

Использование дифференцирующего фильтра второго порядка для фильтрации сигналов акселерометра и определения производной

Д.С.Федоров, А.Ю. Ивойлов, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин
ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

Аннотация: Рассматривается вопрос фильтрации и определения первой производной сигналов с акселерометра ADXL335.

Ключевые слова: Акселерометр, ADXL335, фильтрация, дифференцирующий фильтр второго порядка, микроконтроллер.

ВВЕДЕНИЕ

Акселерометры широко распространены и применяются, в основном, для измерения проекций абсолютного линейного ускорения (необходимо для определения скорости и координаты движущегося устройства) и получения проекций гравитационного ускорения (что позволяет рассчитать величину отклонения от вертикали). Акселерометр формирует на выходе высокочастотный сигнал. При этом даже в состоянии покоя сигналы на его выходах имеют высокочастотную составляющую, что может быть проблемой в конкретной системе, использующей данное устройство, особенно если необходимо вычислять производную от этих сигналов. В статье рассмотрены особенности использования дифференцирующего фильтра второго порядка, реализованного на микроконтроллере, для фильтрации сигналов акселерометра и определения их первой производной. Эти особенности могут применяться для любых других датчиков, выход которых зашумлен.

ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЙ ФИЛЬТР

Дифференцирующий фильтр – это устройство, позволяющее получить оценку фильтруемой величины, а так же её производные. Рассмотрим его работу на примере дифференцирующего фильтра второго порядка. Структурная схема фильтра приведена на рис. 1. Данной структурной схеме соответствует дифференциальное уравнение:

$$y = T^2 \ddot{y}_0 + 2d T \dot{y}_0 + y_0$$

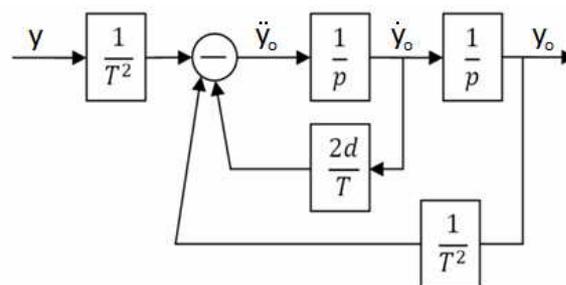


Рис. 1 Структурная схема фильтра, y - фильтруемый

сигнал, y_0 - его оценка $\dot{y}_0 = \frac{dy_0}{dt}$, $\ddot{y}_0 = \frac{d\dot{y}_0}{dt}$

На вход фильтра подается выходной сигнал объекта, на выходе можно получить оценку выходного сигнала объекта и ее первую производную. Теоретически, данный фильтр так же позволяет получить оценку второй производной (для этого необходимо взять сигнал с входа первого интегратора), но в силу зашумленности выходного сигнала объекта, качество получаемой оценки второй производной, как правило, неудовлетворительно. Для корректного определения n -й производной требуется дифференцирующий фильтр порядка $n + 1$ [1].

При построении фильтра необходимо правильно выбрать его параметры. Основными параметрами данного фильтра являются постоянная времени фильтра T и коэффициент демпфирования d . Первый параметр определяет длительность переходных процессов в фильтре, то есть, фактически, его быстродействие. Второй параметр определяет колебательность процессов в фильтре. Рекомендуется выбирать данный параметр в пределах 0.5 – 1. Величина постоянной времени фильтра определяется темпами процессов в объекте. Для корректного оценивания выходного сигнала объекта необходимо, чтобы постоянная времени фильтра была в 3 – 5 раз меньше, чем наименьшая постоянная времени объекта. Однако, следует помнить, что чем меньше значение постоянной

времени фильтра, тем хуже эффект от его применения. Таким образом, значение постоянной времени должно быть достаточно малым, чтобы задержка выходного сигнала фильтра была приемлемой, но в то же время достаточно большим, чтобы помехи выходного сигнала успешно сглаживались.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРА

Ниже приведены результаты моделирования дифференцирующего фильтра второго порядка в среде *MatLab*. На входной сигнал, накладывалась помеха типа “белый шум”. Моделирование показывает, какое влияние на процессы в фильтре оказывает значение постоянной времени. На *рис. 2* и *рис. 4* показаны графики сигнала и его оценки при различных значениях постоянной времени фильтра T и различной форме самого сигнала. На *рис. 3* и *рис. 5* – графики оценок производных сигнала.

Как видно из графиков, с увеличением постоянной времени T улучшается качество выходного сигнала, но в то же время, возрастает задержка между входом и выходом фильтра. В связи с дифференцированием входного сигнала, который зашумлен, происходит усиление высокочастотной составляющей. Эту составляющую эффективно подавляет дифференцирующий фильтр.

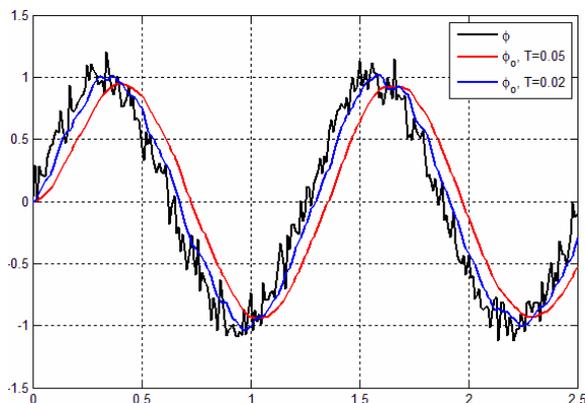


Рис. 2. Сравнение сигнала и его оценки при различных значениях T

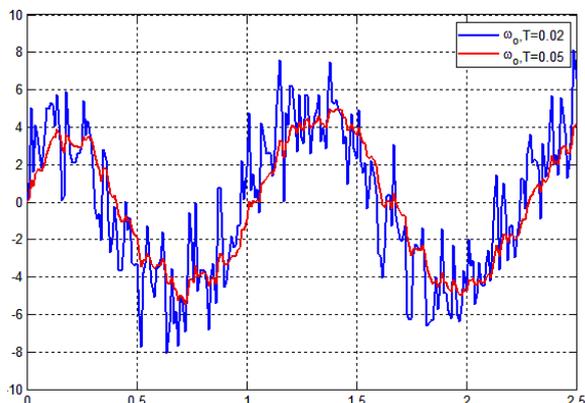


Рис. 3. Сравнение оценок производных сигнала при различных значениях T

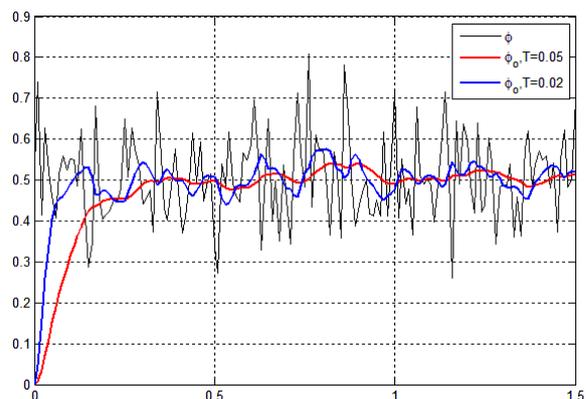


Рис. 4. Сравнение сигнала и его оценки при различных значениях T

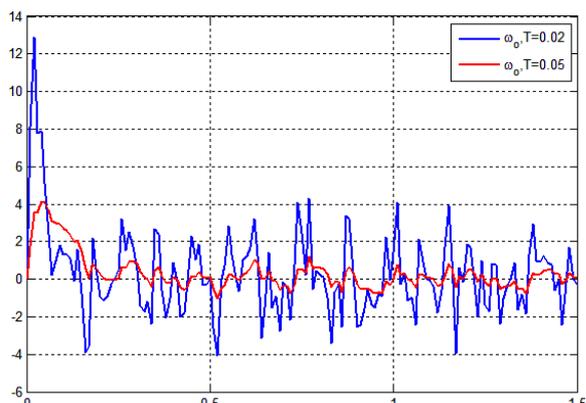


Рис. 5. Сравнение оценок производных сигнала при различных значениях T

РЕАЛИЗАЦИЯ ФИЛЬТРА

Наиболее простой способ реализации дифференцирующего фильтра второго порядка со структурой, описанной выше, состоит в замене операции интегрирования операцией суммирования:

$$y = \int_{t_1}^{t_2} \dot{y} dt \rightarrow y[k] = y[k-1] + dy[k] \times dt,$$

где $y[k-1]$ – значение фильтруемого параметра на предыдущем шаге, $y[k]$ – значение на текущем, $dy[k]$ – входной параметр интегратора (производная выходного сигнала) на текущем шаге, dt – шаг интегрирования. Фильтр второго порядка может быть реализован последовательным выполнением следующих операций:

$$d^2y_0[k] = \frac{y[k]}{T^2} - \frac{2d \cdot dy_0[k-1]}{T} - \frac{y_0[k-1]}{T^2},$$

$$dy_0[k] = dy_0[k-1] + d^2y_0[k] \cdot dt,$$

$$y_0[k] = y_0[k-1] + 2y_0[k] \cdot dt,$$

где, d^2y_0 – значение оценки второй производной, $d y_0$ – значение оценки первой производной, y_0 – значение оценки фильтруемой величины, y – значение фильтруемой величины, dt – шаг интегрирования.

В отличие от теоретической модели фильтра, в фильтре, реализованном на микроконтроллере, появляется еще один важный параметр, который необходимо правильно выбрать. Это шаг интегрирования. Основное правило при его выборе – шаг интегрирования должен быть меньше наименьшего параметра фильтра, то есть, постоянной времени. Для корректной работы фильтра необходимо, чтобы шаг интегрирования был меньше постоянной времени хотя бы в 3 раза.

Существует еще одна особенность при реализации фильтра на микроконтроллере. Большинство микроконтроллеров могут работать лишь с целочисленной арифметикой, поэтому, во избежание потерь данных при делении, необходимо выполнять сдвиг влево на несколько разрядов перед операцией деления (что эквивалентно умножению на 2 в некоторой степени), а по завершении всех операций, выполнять обратный сдвиг (эквивалентно делению).

Для работы в реальном времени, операции, приведенные выше, могут быть реализованы в виде функции, которая вызывается через интервалы времени, равные выбранному шагу интегрирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРА

Ниже представлены результаты применения дифференцирующего фильтра второго порядка для акселерометра *ADXL335*. Данный акселерометр выдает проекции результирующего ускорения на его оси чувствительности в виде аналогового сигнала (напряжения) [2]. Данный сигнал измеряется микроконтроллером *STM32F100RBT6B* с помощью встроенного АЦП. Это 12-разрядный АЦП с минимальным временем преобразования 1,2 мкс и погрешностью 2...5 МЗР [3]. Микроконтроллер расположен на отладочной плате *STM32VLDISCOVERY*. Внешний вид системы представлен на *рис. 6*. В её составе, помимо отладочной платы и акселерометра, присутствует *Bluetooth*-модуль *HC-05*, необходимый для передачи данных на ПК, на основе которых будут строиться графики. В управляющей программе микроконтроллера реализован дифференцирующий фильтр, который работает по алгоритму, описанному в предыдущем разделе. На графиках *рис. 7–10* представлены результаты обработки данных о проекции ускорения на одну из осей чувствительности акселерометра. Следует отметить, что данный метод фильтрации можно применить для аналоговых датчиков различного типа, сигнал которых зашумлен высокочастотной помехой.

На *рис. 7, 8* представлены результаты для случая, когда акселерометр находился во вращении. Данные графики позволяют оценить

влияние постоянной времени на быстродействие фильтра (динамику системы). Измерения проводились с шагом 1 мс. Как видно из графиков, при значениях постоянной времени фильтра $T = 20$ мс и $T = 5$ мс разброс значений выходного сигнала существенно меньше разброса входной величины (черная линия на графике). Однако качество оценки производной входного сигнала выше при значении постоянной времени 20 мс. Но в этом случае, быстродействие фильтра хуже.

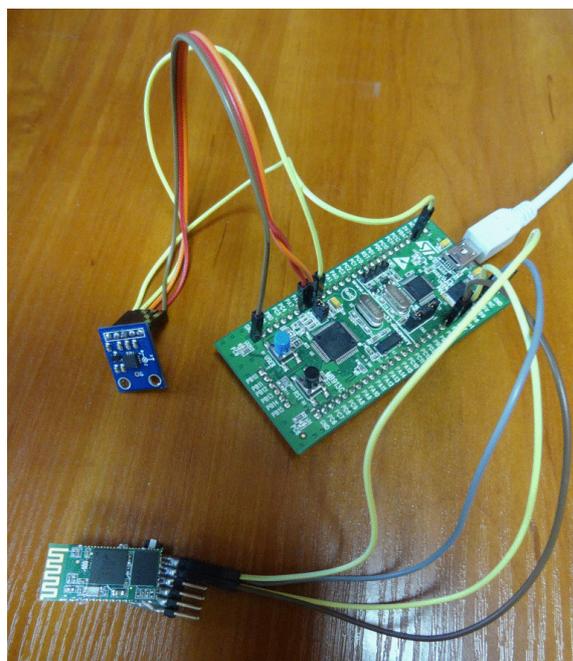


Рис. 6. Внешний вид системы

На *рис. 9, 10* представлены результаты для случая, когда акселерометр находился в состоянии покоя. Измерения проводились при тех же параметрах, что и в первом случае. Таким образом, можно сделать следующий вывод.

В случае если быстродействие системы не является критичным для конкретной задачи, постоянную времени фильтра можно выбирать относительно большой, по сравнению с шагом измерения. Это позволит существенно улучшить качество измеряемого сигнала и точнее оценить его производную. В случае же если быстродействие системы критично, необходимо выбрать компромиссное значение постоянной времени, при котором достигается приемлемое качество оценки измеряемого параметра и его производной.

В рассматриваемом примере представлены два крайних случая: при значении постоянной времени $T = 20$ мс достигается лучшее качество выходного сигнала, но быстродействие недостаточно, при $T = 5$ мс ситуация обратная.

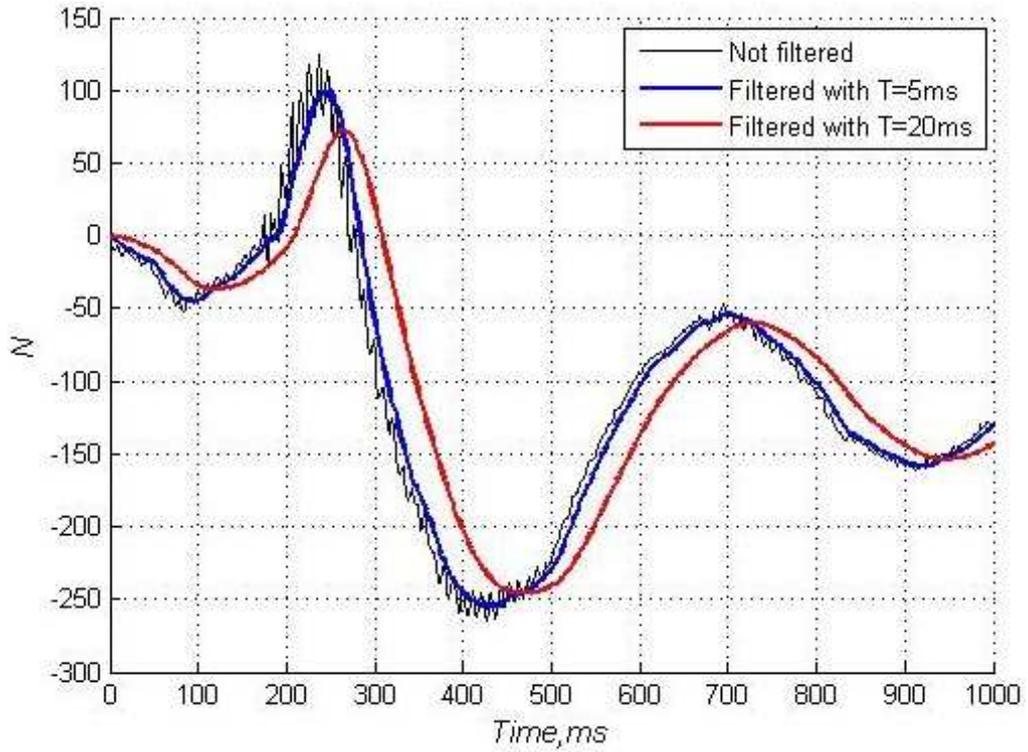


Рис.7. Проекция ускорения и ее оценка фильтром при вращении акселерометра

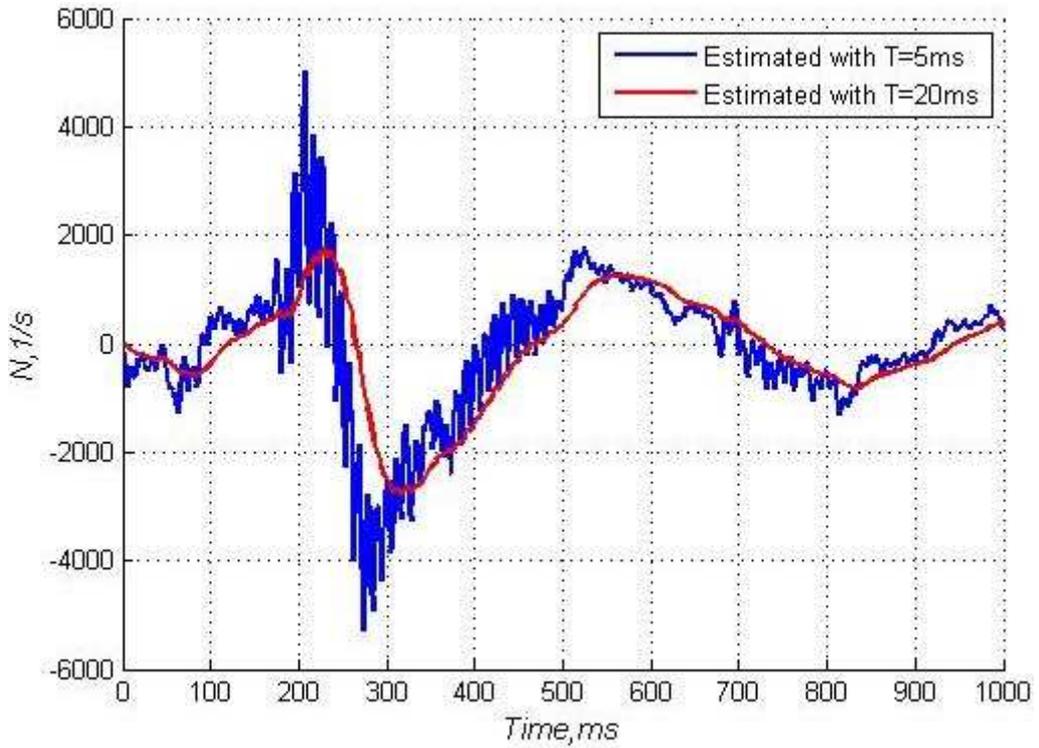


Рис. 8. Оценка производной проекции ускорения фильтром при вращении акселерометра

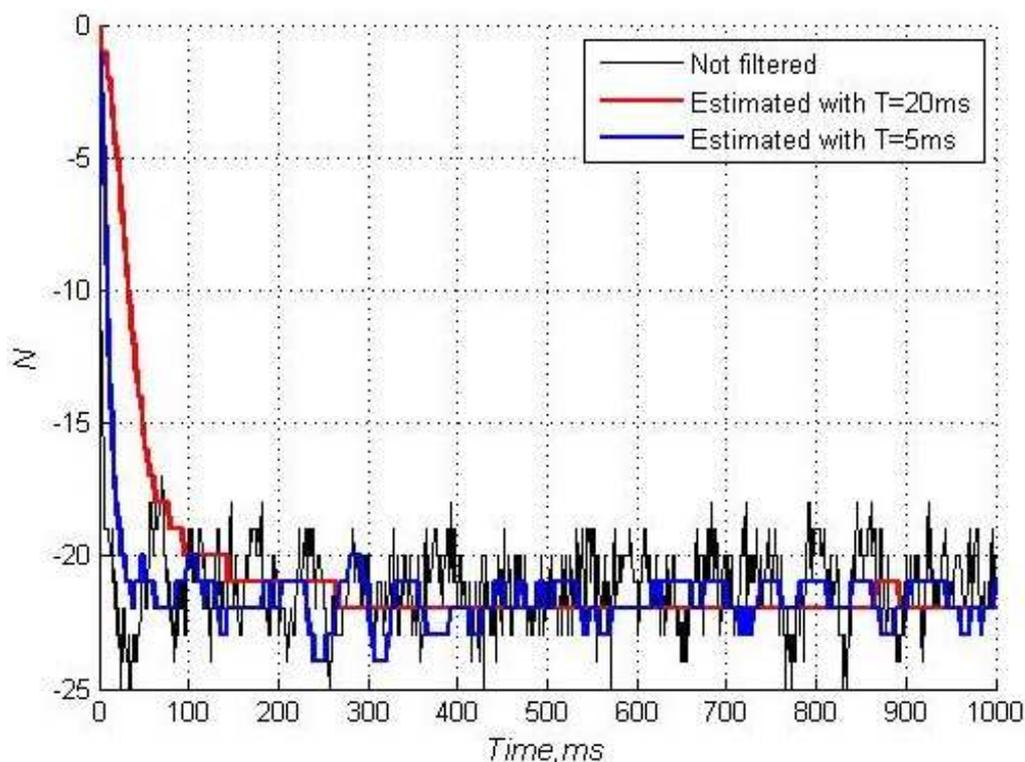


Рис. 9. Проекция ускорения и ее оценка фильтром при неподвижном акселерометре

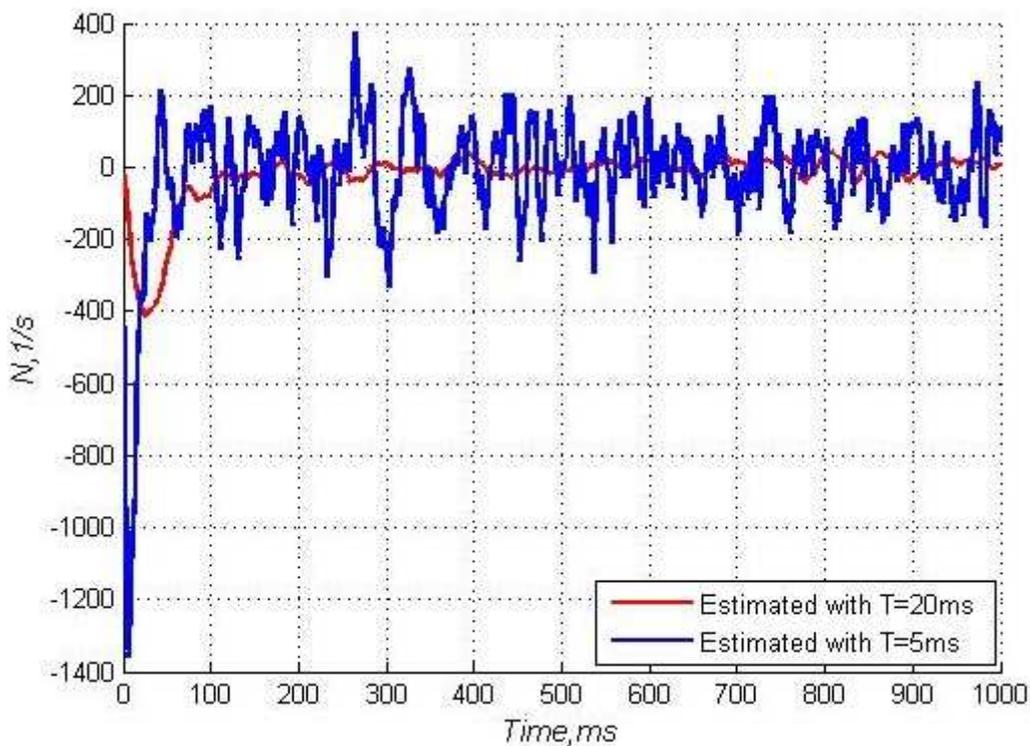


Рис. 10 Оценка производной проекции ускорения фильтром при неподвижном акселерометре

ВЫВОДЫ

Дифференцирующий фильтр второго порядка может эффективно подавлять высокочастотную составляющую сигнала, что позволяет получать оценку этого сигнала и его первую производную. Для определения второй производной необходим фильтр третьего порядка.

Параметр T – постоянная времени фильтра, выбирается исходя из требований к быстродействию и глубине подавления высокочастотной составляющей. Эта постоянная должна быть как минимум в 3-5 раз меньше минимальной постоянной времени объекта. При её увеличении улучшается качество выходного сигнала, но возрастает задержка между входным

и выходным сигналами фильтра

Параметр dt – шаг интегрирования, должен быть как минимум в 3 раза меньше постоянной времени фильтра.

При реализации фильтра на микроконтроллере необходимо использовать встроенный таймер для точного задания временных интервалов между выборками входного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Задача синтеза в теории регулирования: учеб. пособие / А.С. Востриков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 104 с.
- [2] Analog devices accelerometer ADXL335 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL335.pdf
- [3] STM32F100xx advanced ARM-based 32-bit MCUs[Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/reference_manual/CD00246267.pdf?s_searchtype=keyword



Ивойлов Андрей Юрьевич - магистрант кафедры Автоматики факультета АВТ НГТУ
E-mail: iau13hv@mail.ru



Федоров Дмитрий Сергеевич - Магистрант кафедры Автоматики факультета АВТ НГТУ
E-mail: fds0303@mail.ru



Вадим Аркадьевич Жмуд – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор более 350 научных статей, включая 30 патентов и программных продуктов, 14 учебных пособий, 1 монографии. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.
E-mail: oaonips@bk.ru



Виталий Геннадьевич Трубин - зав. лаб. кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика». Автор 18 научных статей. Область интересов – разработка специализированной электроники.
E-mail: trubin@ngs.ru

Using a Derivative Filter for Filtering of the Second Order Signal from the Accelerometer and the Calculating of Derivative

A.YU. IVOILOV, D.S. FEDOROV, V.A. ZHMUD,
V.G. TRUBIN

Abstract: The problem of filtration and determination of the first derivative of the signals from the accelerometer ADXL335 is resolved.

Key words: accelerometer, ADXL335, filtering, second-order derivative filter, microcontroller.