения шума, как правило, от одного источника, в узких дискретных полосах частот. Разомкнутость в таких системах понимается как разомкнутость по управляющему параметру и замкнутость по специальному сигналу управления.

На управляемые возбудители (вибраторы или громкоговорители) подается гармонический сигнал с датчика оборотов, а фаза и амплитуда этого сигнала регулируются через микропроцессор приемниками (вибродатчиками или микрофонами). В общем случае основной формой системы компенсации является такая, при которой выход системы не оказывает влияния на контрольный вход. Такая система называется разомкнутой системой компенсации. Блоковая диаграмма типичной разомкнутой системы компенсации показана на рисунке 1.2, где желаемый выходной сигнал, так называемый опорный вход, подается на контроллер для формирования компенсирующего (заглушающего) входа в динамическую систему (или в установку).



Рисунок 1.2 – Разомкнутая система компенсации

Переднесвязанные контроллеры (все они являются цифровыми) основаны на доступности опорного сигнала, который является мерой поступающего нежелательного воздействия (шум или вибрация). Этот сигнал должен быть

получен контроллером за время, достаточное для того, чтобы можно было генерировать и передать в источник антизвука сигнал заглушения с необходимыми для получения эффекта компенсации нежелательного воздействия характеристиками. При этом опорный сигнал генерируется от нежелательного воздействия.

Цифровая переднесвязанная система компенсации, изображённая на рисунке 1.3, особенно эффективно осуществляет активную компенсацию дискретных тонов в канале, которые генерируются вентилятором (в этом случае тональные частоты могут быть равными частоте и ее гармоникам). В этом устройстве выходной сигнал тахометра синхронизирован с вращающимся валом вентилятора, генерирующего периодический первичный шум. Электронное устройство преобразует сигнал тахометра в комбинацию синусоид, которая обеспечивает снижение шума на основной частоте вращения вентилятора и кратных ей гармоник. Для того, чтобы генерировать сигнал, необходимый для компенсации нежелательного источника, опорный сигнал передаётся через цифровой фильтр для генерирования результирующего заглушающего сигнала, который в свою очередь подается на источник антизвука, а тот передает заглушающее воздействие в канал.

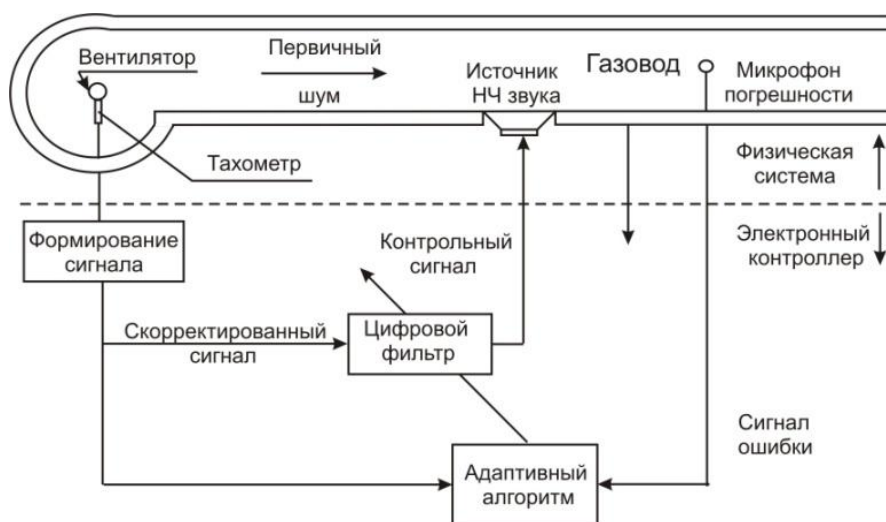


Рисунок 1.3 – Активная компенсация плоской звуковой волны в каналах с использованием переднесвязанных систем с сигналом тахометра для опорного ввода контроллера

Переднесвязанная система должна быть использована во всех случаях, когда можно получить необходимый опорный сигнал. Исполнение переднесвязанной системы обычно более совершенно, чем исполнение обратносвязанной. Во многих случаях невозможно достичь получения опорного сигнала. В таких случаях более эффективны системы обратносвязанной компенсации.

В ряде случаев, ввиду имеющихся недостатков применения переднесвязанных и обратносвязанных контроллеров, возникает необходимость использования комбинированных систем. Существует множество примеров практического применения, где гибридная компенсация оказывалась высокоэффективной. Например, объединение обратносвязанного активного демпфирования и переднесвязанного подавления вибрации. Привлекательной особенностью такого гибридного контроллера является то, что переднесвязанный и обратносвязанный контроллеры могут использовать один и тот же набор возбудителей и сенсоров.

Неадаптивные системы, т.е. системы, настроенные и работающие по заранее определенным постоянным параметрам, в основном интенсивно исследовались в ранние годы развития активного шумоглушения, а в последние годы встречаются очень редко. Неадаптивные контроллеры характеризуются фиксированными цифровыми фильтрами, параметры которых определяются путем использования анализа акустической системы или путем использования метода проб и погрешностей таким образом, чтобы сигнал на микрофоне погрешности сводился к минимуму.

1.2 Алгоритм активного гашения шума

Для систем активного гашения различного типа чаще всего используется широко распространенный алгоритм адаптивной фильтрации LMS, основанный

на методе наименьших квадратов и его модификация Filter-x LMS (FxLMS) [5-8].

Формула для описания данного алгоритма приведена в (1). Принцип действия алгоритма показан на рисунках 1.4-1.7. Сигнал $x(n)$ - это входной образцовый (опорный) сигнал, который рассматривается как известный шумовой сигнал на входе в transversal filter фильтр, который нужно погасить. Сигнал $d(n)$ - сигнал от источника шума измеряемый в месте положения источника антишума. Данный сигнал не измеряется а вычисляется с помощью коэффициентов фильтра $c(n)$. Разница между сигналами $d(n)$ и $y(n)$ есть сигнал ошибки $e(n)$, сигнал на выходе из трубы который должен быть близок к 0 (или погашенный сигнал). Сигнал ошибки необходим для вычисления коэффициентов фильтра $c(n+1)$, которые минимизирует ошибку на каждой итерации

$$c(n+1) = c(n) + \mu * e(n) * x(n) \quad (1.1)$$

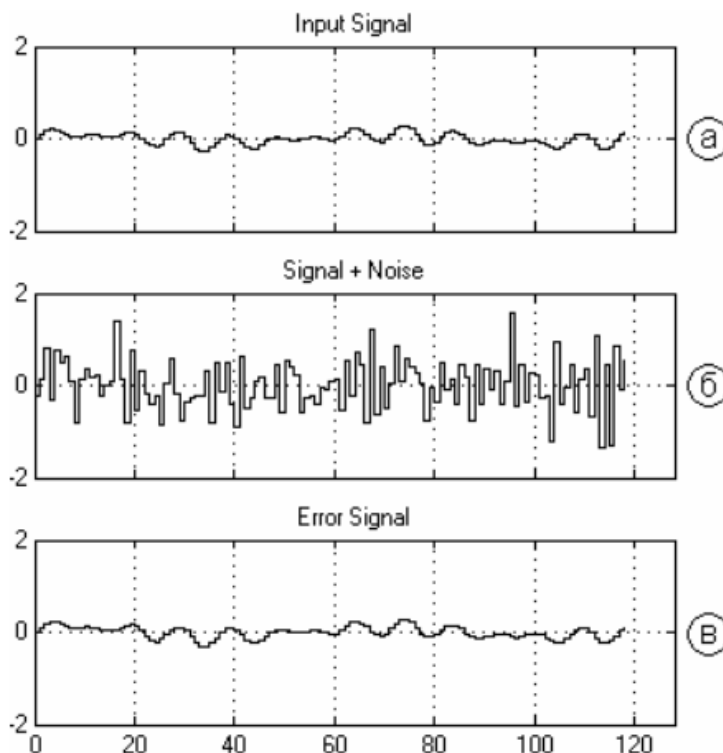


Рисунок 1.4 – Осциллограммы работы адаптивного фильтра
а – образцовый сигнал; б – зашумленный (измеренный) сигнал;
в – очищенный от шума искомый сигнал (сигнал ошибки)

Время сходимости LMS алгоритма зависит от шага μ - коэффициента адаптации. Чем он меньше, тем дольше время сходимости алгоритма. Если значение μ слишком большое алгоритм может никогда не сойтись. Коэффициент μ зависит от свойств исследуемой системы и сигнала $d(n)$.

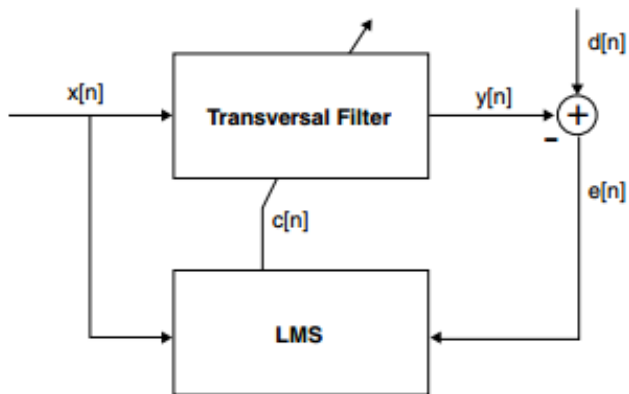


Рисунок 1.5 – Блок схема LMS алгоритма

Реализация LMS алгоритма показана на рисунке 3.2. Коэффициенты рассчитываются по формуле (1). Задержка (Delay) необходима для сравнения коэффициентов, вычисляемых на текущем шаге и коэффициентов, вычисляемых на следующем шаге. Величина задержки близка к величине сигнала.

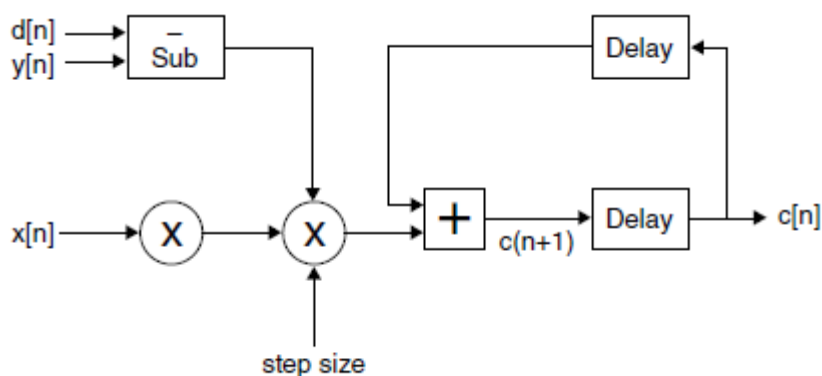


Рисунок 1.6 – Реализация LMS алгоритма

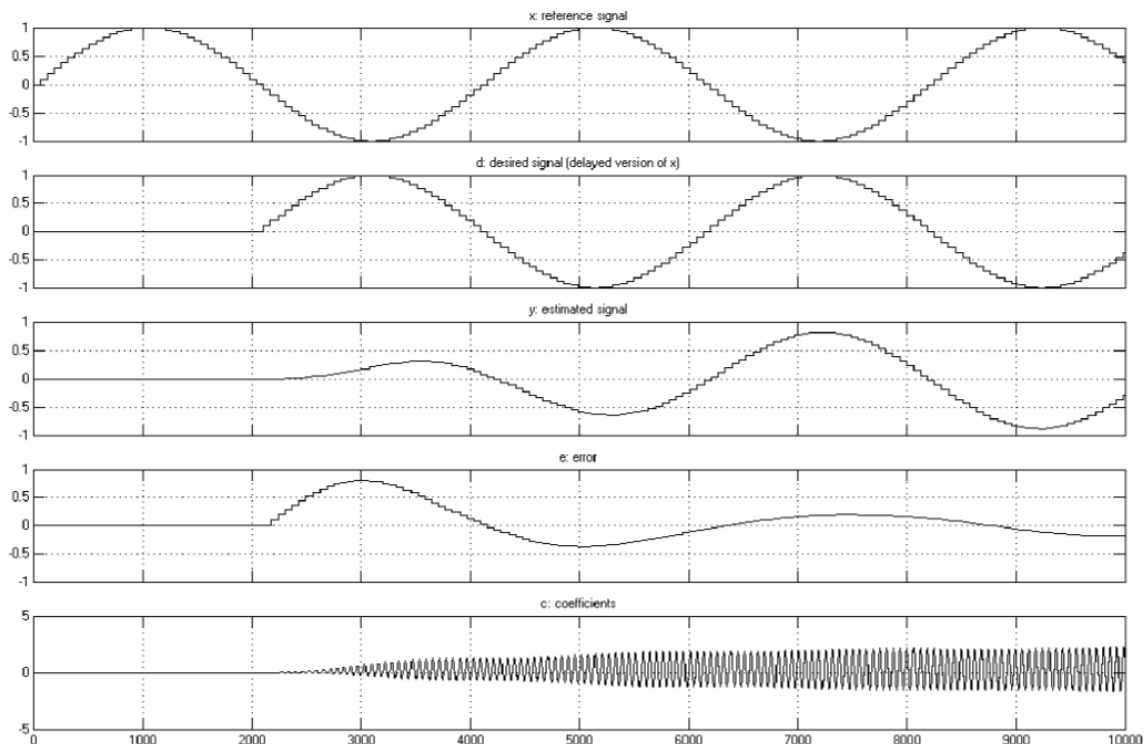
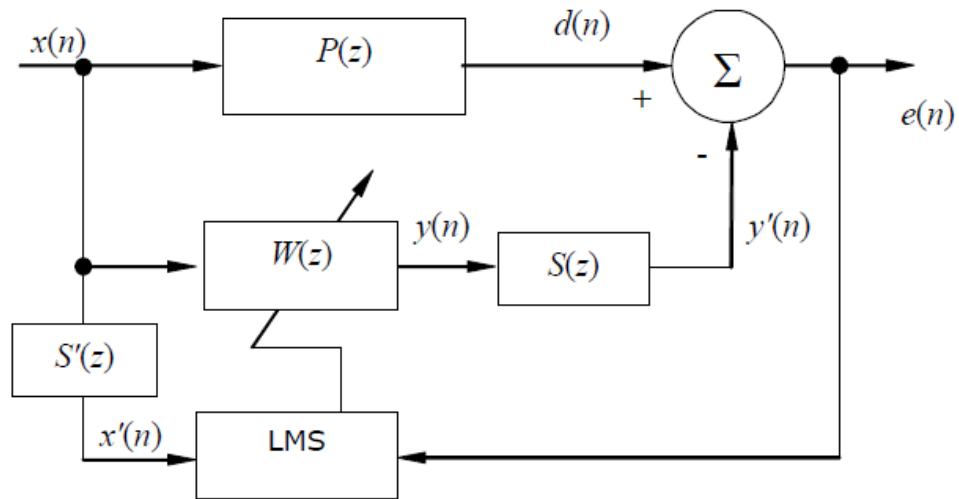


Рисунок 1.7 – Реализация алгоритма LMS с коэффициентом $\mu=0,2$

FxLMS алгоритм адаптивной цифровой фильтрации – практическая реализация с подавлением электроакустической обратной связи. Для обеспечения устойчивой работы алгоритма кроме оптимального выбора коэффициента сходимости μ следует также принять меры подавления положительной обратной связи «компенсирующий громкоговоритель - опорный микрофон.

На рисунке 1.8 представлена блок-схема алгоритм FxLMS. Отличительная особенность данного алгоритма от LMS алгоритма состоит в наличии дополнительного блока $S(z)$. Непосредственное применение алгоритма LMS без фильтрации опорного сигнала не позволяет обеспечить сходимость из-за наличия задержки от усилителя мощности и громкоговорителя. Дополнительный блок $S(z)$ позволяет компенсировать задержку опорного сигнала в электроакустическом тракте, обусловленную усилителем мощности и компенсирующем громкоговорителем.



$P(z)$ – путь распространения сигнала шума, $x(n)$ – опорный сигнал,
 $x'(n)$ – фильтрованный опорный сигнал, $d(n)$ – сигнал шума ,
 $e(n)$ – сигнал ошибки , $y(n)$ – компенсирующий сигнал (антишум),
 $S(z)$ – передаточная характеристика электроакустического тракта,
 $W(z)$ – адаптивный фильтр,
 LMS – алгоритм с минимизацией среднего квадрата ошибки

Рисунок 1.8 - Блок-схема алгоритма FxLMS

Для получения импульсной характеристики проводят ее измерение с использованием тестового сигнала типа белый шум или изменяющийся во времени гармонический сигнал. В дальнейшем характеристика $S(z)$ используется для фильтрации сигнала с опорного микрофона.

Алгоритм FxLMS относится к семейству алгоритмов адаптивной цифровой фильтрации с критерием минимума среднеквадратической ошибки разности компенсирующего сигнала и сигнала шума. Это может быть записано как

$$e(n) = \min |d(n) - y(n)|^2 \quad (1.2)$$

При этом изменение (адаптация) коэффициентов импульсной характеристики цифрового фильтра происходит согласно уравнению:

$$w(n+1) = w(n) + \mu \cdot e(n) x^*(n) \quad (1.3)$$

где μ - так называемый коэффициент адаптации цифрового фильтра. Обычно значения этого коэффициента меньше единицы и выбирается в пределах 0,3 - 0,0001 для обеспечения сходимости алгоритма.

Система, показанная на рисунке 1.9 реализует электроакустическую обратную связь «опорный микрофон – громкоговоритель» и позволяет получить значения $S(z)$ с применением тестового сигнала «белый шум».

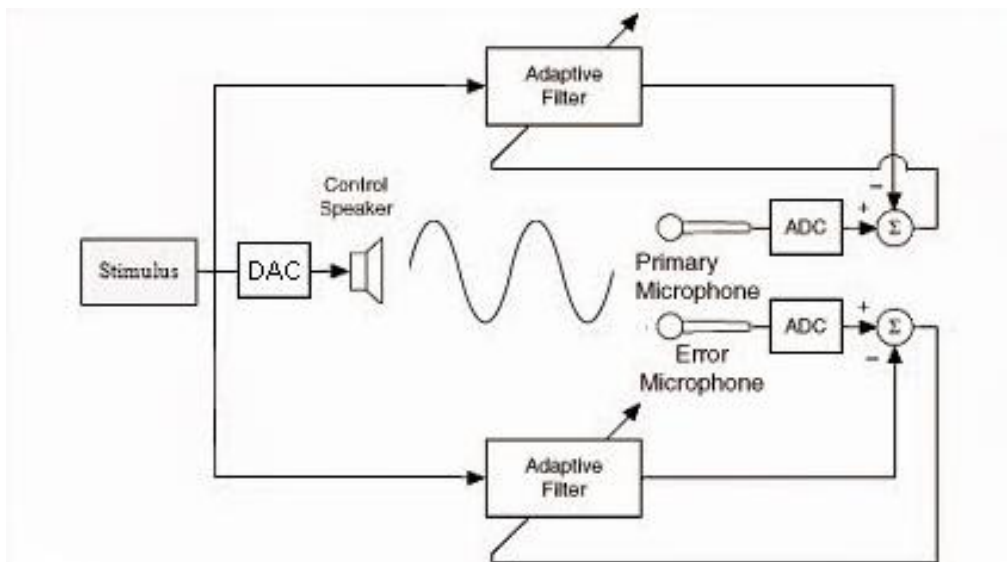


Рисунок 1.9 - Система активного гашения шума

2. Программа для измерения акустических характеристик в системе с активным гашением шума

Для программной реализации системы активного снижения шума был использован программный комплекс LabVIEW. Для реализации алгоритма гашения FxLMS используется стандартный алгоритм из библиотеки LabVIEW (рисунок 2.1-2.2), позволяющий проектировать систему активного подавления шума без написания программного кода.

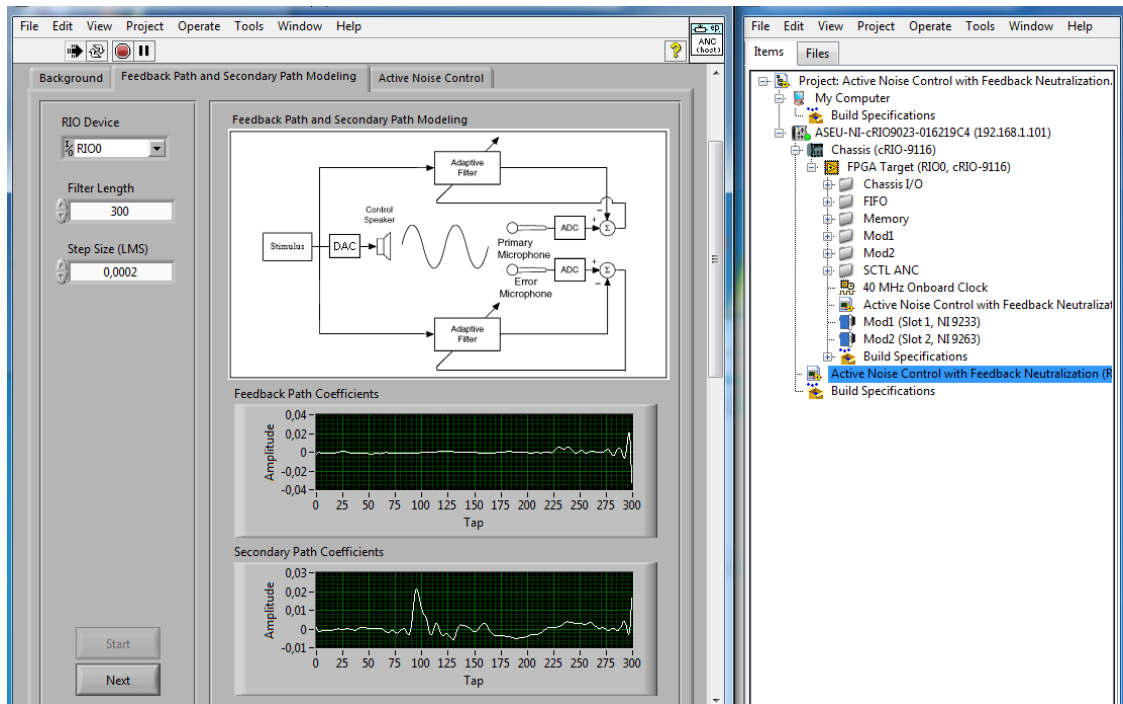


Рисунок 2.1 - Алгоритм из библиотеки LabVIEW

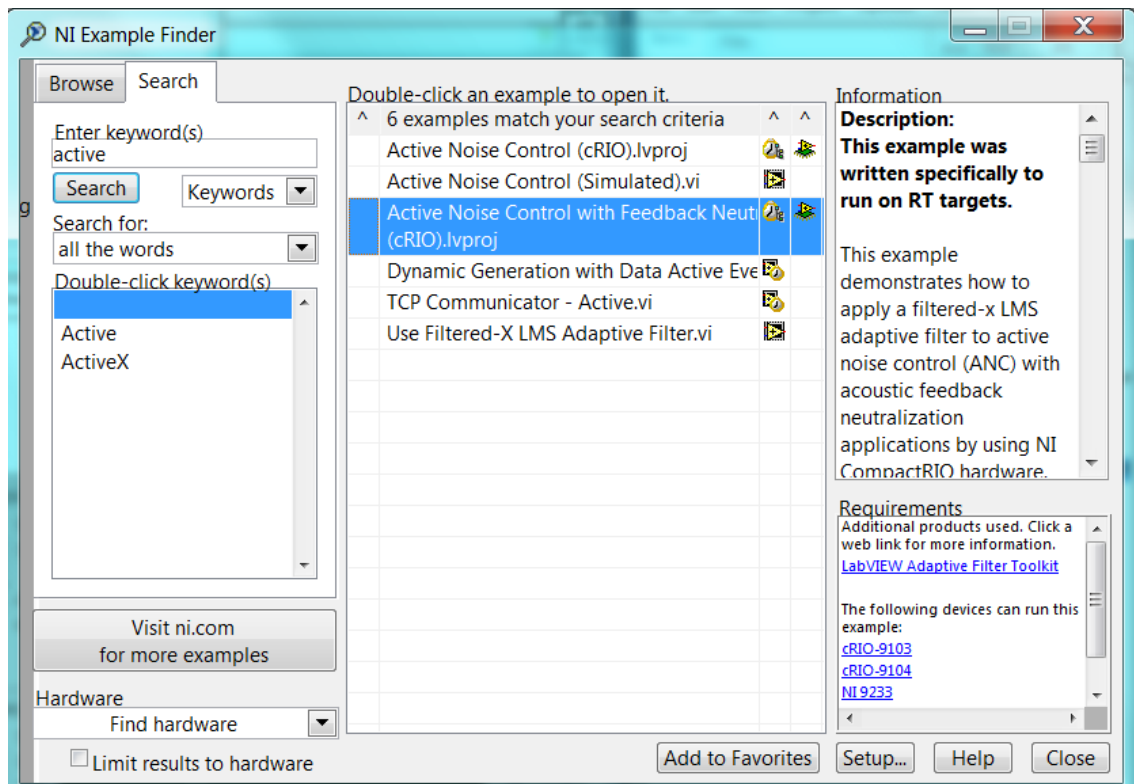


Рисунок 2.2 –Библиотека программ в LabView

Далее эта программа была модернизирована для использования с существующим аппаратным комплексом, состоящим из оборудования компании National Instruments (см. рисунок 2.3).

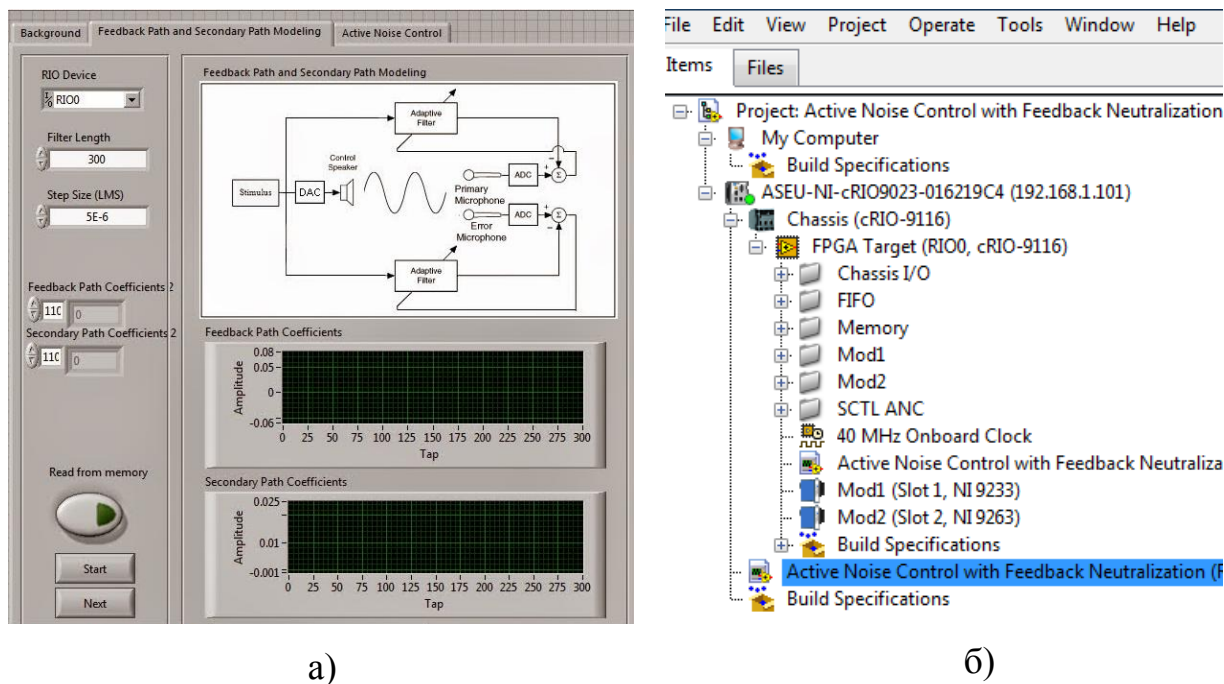


Рисунок 2.3 – Экранные формы программного модуля адаптивной цифровой фильтрации пакета LabVIEW а) и структура проекта модернизированной программы для активного гашения шума б)

3. Экспериментальные исследования акустических характеристик в системе активного подавления шума в трубе.

3.1 Описание лабораторной установки

Экспериментальная лабораторная установка представлена на рисунках (3.1-3.2).

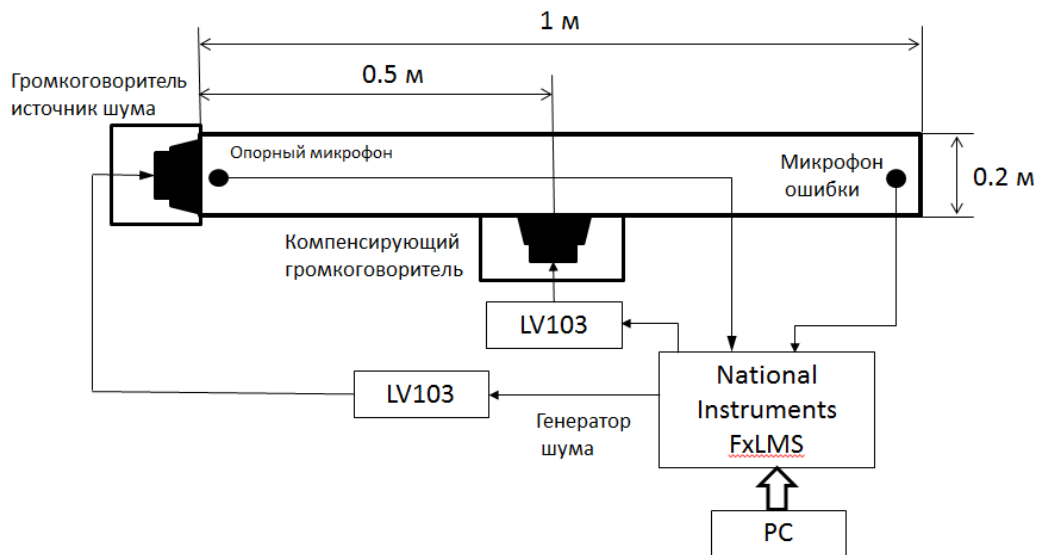


Рисунок 3.1 - Схема экспериментальной установки активного контроля шума

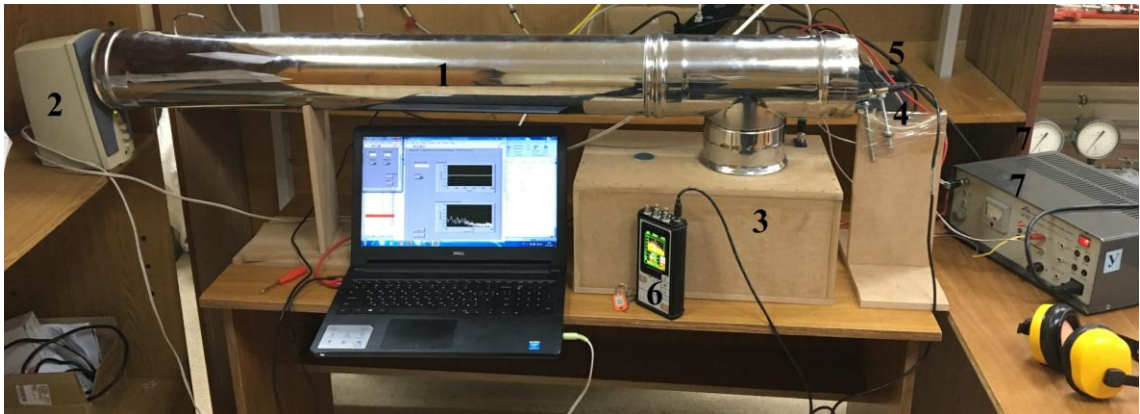


Рисунок 3.2 - Экспериментальная установка активного контроля шума в трубе

Экспериментальная установка состоит из:

1. Трубопровода, размеры которого указаны на рисунке 3.3.

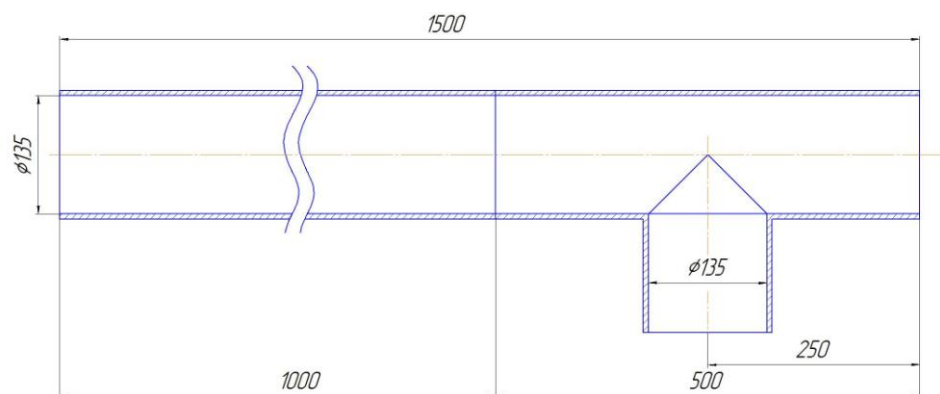


Рисунок 3.3 - Геометрические параметры трубопровода





2. Источник шума, в качестве которого используется колонки Genius SP-G10. Суммарная мощность 10 Вт RMS/200 Вт PMPO. Диапазон воспроизводимых частот 45-20000 Гц. Размеры динамиков фронтальных колонок 1x76 мм Размеры фронтальных колонок (ШxВxГ) 92x214x145 мм
3. Динамик Visaton W 130 S/4 используется в качестве источника антишума для гашения шума с частотами от 50 до 3000 Гц.
4. Микрофоны используются для измерения опорного сигнала (шума) и сигнала ошибки (сигнала на выходе из трубы)– G.R.A.S. Type 40PH.
5. Управляющий комплекс состоит из контроллера реального времени cRIO-9023 подключённого к 8-слотовому шасси с программируемой логической интегральной микросхемой (ПЛИС) и двух модулей: ввода NI 9223 и вывода NI 9263 (рисунок 3.4). Основные задачи цифрового сигнального процессора (DSP) решаются на ПЛИС в режиме "на лету", контроллер реального времени осуществляет только взаимодействие с ПК и пользователем (см. таблицу 3.1)



Рисунок 3.4 - Внешний вид управляющего комплекса

6. Многофункциональный акустический измеритель "Экофизика".
7. Усилитель LV-102 брьюль и кьер. Выходная мощность - 50 Вт. Воспроизводимые частоты от 3 Гц до 40 кГц

Таблица 3.1 - Состав и основные характеристики управляющего комплекса

Наименование	Характеристики	Внешний вид
cRIO-9023 Real-Time Controller With 256 MB DRAM, 2 GB Storage	533 MHz processor, 2 GB nonvolatile storage, 256 MB DDR2 memory	
NI cRIO-9116 <i>8-Slot, Virtex-5 LX85 CompactRIO Reconfigurable Chassis</i>	8-slot reconfigurable embedded chassis that accepts any CompactRIO I/O module Xilinx Virtex-5 reconfigurable I/O (RIO) FPGA core 51840 Flip-Flops	
NI 9223 <i>±10 V, Simultaneous Analog Input, 1 MS/s, 4 Ch Module</i>	4 differential channels, 1 MS/s per channel sample rate ±10 V measurement range, 16-bit resolution	
NI 9263 <i>±10 V, Analog Output, 100 kS/s, 4 Ch Module</i>	4 channels, 100 kS/s per channel simultaneous analog output ±10 V output range, 16-bit resolution	

3.2 Порядок проведения измерений

Для экспериментального исследования акустических свойств материалов необходимо:

- Собрать установку (см. рисунок 3.2);
- Открыть программу в LabVIEW (см рисунок 2.3);

- перейти на вторую вкладку Feedback Path and Secondary Path Modeling на лицевой панели (рисунок 3.5);
- а) установить значение длины фильтра Filter Length 300 и шаг Step Size 0,0001 и нажать кнопку Start. В системе включится вторичный источник (Динамик Visaton W 130 S/4) который будет подавать белый шум для расчета коэффициентов фильтра в Feedback Path и Secondary Path.

Процесс подбора коэффициентов фильтра заключается в подборе двух параметров: Filter Length (длина фильтра) и Step Size (шаг фильтра). Чем больше длина фильтра и меньше шаг, тем медленнее происходит подбор коэффициентов, но у алгоритма больше возможности быть устойчивым. Неправильный подбор данных параметров приводит к тому, что процесс в фильтре будет неустойчивым и значения будут непостоянными.

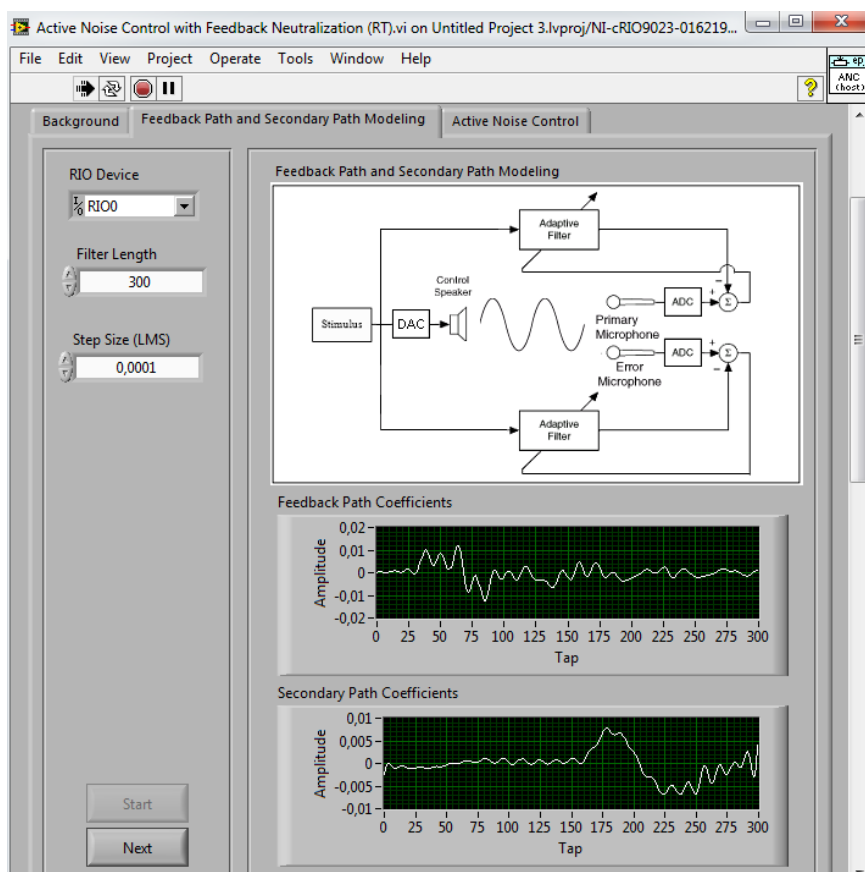


Рисунок 3.5 - Внешний вид окна вкладки Feedback Path and Secondary Path Modeling программы в LabVIEW

б) дождаться пока кривые на графиках Feedback Path and Secondary Path перестанут изменяться и установятся постоянные значения коэффициентов.

Шум подается до тех пор, пока на данных двух графиках не установятся постоянные значения коэффициентов.

- Нажать на кнопку NEXT и перейти к вкладке Active Noise Control (рисунок 3.6);

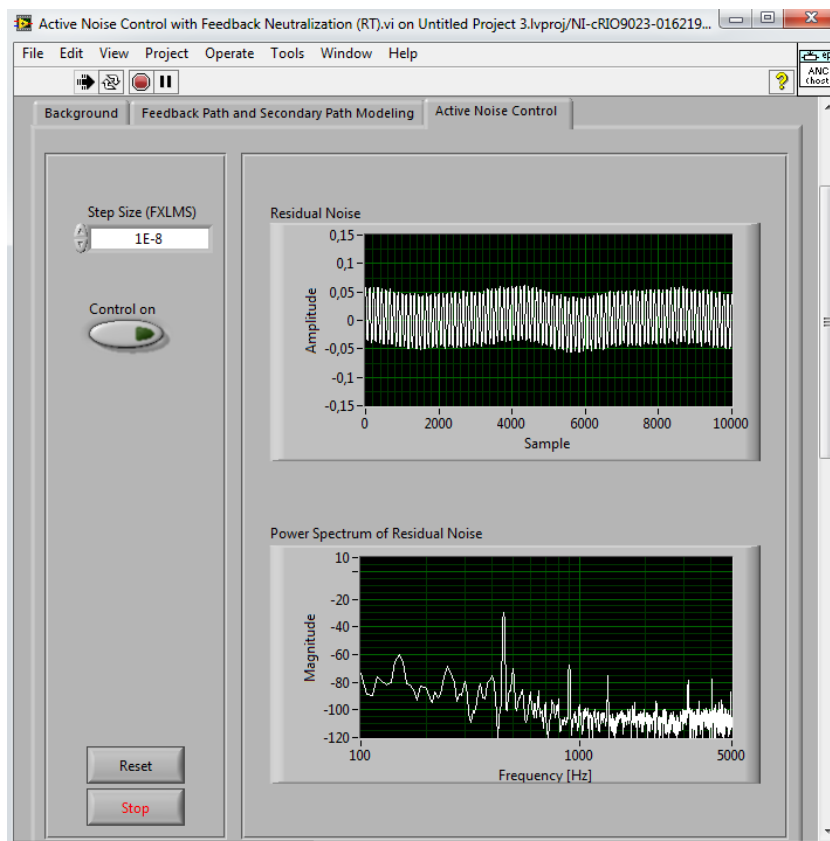


Рисунок 3.6 - Внешний вид окна вкладки Active Noise Control. программы в LabVIEW

После подбора коэффициентов и нажатия на кнопку NEXT сигнал шума отключается, включается источник первичного шума и с помощью алгоритма LMS вырабатывается сигнал гашения или компенсирующий сигнал.

- Сделать Print Screen экрана для записи уровня шума до включения системы активного гашения;

- С помощью прибора "Экофизика" записать спектр шумового сигнала до включения системы активного гашения;
- Включить систему активного гашения шума с помощью кнопки Control on (рисунки 3.7);

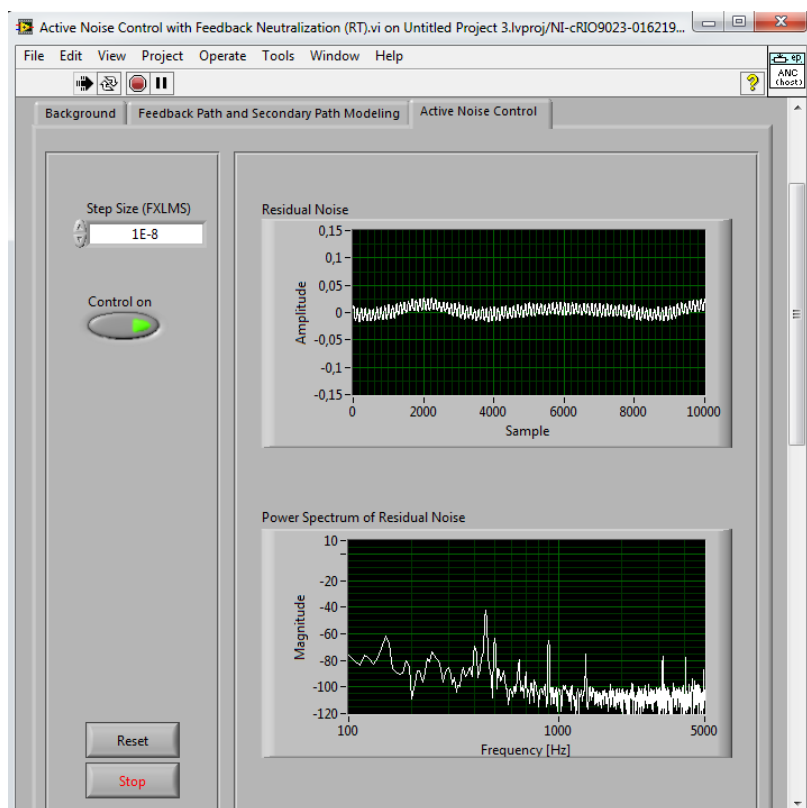


Рисунок 3.7 - Внешний вид окна вкладки Active Noise Control. программы в LabVIEW

- Сделать Print Screen экрана для записи уровня шума после включения системы активного гашения;
- С помощью прибора "Экофизика" записать спектр шумового сигнала после включения системы активного гашения.

4. Оформление результатов измерений и отчета

Результаты исследований записывают в протокол, который должен содержать следующие данные:

1. Параметры Filter Length (длина фильтра) и Step Size (шаг фильтра);
2. Частота сигнала (шума);

3. Графики на которых представлены спектры сигналов и их временные реализации на заданных частотах до включения системы активного гашения и после.

Отчет по лабораторной работе должен содержать

1. Описание оборудования для измерений;
2. Принципиальная схема установки;
3. Ход проведения экспериментальных исследований и частотный диапазон сигналов;
4. Протоколы измерений
5. Дату измерений;
6. Ф.И.О. и номер группы студента, проводившего экспериментальные исследования;
7. Выводы по работе, включающие информацию о том, на какую величину удалось погасить выбранный тип сигналов.

Контрольные вопросы

1. Что такое активные методы гашения шума?
2. Типы систем активного гашения?
3. Что такое LMS и FxLMS алгоритмы фильтрации используемые для активного гашения сигналов?
4. Что такое опорный сигнал и сигнал ошибки?
5. Какое оборудование используется при активных методах снижения шума в трубе?
6. В чем заключается методика измерения акустических сигналов при активном гашении шума в трубе?

Список использованных источников

- 1 Elliot, S. Signal Processing for Active Control [Text] / S.J. Elliott. - London: Academic Press, 2000. - 511 p.
- 2 Lueg, P. Verfahren zur Dämpfung von Schallschwingungen. German Patent No. 655508. Filed: Jan. 27, 1933. Patented: Dec. 30, 1937. Related: Process of Silencing Sound Oscillations. US Patent No. 2, 043,416. Filed: March 8, 1934. Patented: June 9, 1936. Priority (Germany): Jan. 27, 1933.
- 3 Васильев, А.В. О снижении низкочастотного шума автомобиля путем комплексного использования активного шумоподавления [Текст] / А.В. Васильев // Техническая акустика. - 2002.- № 2 (1). - С. 95-102.
- 4 Васильев А.В. Снижение низкочастотного шума и вибрации в газопроводах энергетических установок с использованием метода активной компенсации [Текст]: монография / А.В. Васильев – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 294 с.
- 5 Active Noise Control FAQ v1996-03-14 [Электронный ресурс]. <http://www.faqs.org/faqs/active-noise-control-faq/>, (дата обращения 02.06.2017)
- 6 LMS Adaptive Filter <http://www.latticesemi.com>
- 7 LMS Adaptive Filter [Электронный ресурс]. https://eng.eewiki.net/app/db_page/get_file.php?docid=61696 (дата обращения 02.06.2017)
- 8 Xun Huang Active Control and Signal Processing [Электронный ресурс]. <http://www2.coe.pku.edu.cn/tpic/2010913102323467.pdf> (дата обращения 02.06.2017)

Учебное издание

АКТИВНОЕ ГАШЕНИЕ ШУМА В ТРУБОПРОВОДЕ

Методические указания

Составитель: *Миронова Татьяна Борисовна*

Изд-во Самарского университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34