004.21/681.12

Семенов Н.Ю., аспирант кафедры КСУП
(ТУСУР, г. Томск)
Семенова О.С., доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Semenov N.Yu., postgraduate at the Department of KSUP
(TUSUR, Tomsk)
Semenova O.S., Candidate of Engineering Sciences
(KuzSTU, Kemerovo)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АЭРАЦИИ НА ТОЧНОСТЬ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО КОНВЕЙЕРА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF AERATION ON THE ACCURACY OF THE DIGITAL SIGNAL PROCESSING ALGORITHMIC PIPELINE IN ULTRASONIC FLOW METERS

Аннотация: Рассмотрена проблема деградации метрологических характеристик ультразвуковых времяпролетных расходомеров (УЗР) в условиях аэрации. Методом имитационного моделирования оценено влияние объемной доли газовых включений на точность базового алгоритмического конвейера цифровой обработки сигналов (ЦОС). Показано, что базовая конфигурация сохраняет работоспособность только при содержании пузырьков газа до 1%. Обоснована необходимость перехода к робастным методам оценки времени пролета и внедрению непрерывной числовой оценки качества сигнала с помощью SQI (Signal Quality Index, индекс качества сигнала).

Abstract: Aeration degrades the metrological performance of transit-time ultrasonic flow meters. We simulate the effect of gas volume fraction on the accuracy of a baseline digital signal processing (DSP) pipeline. The baseline stays operable below 1 % gas bubble content. We therefore recommend robust time-of-flight estimation combined with a continuous signal-quality score (SQI, Signal Quality Index).

Ультразвуковые времяпролетные расходомеры широко применяются для учета и контроля расхода жидкостей. Метрологические характеристики УЗР существенно зависят от состояния рабочей среды [1]. Одной из наиболее критичных проблем эксплуатации УЗР является аэрация, при которой в потоке присутствуют газовые включения.

Наличие пузырьков газа в потоке приводит к двум основным эффектам: затуханию полезного сигнала и формированию паразитных эхо-сигналов. В отличие от турбулентных шумов, которые имеют относительно стабильный и непрерывный во времени характер, помехи от аэрации проявляются в виде кратковременных случайных всплесков. Амплитуда таких импульсов может быть сопоставима с уровнем полезного сигнала, что создает существенную проблему для алгоритмов ЦОС [2-4], изначально разработанных для чистых жидкостей.

Цель данной работы состоит в количественной оценке устойчивости типового алгоритмического конвейера ЦОС к аэрации методом имитационного моделирования.

Для исследования выбрана базовая конфигурация конвейера ЦОС, являющаяся наиболее распространённой в приборах начального ценового сегмента. Конвейер включает следующие этапы:

1. Этап A (очистка сигнала): полосовой фильтр Баттерворта 4-го порядка. Он эффективно подавляет низкочастотные акустические шумы, однако не способен устранить паразитные отражения от пузырьков, поскольку их спектр перекрывается с полосой пропускания полезного сигнала.

2. Этап B (выделение огибающей): преобразование Гильберта. Формирует комплексный аналитический сигнал, модуль которого используется для детектирования.

3. Этап C (определение временных параметров): пороговый метод с параболической интерполяцией. Детектор фиксирует момент пересечения огибающей заданного уровня, а точное время прихода сигнала (для достижения субдискретной точности) вычисляется с помощью параболической интерполяции между отсчётами АЦП.

Этап D (постобработка) в базовую конфигурацию не включён, так как целью исследования является оценка влияния аэрации на точность алгоритмов этапов A-C. При отсутствии этапа D разность времён пролёта формируется после этапа C путём вычитания абсолютных времён пролета по потоку и против потока.

Имитационное моделирование проводилось в среде MATLAB. Генератор сигналов формирует синтетические зондирующие импульсы с параметрами, характерными для акустического тракта расходомера (несущая частота 1 МГц, частота дискретизации 50 МГц).

Аэрация моделировалась как сумма трех независимых процессов – затухания полезного сигнала, импульсных помех и турбулентного шума.

Затухание описывалось экспоненциальным законом $A(\alpha) = A_0 \cdot e^{-k\alpha}$, где A_0 – амплитуда ультразвукового сигнала при отсутствии аэрации, k=3,5 – коэффициент, подобранный по экспериментальным данным для воды с пузырьками, α – объёмная доля газовых включений.

Импульсные помехи моделировались с помощью генерации случайных гауссовых всплесков длительностью 2-4 периода несущей частоты. Амплитуда помех подчинялась равномерному распределению в диапазоне $[0;0{,}6 \cdot A_{\max}]$. Количество помех на пакет возрастало линейно с ростом α, а их временное положение было случайным.

Шум представлял собой аддитивный белый гауссовский шум, уровень которого повышался при увеличении α.

Моделирование проводилось для 10 значений объемной доли газа: 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%. На рисунке 1 представлен пример смоделированного сигнала при содержании газа α=5%.

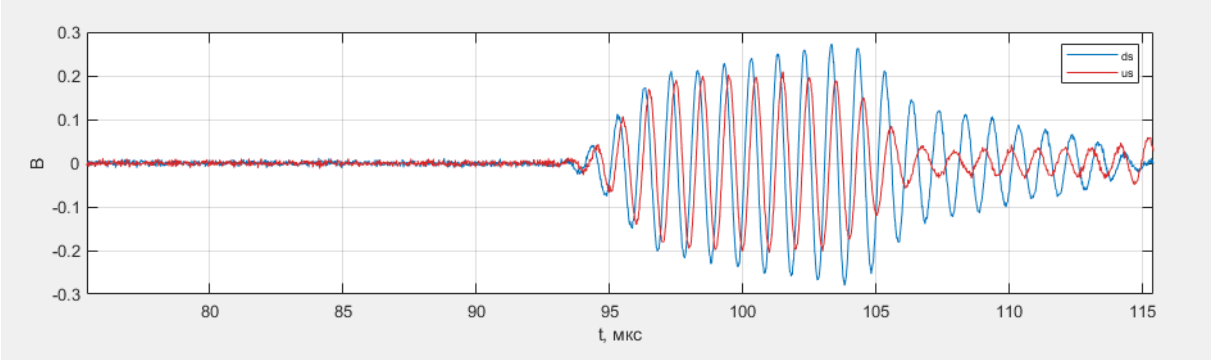

Рисунок 1 – Зондирующий сигнал (по потоку us и против потока ds) при объемной доле газовых включений 5%.

Для каждого уровня аэрации было проведено N=1000 измерений времени пролёта по потоку и против потока. Точность алгоритмического конвейера оценивалась по среднеквадратическому отклонению (СКО) определения разности времён пролёта Δt:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)^2},$$

где x_i – значение Δt, полученное в i-й реализации; $\bar{x}$ – среднее значение Δt по N реализациям при заданном значении α.

На рисунке 2 приведена экспериментальная зависимость среднеквадратического отклонения измерения разности времён пролёта от степени аэрации среды в диапазоне от 0 до 10 %. На графике можно явно выделить участок резкого роста СКО при α=0-3%, на котором СКО возрастает с ~3 нс (чистая жидкость) до ~150 нс. Далее следует участок замедленного роста при α=3-8%, на котором СКО изменяется от ~150 до ~210 нс. Затем виден участок повторного ускоренного роста СКО при α=8-10%.

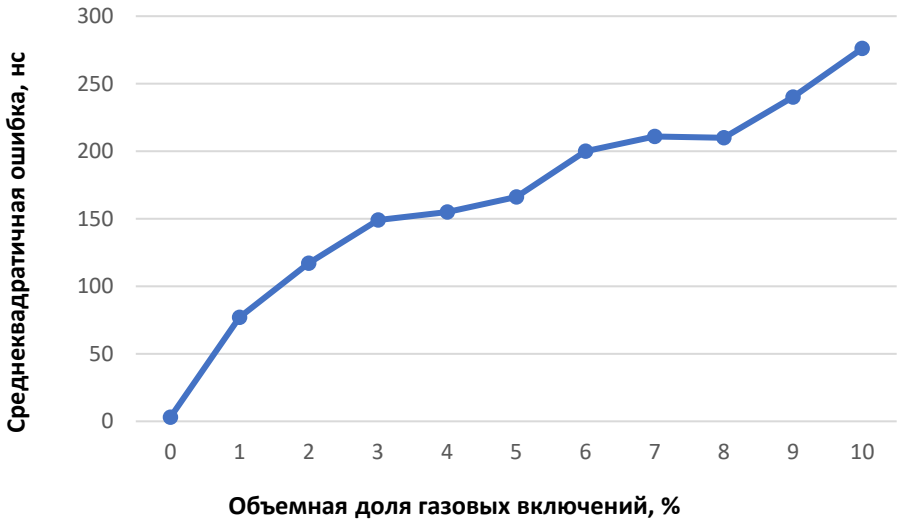

Рисунок 2 – Зависимость СКО измерения разности времён пролёта от объемной доли газовых включений

Полученную зависимость СКО измерения разности времён пролёта от объемной доли газовых включений можно объяснить следующим образом: участок резкого роста СКО при малых значениях α обусловлен ложными срабатываниями порогового детектора на паразитных эхо-сигналах от пузырьков; участок замедленного роста соответствует насыщению вероятности ложного срабатывания; финальный рост СКО – затуханию полезного сигнала и связанному с этим снижению соотношения сигнал/шум.

Полученные данные подтверждают, что рассматриваемая базовая конфигурация конвейера сохраняет приемлемые значения СКО только в чистой жидкости, при α =1-2% СКО возрастает на один-два порядка, а при $\alpha \geq 6\%$ превышает 200 нс, что для типичных значений разности времён пролета в десятки наносекунд означает фактическую потерю измерительной способности прибора.

Таким образом, для расширения рабочего диапазона необходима модернизация конвейера. Возможны следующие направления адаптации: переход от порогового детектирования к корреляционным методам, внедрение скользящего медианного фильтра на этапе первичной очистки сигнала для подавления одиночных импульсных выбросов, включение в алгоритмический конвейер этапа D, обязательная оценка качества сигнала между детектированием и финальной постобработкой.

Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальную верификацию полученных зависимостей и разработку алгоритма выбора оптимальной конфигурации ЦОС в зависимости от внешних факторов.

Список литературы

1. Соломичев Р. И., Слонько А. Н., Дубинин В. А. Методы повышения метрологической надежности ультразвуковых расходомеров в условиях воздействия дестабилизирующих факторов // Газовая промышленность. 2019. №2(786). – С. 112-117.
2. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов : учебник для вузов. – 4-е изд. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
3. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов / пер. с англ. – 3-е изд. – Москва : Техносфера, 2012. – 1048 с.
4. Гольденберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Поляк М. Н. Цифровая обработка сигналов : справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Радио и связь, 1985. – 312 с.