

# К ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ РЕАЛЬНОГО ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ

## ABOUT THE POSSIBILITY OF THE SOFTWARE-BASED FILTRATION FOR NOISY SIGNALS OF THE ACTUAL LOCATION SENSOR

**K. Meleshkin  
D. Khudiakov**

*Summary.* In this paper the possibilities of using different software-based filters during the operation on implemented test-bench cyclically unstable system of the “ball on a rod” type is discussed. It is proposed to use a special infrared distance sensor of the Sharp 2Y0A2 type to measure the distance from the ball to the center of the rod strictly in one plane. The output signal of the sensor contains both constant noise and a random component, therefore filtering of the measured values is necessary for the normal operation of the stabilization system. It is shown that the Kalman filter provides the best filtration quality of measurement noise in this situation.

*Keywords:* distance sensor, measurement noise, software filter, pendulum systems, Kalman filter.

**Мелешкин Кирилл Николаевич**

Аспирант, ФГБОУ ВО Новосибирский  
Государственный Технический Университет  
kmeleshkin@mail.ru

**Худяков Дмитрий Сергеевич**

К.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Новосибирский  
Государственный Технический Университет  
khud@mail.ru

*Аннотация.* В работе рассмотрены возможности применения различных программных фильтров при работе на реальном испытательном стенде циклически неустойчивой системы типа «шар на стержне». Для измерения расстояния от шара до центра стержня строго в одной плоскости предложено использовать специальный инфракрасный датчик расстояния типа Sharp 2Y0A2. Выходной сигнал датчика содержит как постоянный шум, так и случайную составляющую, поэтому для нормальной работы системы стабилизации необходима фильтрация измеренных значений. Показано, что наилучшую фильтрацию шума измерений в этой ситуации обеспечивает фильтр Калмана.

*Ключевые слова:* датчик расстояния, шум измерения, программный фильтр, маятниковые системы, фильтр Калмана.

## Введение

**В** настоящее время в отечественной и зарубежной научной литературе просматривается тенденция увеличения числа публикаций, посвященных решению проблемы стабилизации различных маятниковых систем с высоким уровнем колебательности [1, 4, 5]. Это обусловлено, с одной стороны, появлением различных технических устройств (моноциклов, крановых установок, вибрационных роботов, сигвейев и др.), математическое описание которых соответствует такого рода системам [6]. С другой стороны, управление маятниковыми системами на подвижном основании представляет собой интерес с точки зрения теоретической механики и теории управления. Для исследования общих свойств таких систем и отработки алгоритмов управления разрабатываются специальные физические модели, одна из которых реализована автором и представляет собой систему «шар на стержне».

Целью данной работы является анализ влияния шума измерения аналогового датчика на выходной сигнал системы и выбор подходящего типа фильтрации.

## Постановка задачи

Система «шар на стержне» относится к классу систем типа «перевернутый маятник» [1], так как стержень способен поворачиваться вокруг своей точки подвеса, расположенной под ним (рис. 1).

Данный объект является циклически неустойчивой системой, которая широко используется в качестве испытательного стенда для тестирования различных методов управления. При этом необходимо измерять расстояния от шара до центра стержня строго в одной плоскости. С этой целью в реализованной физической модели предлагается использовать ИК-датчик расстояния Sharp 2Y0A2 [7].

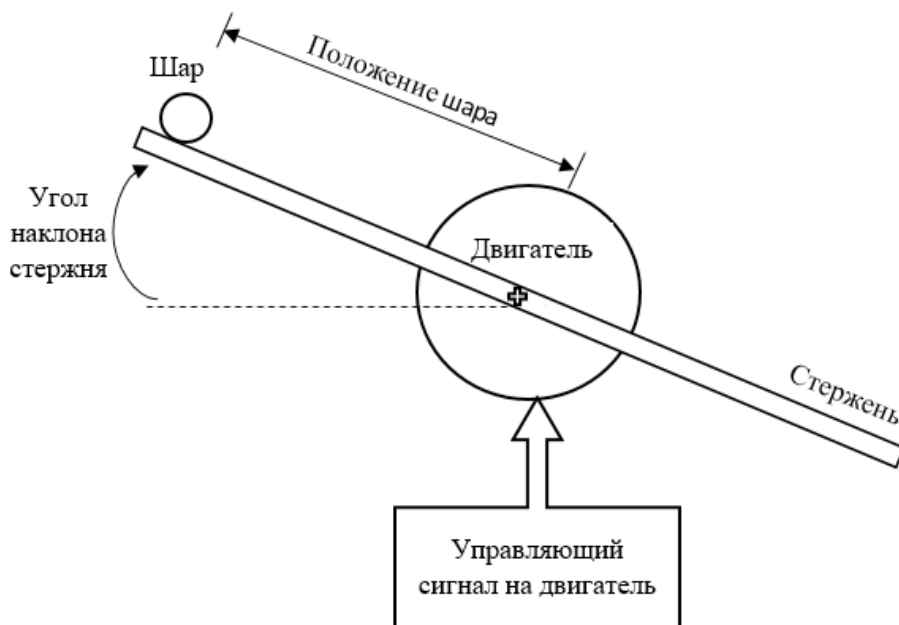


Рис. 1. Схематичное изображение системы «шар на стержне»

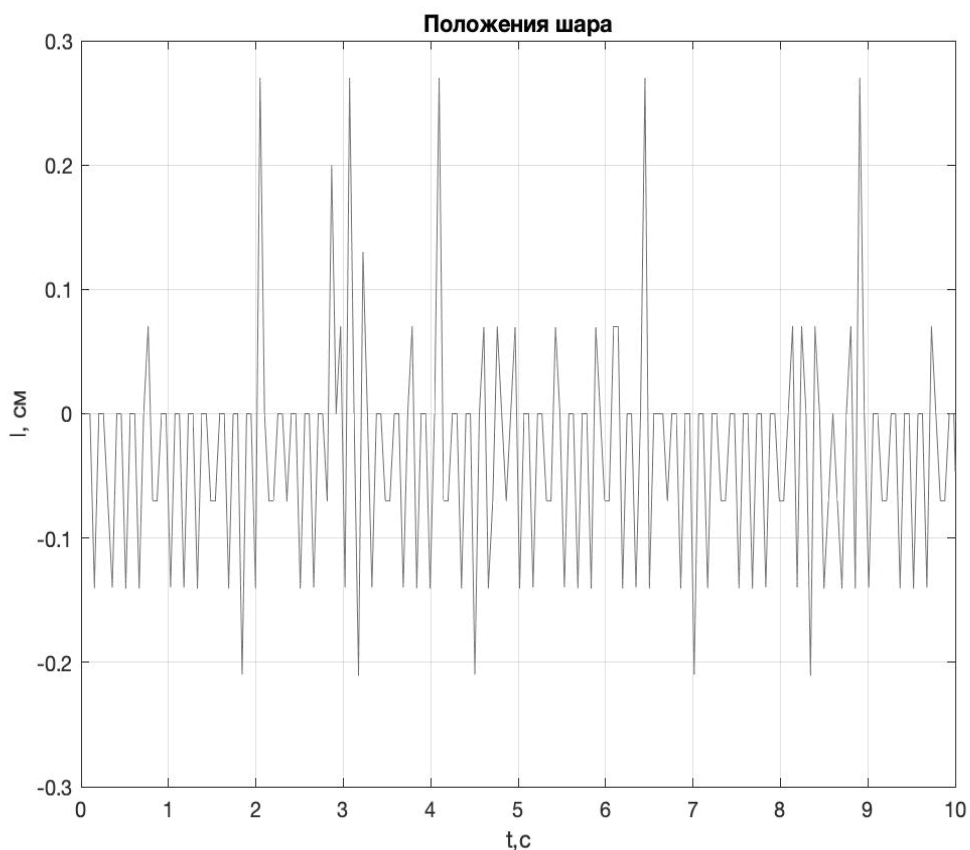


Рис. 2. Результат измерения положения шара в центре стержня

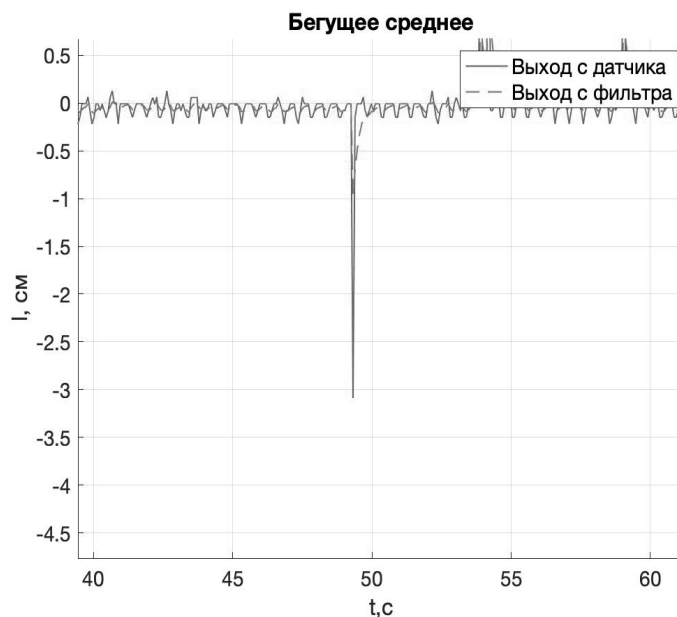


Рис. 3. Иллюстрация работы фильтра «Экспоненциальное скользящее среднее»

Система регулирования должна обеспечить удержание шара в середине стержня, что соответствует значению ИК-датчика в 0 см. На Рис. 2 показан выходной сигнал датчика для этой точки, который содержит как постоянный шум с равными отклонениями, так и случайную составляющую.

Наличие шумов измерения затрудняет решение задачи стабилизации положения шара, поэтому необходимо предусмотреть их хорошую фильтрацию. С этой целью предлагается использовать программные фильтры, обсудив предварительно возможности наиболее распространенных вариантов применительно к данной задаче.

#### Фильтр типа «Скользящего среднего»

«Скользящее среднее» (Moving Average) является одним из самых простых в семействе цифровых фильтров [8]. Несмотря на свою простоту, он хорошо справляется с подавлением случайных шумов и сохраняет быструю реакцию на изменение измеряемого значения.

Работа фильтра заключается в усреднении нескольких точек входного сигнала для получения каждой точки выходного сигнала в соответствии с выражением

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i+j],$$

где  $x[i+j]$  — входной сигнал;  $y[i]$  — выходной сигнал;  $M$  — количество точек, используемых в скользящем среднем.

Этот фильтр имеет несколько модификаций, в частности, «Взвешенное скользящее среднее» (Weighted Moving Average) и «Экспоненциальное скользящее среднее» (Exponential Moving Average) [2], который не требует длительной инициализации и выдает результат согласно выражению

$$y[i+1] = y_i + \frac{2}{M+1}(x_i - y_i), \quad x_1 = y_1,$$

$$M = const.$$

На рис. 3 представлены результаты работы программного фильтра «экспоненциальное скользящее среднее» с коэффициентом фильтрации 0.3 и шагом фильтрации 10 мс.

Как видно (рис. 3), происходит фильтрация простого шума, значение случайного шума уменьшается в 3 раза, однако имеется небольшая задержка измерений быстро изменяющихся значений.

#### Медианный фильтр

Медианный фильтр представляет собой последовательно скользящий по массиву сигнала и возвращающий на каждом шаге один из элементов, попавших в окно (апертуру) фильтра [9]. Выходной сигнал  $y_k$  скользящего медианного фильтра шириной  $(2n+1)$  для текущего отсчета  $k$  формируется из входного временного ряда в соответствии с выражением

$$k = med(x_{k-n}, x_{k-n+1}, \dots, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+n-1}, x_{k+n}),$$

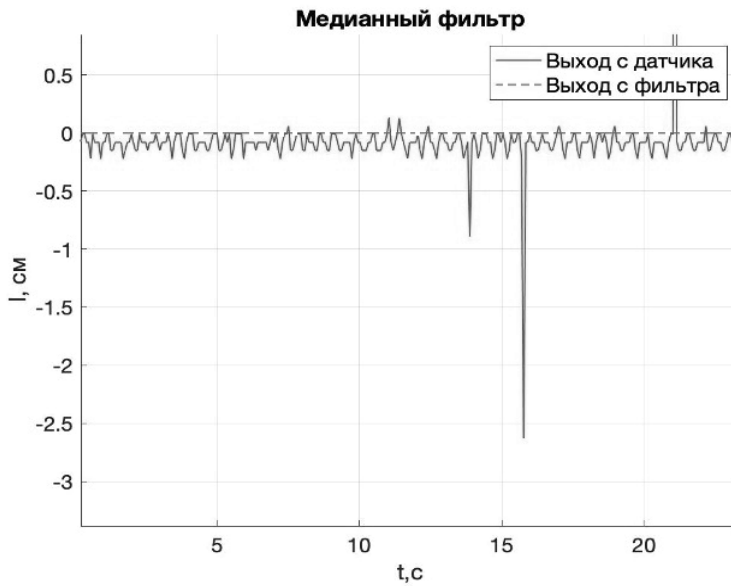


Рис. 4. Фильтрация сигнала медианным фильтром

где  $med(x_1, \dots, x_m, \dots, x_{2n+1}) = x_{n+1}$  — элементы вариационного ряда, ранжированные в порядке возрастания значений.

На практике апертура фильтра для упрощения алгоритмов обработки данных, как правило, устанавливается с нечетным числом отсчетов. В качестве начальных и конечных условий фильтрации обычно принимается текущее значение сигнала, либо медиана находится только для тех точек, которые вписываются в пределы апертуры. Результаты работы фильтра приведены на рис. 4.

Видно, что фильтр полностью подавляет как постоянный, так и случайный шум. Однако при резких изменениях значений с датчика фильтр ведет себя дискретно и не чувствителен к их малым изменениям (порядка 1 см), что делает его непригодным в системах, где требуется высокая точность.

### Фильтр Калмана

Фильтр Калмана — это эффективный рекурсивный фильтр, который позволяет оценить вектор состояния динамической системы, используя ряд неполных и зашумленных измерений [10]. При этом для расчёта текущего состояния системы необходимо знать текущее измерение, а также предыдущее состояние самого фильтра. Фильтр Калмана реализован во временном представлении, и в отличие от других рекурсивных фильтров, оперирует не только оценками состояния, но и оценками неопределённости (плотности распределения) вектора состояния согласно формуле Байеса условной вероятности [10].

Рассмотрим работу фильтра Калмана для динамической системы

$$\dot{x} = Fx + w(Q),$$

где  $x \in R^n$  — вектор состояния;  $F$  — матрица переходов,  $w(Q)$  — случайный шум с нулевым мат. ожиданием и матрицей ковариаций  $Q$ .

Фильтрация шума состоит из двух этапов: экстраполяции и коррекции. Предварительно необходимо задавать следующие параметры системы: матрицу ковариаций  $Q$ , матрицу наблюдения  $H$ , ковариацию шума наблюдения  $R$ , начальное значение ковариаций матрицы для вектора состояния  $P = Q$ , наблюдаемое состояние системы  $z(t)$  и начальное значение оценки состояния системы  $z(0) = x$ . В результате экстраполяции с последующей коррекцией по определенным правилам [10] обеспечивается фильтрация измеренного датчиком выходного сигнала. Работа фильтра при значениях амплитуды шума 0.15 см (средние отклонения амплитуды сигнала без фильтра) и скорости изменения 0.2 с (подбирается в процессе эксперимента, вручную) представлена на рис. 5.

Как видно, фильтр уменьшает амплитуду постоянного и случайного шума приблизительно в 10 раз, практически не имеет задержки при измерениях и является достаточно точным.

### Альфа-бета фильтр

Альфа-бета фильтр [10] представляет собой упрощенный вариант фильтра Калмана, в отличие от которого

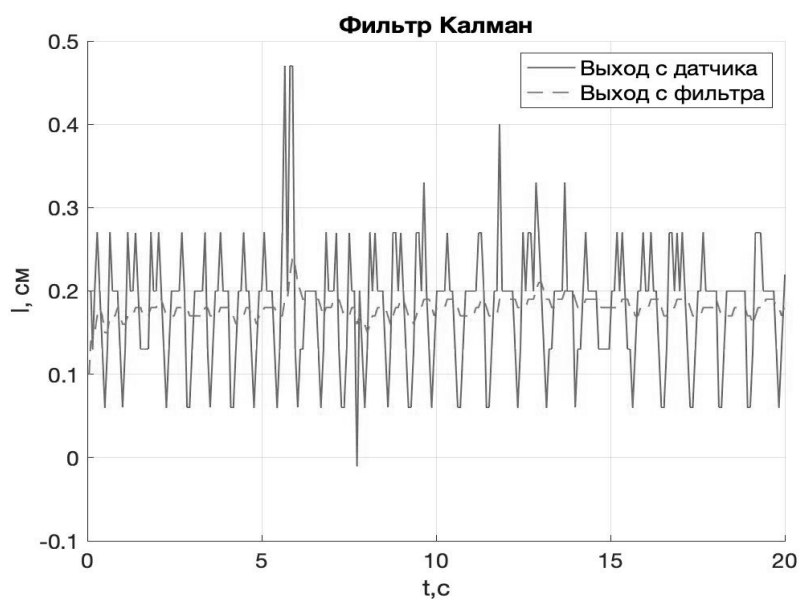


Рис. 5. Иллюстрация фильтрации выходного сигнала фильтром Калмана

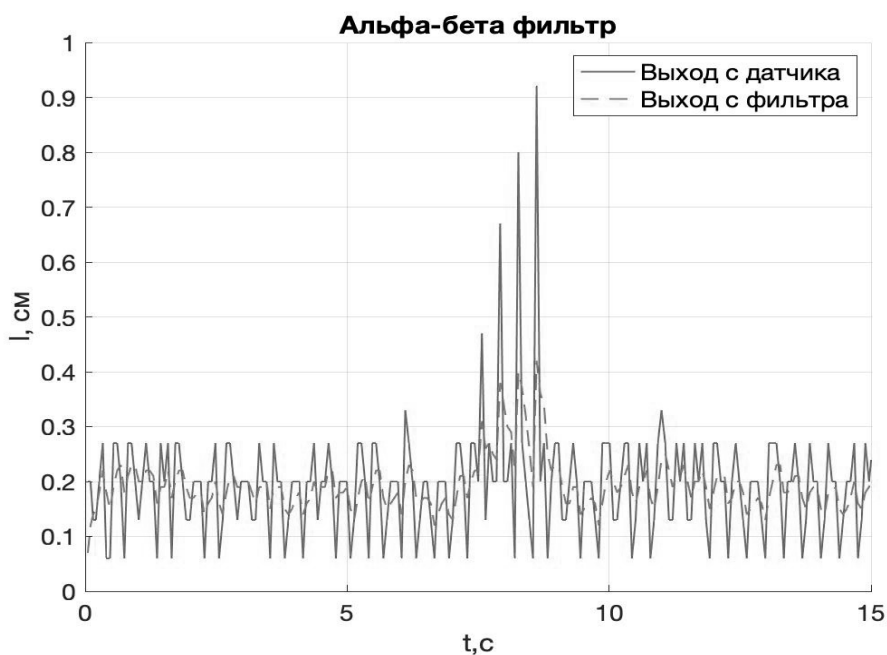


Рис. 6. Иллюстрация работы альфа-бета фильтра

при реализации не требуется знание детальной модели системы. В этом случае достаточно иметь аппроксимированную модель системы, которую определяют две переменные состояния: положение  $x$  и скорость  $v$ .

Предполагается, что скорость остается постоянной в течение малого промежутка времени  $\Delta T$  между

измерениями, т.е. ее прогнозируемое значение равно текущему,  $v_k = v_{k-1}$ . Наличие шума приводит к отличию выходного измерения от прогнозируемого, поэтому вводится ошибка прогнозирования  $r$ . С целью корректировки оценки положения и скорости используются специальные константы  $\alpha$  и  $\beta$ , при этом прогнозируемые значения определяются по соотношениям

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + \Delta T \cdot v_{k-1} + \alpha \cdot r_k, \\ v_k = v_{k-1} + \frac{\beta}{\Delta T} \cdot r_k. \end{cases}$$

Для сходимости и стабильной работы фильтра значения констант должны удовлетворять условиям:  $0 < \alpha < 1$ ,  $0 < \beta \leq 2$ ,  $(4 - 2\alpha - \beta) > 0$ . Отметим, что подавление шума возможно только в случае, когда  $0 < \beta < 1$ . Иллюстрация фильтрации выходного сигнала датчика с помощью альфа-бета фильтра представлена на рис. 6.

Фильтр неплохо справляется с поставленной задачей, однако значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  приходится корректировать экспериментально. Как правило, увеличение значений коэффициентов приводят к ускорению реакции на изменение значений, в то время как их уменьшение снижает уровень шума в оценках состояния.

## Заключение

Проведен сравнительный анализ возможностей различных программных фильтров при работе на реальном испытательном стенде с использованием ИК-датчика расстояния Sharp 2Y0A2. Показано, что наилучшую фильтрацию шума измерений в этой ситуации обеспечивает фильтр Калмана.

Разработана программная реализация фильтра, позволяющая задавать определенные настройки фильтрации: среднюю амплитуду шума, коэффициент, отвечающий за скорость изменения значений. При этом удается подавлять постоянный шум и уменьшать амплитуду случайных сигналов до 10 раз. Таким образом, фильтр Калмана может быть использован в системах, где требуется высокое быстродействие и точность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Формальский А.М. Управление движением неустойчивых объектов. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 232 с.
2. Trummer G. Distance measuring device and method for determining a distance. US: Mikrowellen-Technologie und Sensoren GmbH, 2008. 235 с.
3. Датчики / В.М. Шарапов, Е.С. Полищук, Н.Д. Кошевой, Г.Г. Ишанин, И.Г. Минаев, А.С. Совлуков. — Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2017. 624 с.
4. Семенов М.Е., Пигарев А.Е., Малинина А.А., Попов М.А. Система связанных маятников с управлением вертикальными осцилляциями. // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2019. № 12. С. 694–707.
5. Грибков В.А., Хохлов А.О. Прием, упрощающий решение задачи устойчивости параметрически стабилизируемых статически неустойчивых маятниковых систем. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 11. С. 29–38.
6. Корнилков А.Н., Липатников Н.Г., Хижняков Ю.Н. Разработка системы управления «Сегвей» на базе адаптивного нечеткого регулятора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2016. № 19. С. 124–132.
7. SHARP. Описание сенсора модели GP2Y0A02YK0F // Sheet No.: E4-A00101EN URL: [https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Infrared/gp2y0a02yk\\_e.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Infrared/gp2y0a02yk_e.pdf).
8. Steven W.S. Moving Average Filters // Digital Signal Processing A Practical Guide for Engineers and Scientist. 2013. № 15, С. 277–284.
9. Бардин Б.В. Обработка и представление данных // Научное приборостроение. 2011. № 3, С. 135–139.
10. Балакришнан А.В. Теория фильтрации Калмана. — Москва: Книга по Требованию, 2021. 164 с.

© Мелешкин Кирилл Николаевич ( kmeleshkin@mail.ru ), Худяков Дмитрий Сергеевич ( khud@mail.ru ).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»