УДК 681.518.2

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ДАННЫХ ОБ УРОВНЕ ТОПЛИВА

Мосолов А.В. – студент,
Иванов А.С. – студент,
Научный руководитель: Гагарин Ю.Е. – доцент, к.т.н.,
Калужский филиал ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Россия, г. Калуга

Современные предприятия внедряют автоматизированные системы учета горючего для оптимизации затрат и предотвращения хищений [1]. Ключевым элементом таких систем выступают датчики-измерители, регистрирующие текущий объем в баке. Однако практика эксплуатации выявила серьезную проблему: показания приборов содержат интенсивные флуктуации, порождаемые вибрацией агрегатов, качеством дорожного полотна и инерцией жидкости при поворотах.

Наличие искажений препятствует точному учету потребления, генерирует ложные данные об уровне топлива. Цифровые алгоритмы обработки позволяют выделить истинный тренд из зашумленного потока измерений.

Данная статья фокусируется на трех базовых подходах к решению задачи. Первый способ — скользящее среднее — основан на вычислении среднего арифметического фиксированного числа последовательных отсчетов [2]. Простота вычислений делает его востребованным в бортовых системах с лимитированными ресурсами процессора.

Второй подход — экспоненциальное сглаживание — использует механизм убывающих весов для прошлых наблюдений [3]. Параметр α управляет балансом между реактивностью и степенью подавления флуктуаций. Рекурсивная формула требует хранения лишь предыдущей оценки.

Третий способ — фильтр Калмана — базируется на вероятностной модели процесса и погрешностей измерений [4]. Алгоритм циклически пересчитывает наиболее вероятное состояние системы, автоматически регулируя доверие к модели и к датчикам.

Экспериментальная база сформирована из записей с датчиков уровня топлива автомобиля. Данные охватывают два характерных сценария: компактный фрагмент (30 минут) для детального изучения реакции алгоритмов и продолжительный участок (несколько часов) с разнообразными режимами эксплуатации.

Калибровка параметров выполнена эмпирически. Для компактного фрагмента применены: окно скользящего среднего 3 измерения, параметр $\alpha = 0.5$ для экспоненциального сглаживания. Для протяженного участка установлены:

окно скользящего среднего 3 измерения, параметр экспоненциального сглаживания α = 0.25, настроенная модель фильтра Калмана.

Рисунок 1 иллюстрирует поведение трех алгоритмов на компактном временном фрагменте.

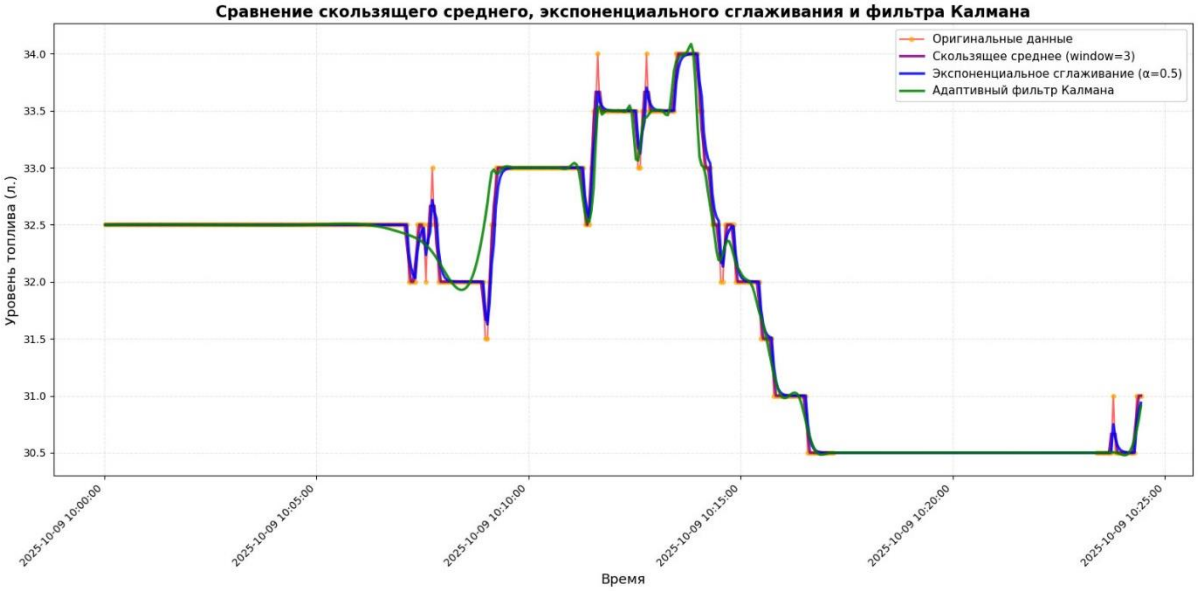

Рисунок 1 - Визуализация работы скользящего среднего (фиолетовый), экспоненциального сглаживания (синий) и фильтра Калмана (зеленый) относительно исходных измерений (оранжевый)

Скользящее среднее с окном 3 отсчета (фиолетовая линия) производит базовую очистку от быстрых осцилляций. Алгоритм отслеживает главный тренд потребления, частично сглаживая мелкомасштабные возмущения. На стационарных интервалах формируется относительно стабильная линия, хотя остаточные колебания все еще присутствуют.

Экспоненциальное сглаживание с α = 0.5 (синяя линия) демонстрирует заметно более интенсивное подавление высокочастотных компонент. Малое значение параметра придает больший вес истории, создавая инерционность отклика. Траектория становится существенно более плавной, эффективно отсекая импульсные артефакты.

Фильтр Калмана (зеленая линия) показывает выдающееся качество извлечения полезного сигнала. Алгоритм формирует исключительно гладкую кривую, максимально приближенную к истинной динамике расхода. На постоянных участках получается практически идеальная горизонталь. При скачках уровня фильтр быстро адаптируется без значительного отставания благодаря механизму коррекции усиления.

Рисунок 2 показывает работу алгоритмов на протяженном участке с модифицированными параметрами.

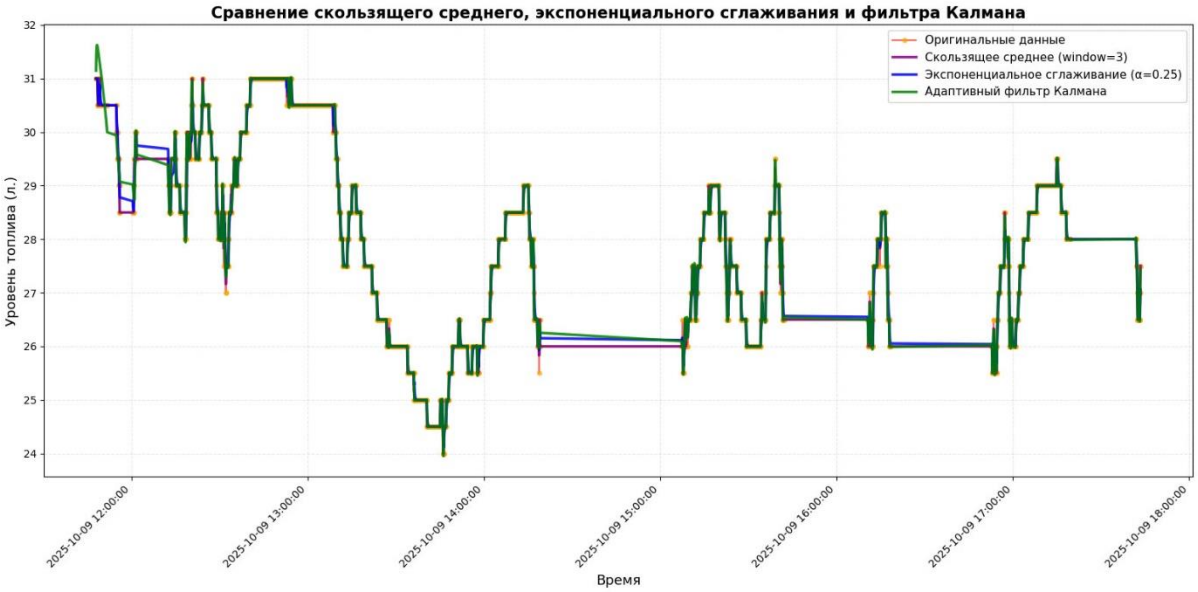

Рисунок 2 - Визуализация работы усреднения по окну (фиолетовый), взвешенного усреднения (синий) и оценивания Калмана (зеленый) на продолжительном интервале

Скользящее среднее (фиолетовая линия) обеспечивает умеренное сглаживание при сохранении основной структуры сигнала. Способ корректно воспроизводит тенденцию снижения объема, подавляя часть флуктуаций. На протяженных горизонтальных участках создается относительно ровная линия.

Экспоненциальное сглаживание с уменьшенным параметром α=0.25 (синяя линия) показывает более динамичное поведение по сравнению с первым экспериментом. Понижение α уменьшает влияние текущих измерений, замедляя реакцию на реальные изменения. Из-за этого наблюдаются задержки реагирования алгоритма на изменение уровня топлив.

Фильтр Калмана (зеленая линия) вновь демонстрирует превосходство. Алгоритм создает максимально чистую траекторию, практически полностью элиминируя шумовые компоненты. На стабильных участках формируется идеально гладкая линия. Переходы между уровнями обрабатываются с минимальной инерцией. Адаптивная природа способа позволяет автоматически подстраиваться под изменяющийся характер процесса.

В ходе анализа результатов было установлено, что качество подавления помех максимально у фильтра Калмана, создающего наиболее чистую траекторию. Экспоненциальное сглаживание и скользящее среднее дает средний эффект очистки.

Вычислительные затраты минимальны у скользящего среднего и экспоненциального сглаживания (элементарные арифметические действия). Фильтр Калмана требует матричной алгебры и хранения ковариационных структур.

Настройка параметров проще всего у скользящего среднего (один параметр — размер окна). Экспоненциальное сглаживание требует подбора коэффициента α. Фильтр Калмана нуждается в спецификации модели и статистических характеристик шумов.

В заключение, хотелось бы добавить, что экспериментальная проверка подтвердила эффективность всех трех подходов к улучшению качества телематической информации. Для типовых телематических платформ оптимальным компромиссом выступает взвешенное усреднение с α=0.3-0.5. При доступности вычислительной мощности предпочтительно оценивание Калмана. Перспективным направлением видится создание адаптивных гибридов, автоматически переключающихся между режимами в зависимости от текущей динамики.

Список литературы:

1. Vaseghi S. V. Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction / S. V. Vaseghi. – 4th ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2008. – 544 p. – ISBN 978-0470754061. – Текст : непосредственный.

2. Oppenheim A. V. Discrete-Time Signal Processing / A. V. Oppenheim, R. W. Schafer. – 3rd ed. – Upper Saddle River : Pearson, 2009. – 1108 p. – ISBN 978-0137549207. – Текст : непосредственный.

3. Brown R. G. Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series / R. G. Brown. – Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1963. – 468 p. – Текст : непосредственный.

4. Welch G. An Introduction to the Kalman Filter / G. Welch, G. Bishop. – Chapel Hill : University of North Carolina, 2006. – 16 p. – URL: https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf (дата обращения: 23.10.2025). – Текст : электронный.