

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМА, ВОЗНИКАЮЩЕГО В ГАЗОПРОВОДЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Аннотация. Исследованы шумы, присутствующие в акустическом тракте ультразвукового расходомера газа. Чаще всего они представляют собой смесь гармонического шума в диапазоне 98-110 кГц и белого гауссовского шума. На основе набора реализаций шумов от разных источников определена усредненная спектральная модель шума, использующаяся при проектировании алгоритма адаптивной фильтрации.

Ключевые слова: гармоничный, гауссовский шум, ультразвуковой расходомер, спектральная модель, адаптивная фильтрация.

Вступление. Для контроля расхода воды и теплоносителя с 60-х годов прошлого века в промышленности применяются ультразвуковые расходомеры. Неоспоримые достоинства ультразвуковых расходомеров: малое или полное отсутствие гидравлического сопротивления, надежность (вследствие отсутствия подвижных механических элементов), высокая точность, быстродействие, помехозащищенность – определили их широкое распространение [1]. Данная работа основана на опыте эксплуатации время - импульсных расходомеров газа типа «Курс».

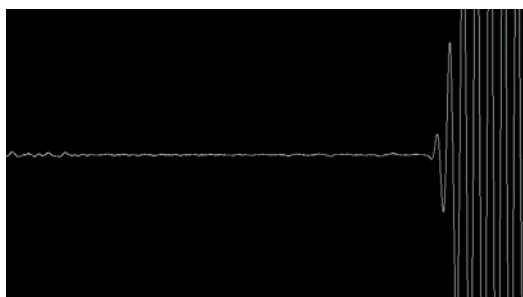
Постановка задачи. Рабочая среда, движущаяся в газопроводе, проходя через отдельные элементы трубо-транспортной системы вызывает собственные акустические колебания в широком диапазоне частот. Эти колебания накладываются на зондирующие импульсы ультразвуковых расходомеров, что может привести к их некорректной работе. Данная статья посвящена исследованию характеристик шума.

Экспериментальные исследования. В качестве источников шума могут выступать:

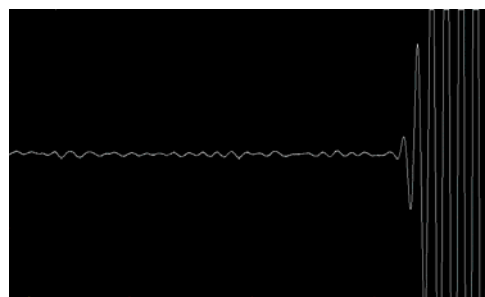
- Движущийся, сильно турбулентный поток газа. Элементами потока, способными создавать широкополосные акустические шумы, в частности, могут выступать продольные завихрения, возникающие

вдоль направления движения всего потока. Значительную роль в механизме образования турбулентности играет шероховатость внутренней поверхности самого трубопровода.

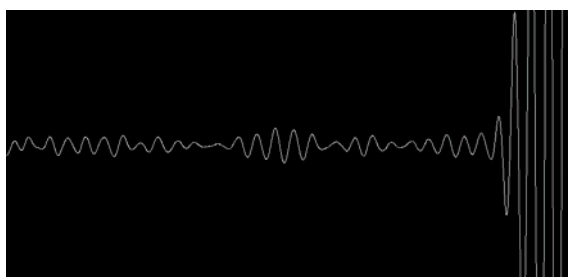
- Сварные швы и соединительные элементы. Различного рода неоднородности в самом трубопроводе могут существенно повышать турбулентность потока, и, как следствие, косвенно выступать в роле источника акустического шума, влияющего на работоспособность прибора. Это выступы и ступеньки в проточной части перед датчиками и после них, образованные в результате несоосного монтажа (либо не совпадения диаметра фланцев и уплотнительных прокладок), наличие различного рода острых выступов на внутренней поверхности трубопроводов, не защищенные сварные швы фланцев и поворотов трубопровода. На рис.1 приведены сигналы по одному из измерительных каналов расходомера «Курс G-250» в процессе испытания на установке АУРС-1600 (г. Новомосковск) при максимальном расходе 400 м³/ч, на установке в г. Ивано-Франковск при отсутствующем расходе (статика под давлением) и при максимальном расходе в 400 м³/ч.



а) При отсутствующем расходе



б) На установке АУРС-1600



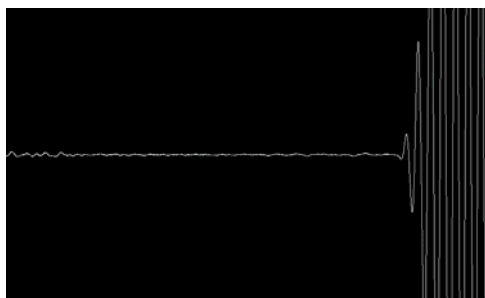
в) На установке в г. Ивано-Франковск

Рисунок 1 - Сигналы по одному из измерительных каналов расходомера «Курс G-250» при максимальном расходе 400 м³/ч

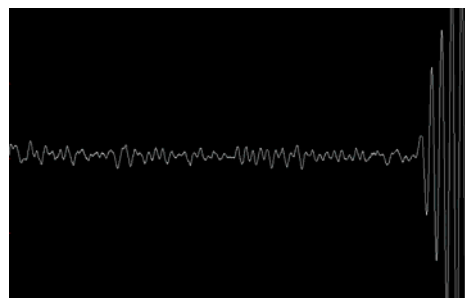
На рисунках видно наличие уровня шума более высокой амплитуды при одинаковых расходах на обеих установках. Более высокая интенсивность шума связана с наличием острых кромок по всему

контуру монтажа датчика температуры, а также сварных швов в трубопроводе.

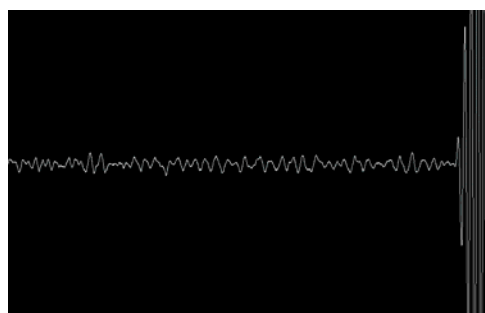
На рис.2 показаны сигналы по одному из измерительных каналов расходомера “Курс G-1000” в процессе испытания на установке АУРС-1600 в г. Новомосковск при расходе $1600 \text{ м}^3/\text{ч}$, на установке УПЛГ-2500 в г. Запорожье при расходе в $1600 \text{ м}^3/\text{ч}$, на установке в г. Ивано-Франковск при отсутствующем расходе (статика под давлением) и при расходе в $1600 \text{ м}^3/\text{ч}$.



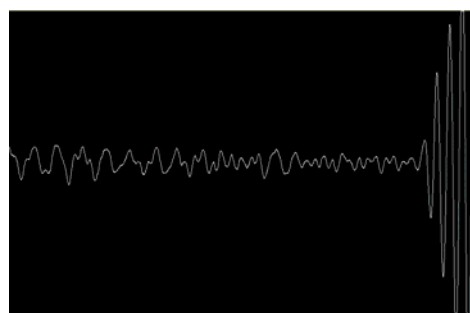
а) При отсутствующем расходе



б) На установке АУРС-1600



в) На установке УПЛГ-2500

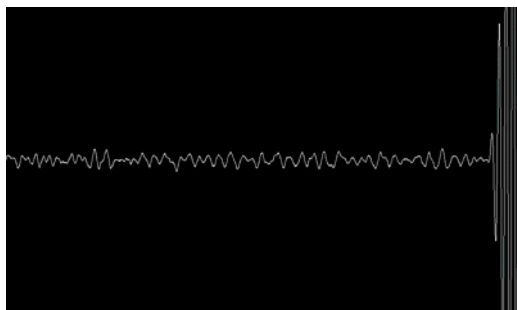


г) В г. Ивано-Франковск

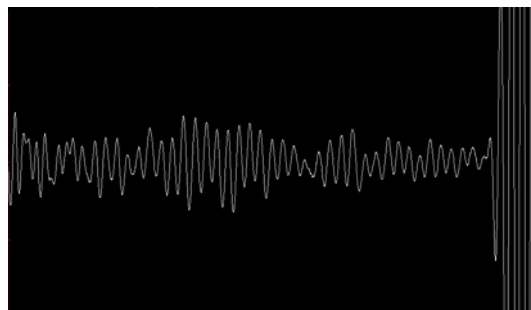
Рисунок 2 - Сигналы по одному из измерительных каналов расходомера “Курс G- 1000” при максимальном расходе $1600 \text{ м}^3/\text{ч}$

- Фильтры. При монтаже на трубопроводе расходомера “Курс-01” установка фильтров тонкой очистки не обязательна. Но для защиты приборов от находящихся в природном газе смолистых веществ, пыли, песка, окалина, ржавчины и других твёрдых частиц целесообразно применять газовые фильтры. В таких фильтрах могут задерживаться крупно-дисперсионные загрязнители. Оставшись в фильтре, такие загрязнители под действием потока газа осуществляют механические колебания, являясь источником постороннего звука. На Рис.3 приведены сигналы по одному из измерительных каналов расходомера “Курс G-1000” в процессе испытания на установке УПЛГ-2500 в г. Запорожье при расходе $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$, и на установке в г. Ивано-Франковск при расходе в $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$ с использованием фильтра.

Видно наличие более высокого уровня шума на установке в г. Ивано-Франковск при одинаковых расходах на обеих установках. Причиной этого является фильтр. Шум, производимый фильтром, отчетливо воспринимался даже «на слух».



а) На установке УПЛГ-2500



б) В г. Ивано-Франковск

Рисунок 3 - Сигналы по одному из измерительных каналов расходомера «Курс G- 1000» при максимальном расходе $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$

- Струевыпрямители. Несмотря на то, что струевыпрямитель предназначен для сглаживания турбулентности потока, тем не менее, в ряде случаев он сам может являться источником акустических шумов. В первую очередь это связано с той же причиной, что и для фильтров – забивание относительно крупными дисперсными частицами. Кроме того, источником шума может быть шероховатость фазок и острота кромок струевыпрямителя.

- Входные и выходные задвижки и заслонки. Задвижки при эксплуатации расходомера в узлах учёта должны находиться в полностью открытом или закрытом состояниях. В противном случае может происходить «дребезг» частей задвижки под действием потока газа. Такой «дребезг» также служит дополнительным источником акустического шума.

- Редукторы. Редукторы используются для перехода между частью трубопровода с относительно высоким и относительно низким давлением. Прохождение потока газа через редуктор зачастую сопровождается интенсивными акустическими помехами.

Исследование характеристик шума. С целью определения спектра шума была написана программа в среде Matlab 7.0. Если последовательность $\{x(k)\}$, $k=1\dots N$, представляет собой отсчеты, взятые с интервалом $T=1/F_s$, где F_s – частота дискретизации, то спектральные отсчеты, полученные в результате вычисления ДПФ, будут расположены с шагом F_s/N . В расходомере «Курс-01» используется 10-

разрядный АЦП фирмы MAXIM – MAX1444 с частотой дискретизации - 10МГц. Тогда размерность частотной шкалы будет определена с ценой деления $10^7/N$.

Значения по оси ординат в получаемом дискретном преобразовании Фурье можно представить как:

$$U_i = x(k)_i \times \frac{\Delta U}{2^N}, \quad (1)$$

где U_i – текущее значение напряжения подаваемого на вход АЦП (В), $x(k)_i$ - числовое значение на выходе АЦП.

Цена деления по оси ординат при этом будет составлять:

$$du = \frac{\Delta U}{2^N}, \quad (2)$$

где ΔU – разница между максимальным и минимальным значениями напряжения, подаваемого на вход АЦП (В), 2^N – разрядность АЦП.

В нашем случае $\Delta U=2,8В$ и цена деления оси ординат составляет:

$$du = \frac{2.8В}{1024} = 2,73мВ \approx 3мВ. \quad (3)$$

В процессе анализа шумов вычислялось дискретное преобразование Фурье для каждого численного массива представляющего собой закодированную временную выборку шумового процесса. Для полученного результата производился пересчет в систему координат мВ/кГц. После чего находился максимум, а также все локальные максимумы для спектральных линий, определялась их амплитуда и частота. В зависимости от наличия частотных составляющих данные помечались либо как содержащие гармоническую составляющую, либо нет.

Было установлено, что 89 сигналов шума из 105 имеют полосу частот $\Delta f=98-110кГц$. Причем локальные максимумы сосредоточены на частотах $f_1=98кГц$, $f_2=100кГц$, $f_3=105кГц$ и $f_4=110кГц$. При этом амплитуды гармоник в каждом конкретном случае индивидуальны и зависят от природы источника шума. В ряде случаев в шуме присутствуют гармонические составляющие, что существенно для корректного использования алгоритма шумоподавления на основе временного прогнозирования. В свою очередь 16 сигналов имеют практически

равномерный спектр в исследуемом диапазоне. Это говорит об случайном характере шума.

После проведенного спектрального анализа было решено разбить полученные результаты на группы с одинаковыми свойствами, определить число элементов в каждой группе и попытаться выявить общие свойства элементов в каждой группе. Фактически необходимо решить задачу кластеризации данных приведенных. При этом данные представляют собой точки в 4-х мерном пространстве. Частоты f_1 , f_2 , f_3 , f_4 играют роль осей в этом 4-х мерном пространстве, а значения амплитуд гармоник шумового сигнала являются проекциями на соответствующие оси. Для проведения кластеризации данных воспользуемся алгоритмом k -средних (k -means), который получил наибольшее распространение в силу своей простоты. Было принято решение разбить данные на 4 кластера.

Алгоритм k -средних выделил 2 минимальные группы, условно обозначенные как «1» и «4». В первую группу попали 17 сигналов, имеющих минимальное среднее значение по всем гармоникам. Очевидно, что это те сигналы, которые целиком формируются случайной составляющей. В свою очередь в четвертую группу попали 4 сигнала, имеющие максимальные средние значения по всем гармоникам. Считаем, что эти сигналы имеют максимальный уровень гармонического шума в диапазоне Δf кГц. Наибольший интерес представляют собой группы условно обозначенные как «2» и «3». В эти группы отнесены сигналы, представляющие собой смесь случайной и гармонической составляющих. Ранжируя сигналы по уровню гармоник [2,3], получим, что во вторую группу попали смеси с преобладанием случайной составляющей (53 сигнала), а в третью - с преобладанием гармонической составляющей (31 сигнал). Соответствующая гистограмма представлена на рисунке Рис. 4.

Из гистограммы видно, что хотя чисто гармонические шумы явление довольно редкое (всего 4%), они все же присутствуют при определенных условиях. Число чисто случайных шумовых процессов (белый шум) также не велико и составляет всего 16%. Чаще встречаются шумы, содержащие как гармоническую, так и случайную составляющие (50% для смесей с преобладанием случайной составляющей, и 30% для смесей с преобладанием гармонической составляющей).

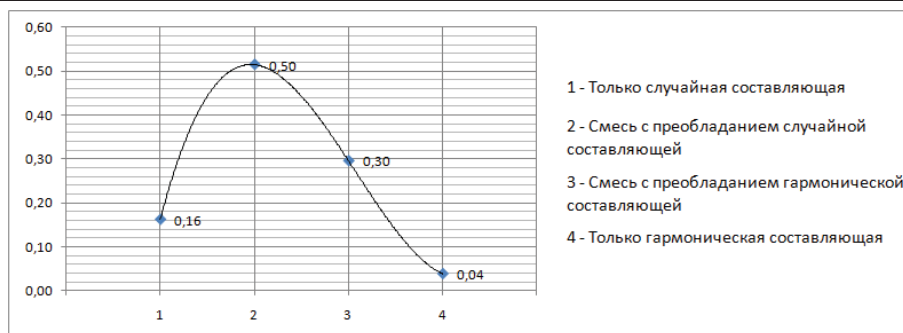


Рисунок 4 - Функция распределения вероятности шумовых сигналов

Построим усредненную модель шума. Для этого усредним спектральную картину по каждой из 4-х рассмотренных выше групп сигналов. При этом j -я средняя гармоника в i -й группе определяется как

$$I_j^i = \frac{\sum_{n=1}^N I_n^i}{N}; i \in 1..4, j \in 1..4 \quad (4)$$

где j – номер средней гармоники, i – номер группы, к которой относится данная гармоника, n – номер гармоники в группе, N – общее число гармоник в группе, I_n^i – значение гармоники с номером n в группе i .

На рис.5 показаны средние спектры для каждой из 4-х групп.

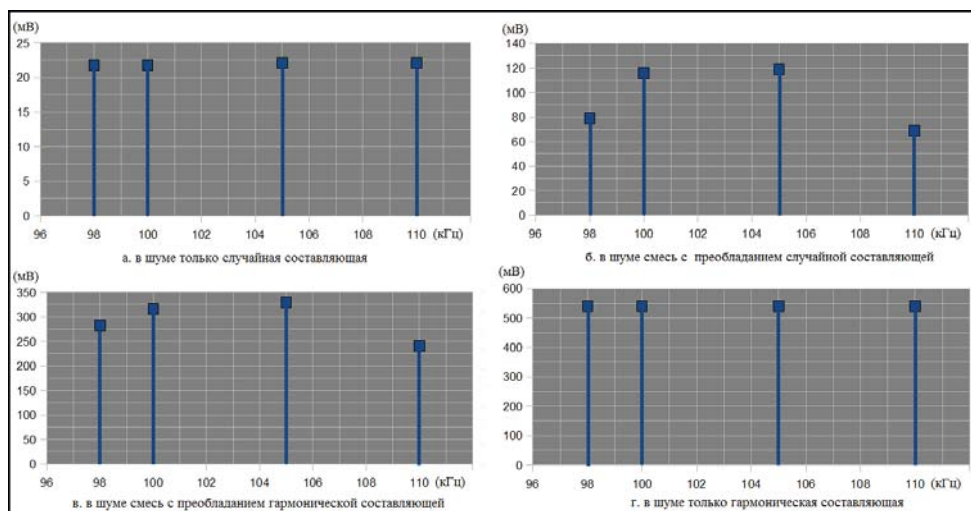


Рисунок 5 - Результирующие спектры для каждой из 4-х групп

Внешние спектральные картины для шума с чисто случайной и только гармоническими составляющими кажутся одинаковыми. Однако это не так. Во-первых, отличаются амплитуды спектральных линий. Во-вторых, амплитуда спектра белого шума имеет практиче-

ски одинаковое значение во всем диапазоне частот, т. В то время как на рис 5. показаны лишь те участки спектра, которые соответствуют локальным максимумам на приведенных здесь четырех гармониках. Это сделано специально для большей наглядности и удобства сопоставления спектральных картин разных типов шумов.

Теперь по имеющимся усредненным данным по каждой группе, а так же с учетом вероятности падения в данную группу постоянным усредненную спектральную модель шума. Определим каждую гармонику в усредненной модели шума как

$$I_n = \sum_{i=1}^4 P_n I_n^i, n \in 1...4 \quad (5)$$

где P_n – вероятность сигнала попасть в n-ю группу (одну из четырех рассмотренных выше), I_n^i – i-я гармоника (одна из четырех) в n-й группе. Результат усреднения спектральной модели шума представлен на рис. 6.

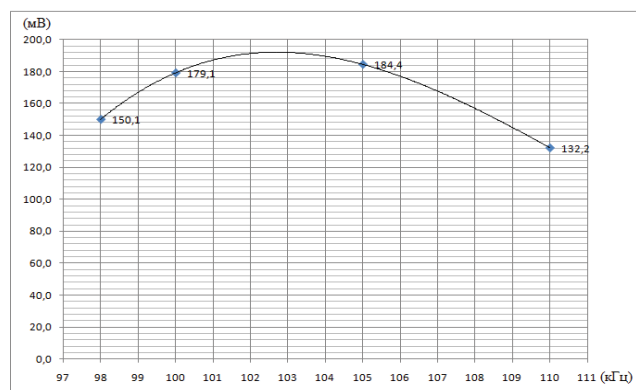


Рисунок 6 - Усредненная спектральная модель шума

На рис. 7 представлено расположение усредненной спектральной модели шума относительно спектральных картин 4-х основных групп сигналов. Видно, что усредненная спектральная модель фактически является средней линией фигуры ограниченной сверху спектральной характеристикой группы шумов, в которой преобладает гармоническая составляющая, а снизу - спектральной характеристикой группы шумов, в которой преобладает случайная составляющая (см. рис. 5.). Тем не менее, усредненная спектральная модель шума не делит площадь первой четверти координат на две равные части. Она больше тяготеет к нижней границе, как наиболее вероятной (см. рис. 4).

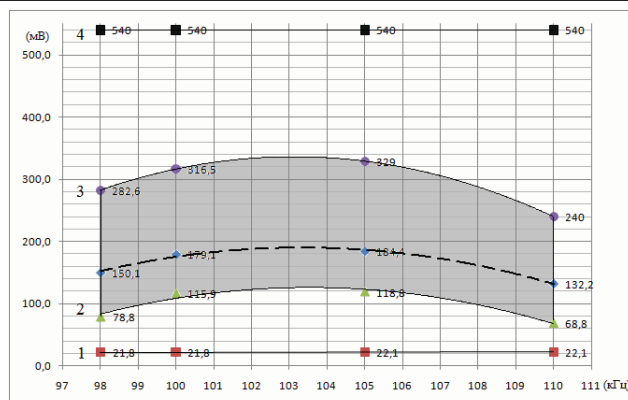


Рисунок 7 - Расположение усредненной спектральной модели шума относительно спектральных характеристик 4-х основных групп сигналов

Выводы. Полоса гармонического шума совпадает с собственной частотой ультразвуковых преобразователей (95-120 кГц).

На практике в акустическом тракте ультразвукового расходомера газа чаще всего встречаются шумы представляющие собой смесь гармонического шума в диапазоне 98-110 кГц, и белого гауссовского шума. Соотношение этих двух видов шумов зависит в каждом конкретном случае от источника шума. Реже встречаются чисто белые шумы, и совсем редким явлением является чисто гармонический шум. На основе набора реализаций шумов от разных источников и имеющих различную природу определена усредненная спектральная модель шума, которая используется в процессе проектирования и тестирования разрабатываемого алгоритма адаптивной фильтрации [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Книга 1/2. – СПб, «Политехника» 2002. – 410с./416с.
2. Ханецкий В.С., Валюх А.А. Адаптивный цифровой фильтр на основе нейронных сетей. Сборник научных трудов в 2-х частях. Ч. 1 - М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 167-175.
3. Айфичер Б. Д. Цифровая обработка сигналов: практический подход. Перевод с английского И.Ю. Дорошенко, А.В. Назаренко. - М.: СПб. Издательский дом «Вильямс», 2004.- 457 с.
4. Ханецкий В.С., Валюх А.А. Адаптивна цифрова фільтрація при динамічних вимірюваннях з використанням нейронних мереж.- //Системные технологии - № 5(64).- 2009, с.138-147.

Получено 21.01.2011г.