



Клец Д. М.

Харьковский
национальный
автомобильно-
дорожный
университет

УДК 629.017

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Розроблено методику адаптивної фільтрації експериментальних даних, одержуваних за допомогою акселерометрів в процесі динамічних випробувань колісних машин.

A method for adaptive filtering of experimental data obtained by the accelerometers during dynamic testing of wheeled vehicles is developed.

Постановка проблемы. При проведении динамических испытаний колесных машин с использованием акселерометров возникают случайные и систематические погрешности измерения линейных ускорений. Влияние температуры, отклонение осей чувствительности акселерометра от осей заданной системы координат, вибрация двигателя, а также собственные шумы датчика весьма затрудняют снятие требуемого сигнала. При одновременной установке нескольких акселерометров в различных местах салона автомобиля и необходимости сопоставления показаний датчиков задача еще более усложняется. В связи с этим, снижение погрешностей и неопределённости результата измерений путем фильтрации является актуальной научно-практической задачей.

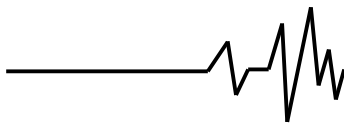
Анализ последних исследований и публикаций. ДСТУ 3310-96 [4], а также ГОСТ Р 52302-2004 [2] предъявляют довольно жесткие требования к точности измерений при оценке устойчивости и управляемости дорожных транспортных средств. Требования к точности измерения некоторых параметров, которые можно определять с помощью мобильного регистрационно-измерительного комплекса на базе акселерометров [6], приведены в табл. 1.

В работе [8] указывается, что шум, содержащийся в выходном сигнале акселерометра, определяет разрешающую способность устройства, важную при определении малых ускорений.

Таблица 1
Требования к точности измерений [4]

Измеряемые параметры	Диапазон измерений	Ошибка, не более	
		абсолютных единиц	относительных единиц (%)
Скорость ДТС, км/ч	5-150	–	±0,5
Угловая скорость ДТС, градус/с	±45	±0,5	±1,0
Боковое ускорение, м/с ²	±7	±0,15	±1,0
Время, с	–	±0,01	–
Температура, °С	–	±1,0	–

Предельное разрешение в основном определяется уровнем шума измерения, который включает внешний фоновый шум и шум собственно датчика. Уменьшение полосы пропускания путем включения ФНЧ на выходе датчика приводит к снижению уровня шума. Это улучшает отношение сигнал/шум и увеличивает разрешающую способность, однако вносит амплитудные и фазовые частотные искажения [8]. При обработке зашумленных входных сигналов применяют как традиционные системы, которые работают по



принципу разомкнутого контура, например, согласованные фильтры, так и адаптивные устройства, действующие по принципу замкнутого контура [5]. Традиционные методы обработки сигнала целесообразно применять, когда искажение сигнала является известным и инвариантным по времени [5]. Если искажения сигнала описать заранее невозможно или они могут меняться в процессе снятия показаний, целесообразно применять адаптивные фильтры. Обобщенная схема адаптивного фильтра приведена на рис. 1.

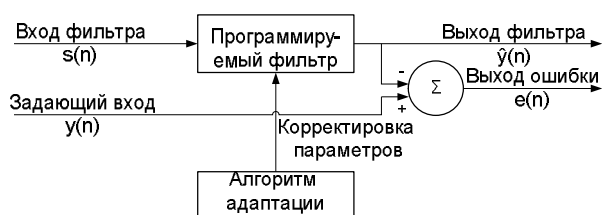


Рис. 1. Блок-схема адаптивного фильтра [5]

На сегодняшний день на практике нашли широкое применение оптимальный фильтр Винера, алгоритм LMS (наименьших средних квадратов), алгоритм RLS (рекурсивный метод наименьших квадратов), а также фильтр Калмана. Таким образом, представляет интерес применение адаптивной фильтрации экспериментальных данных.

Цель исследования. Целью исследования является разработка методики адаптивной фильтрации экспериментальных данных, получаемых с помощью акселерометров в процессе динамических испытаний колесных машин. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить экспериментальное определение ускорений колесных машин;
- применить адаптивный алгоритм для фильтрации полученного сигнала.

Изложение основного материала исследований. В качестве объекта эксперимента выберем автомобиль ЗАЗ-1103 "Славута". С помощью мобильного регистрационно-измерительного комплекса [7], разработанного автором совместно с сотрудниками кафедры ТМ и РМ ХНАДУ, а также кафедры Тракторов и автомобилей ХНТУСХ им. П. Василенко, в процессе движения испытуемого автомобиля сняты его продольные ускорения и линейная скорость (см. рис. 2). Интенсивный разгон испытуемого автомобиля выполнен на ровном, горизонтальном участке автомагистрали Харьков-Красноград-Перещепино.

Коэффициент сцепления колес с дорогой согласно данным справочника [1] составлял 0,75-0,8. Скорость ветра в день проведения эксперимента – до 3 м/с.

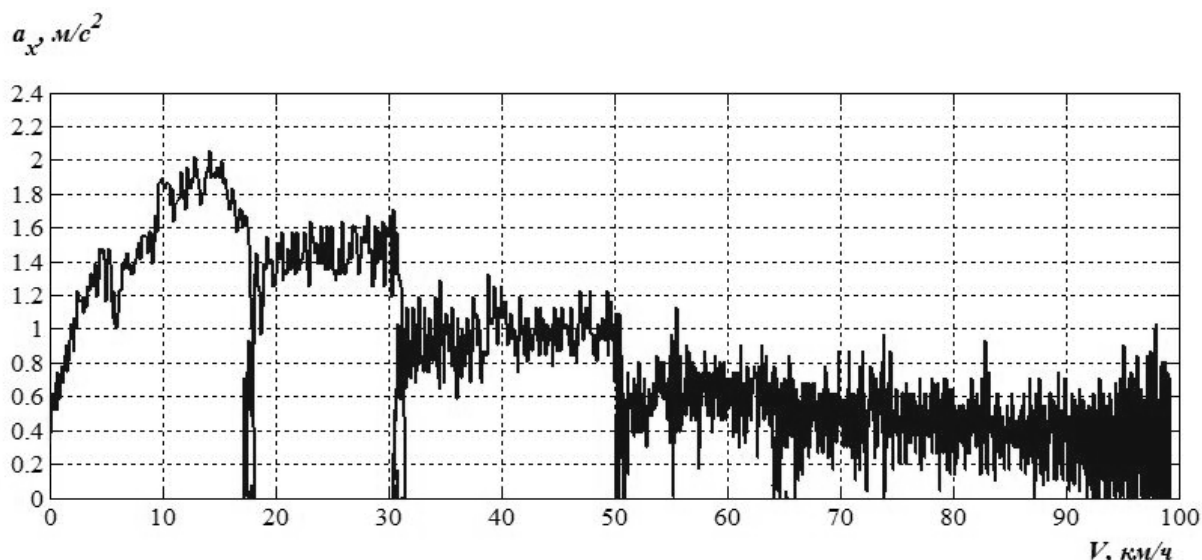
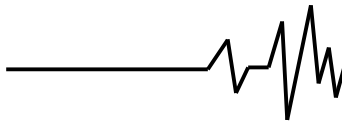


Рис. 2. Экспериментальная зависимость продольных ускорений от скорости движения автомобиля ЗАЗ-1103 "Славута"

Как видно из рис. 2, несмотря на хорошие дорожные условия, снятые данные значительно зашумлены, особенно при скоростях движения автомобиля свыше

90 км/ч. Дальнейшее использование таких данных, например, при оценке устойчивости движения в тяговом режиме, может привести к



погрешности $\pm 0,4 \text{ м/с}^2$, что составляет 5,71% от 7 м/с^2 .

Выполним фильтрацию полученного сигнала с помощью пакета Matlab. В качестве алгоритма обработки сигнала используем адаптивный фильтр Калмана, который реализуется с помощью встроенной функции "adaptkalman" панели Filter Design Toolbox.

Синтаксис вызова указанной функции имеет следующий вид

$$Y = \text{adaptkalman}(X, D, S), \quad (1)$$

где X – вектор входных данных, в нашем случае – экспериментальные значения продольных ускорений a_x ;

D – вектор образцового сигнала, т.е. результаты тягового расчета $a_{x \text{ огиб}}$;

S – структура с параметрами алгоритма и настройками фильтра, в т.ч. ожидаемый сигнал ошибки;

Y – выходной сигнал, т.е. сглаженные данные a_{FK} .

Выполним классический тяговый расчет, в результате которого получим теоретическую зависимость продольных ускорений $a_{x \text{ расч}}$ от скорости движения испытуемого автомобиля. При сравнении экспериментальной зависимости a_x с теоретической $a_{x \text{ расч}}$, последняя дает бо́льшие значения ускорений. Это говорит о том, что экспериментальный заезд выполнялся со степенью открытия дроссельной заслонки менее 100%. Действительно, подстановка в теоретический расчет коэффициента использования мощности 0,82 дает хорошую сходимость экспериментальных и теоретических значений продольных ускорений автомобиля. Для использования расчетных значений в качестве образцового сигнала фильтра, построим

огигающую линию с учетом неполного использования мощности (см. рис. 3).

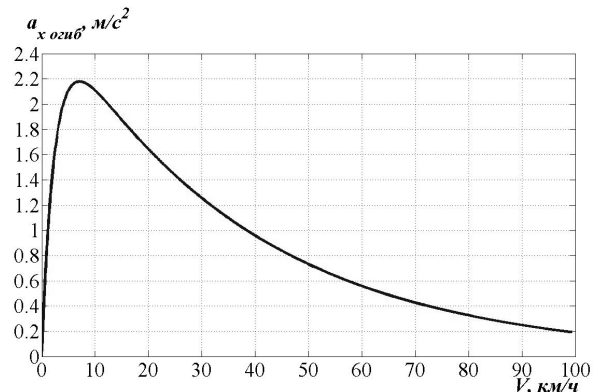


Рис. 3. Расчетная зависимость продольных ускорений от скорости движения автомобиля ЗАЗ-1103 "Славута" при коэффициенте использования мощности 0,82

Особое внимание заслуживает ожидаемый сигнал ошибки фильтрации. С учетом того, что датчики на испытуемом автомобиле закреплялись в 2-х местах – в багажнике и под капотом, на показания последнего значительное влияние оказывали вибрации двигателя. В связи с этим, отдельно были выполнены замеры вибрации двигателя на различных режимах его работы с помощью микромеханических датчиков ДЛШ, предварительно прошедших поверку в институте проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины [3]. На рис. 4 в качестве примера показаны вибрации, возникающие от двигателя автомобиля ЗАЗ-1103 на холостом ходу. Датчик ДЛШ № 29069204 был закреплен под капотом (см. рис. 5 б,в), а датчик ДЛШ № 29093114 в багажнике (см. рис. 5 г).

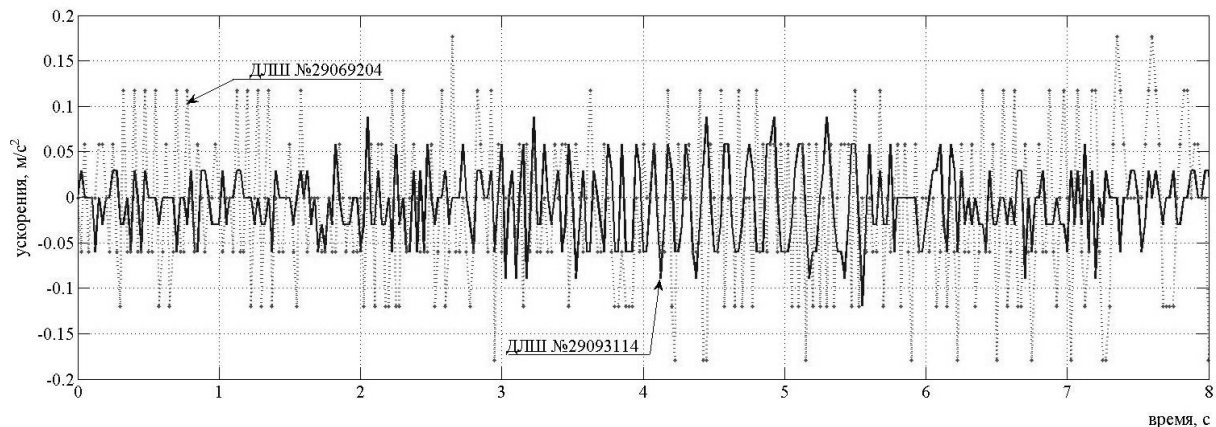


Рис. 4. Вибрации от двигателя испытуемого автомобиля в режиме холостого хода, замеренные в различных точках кузова

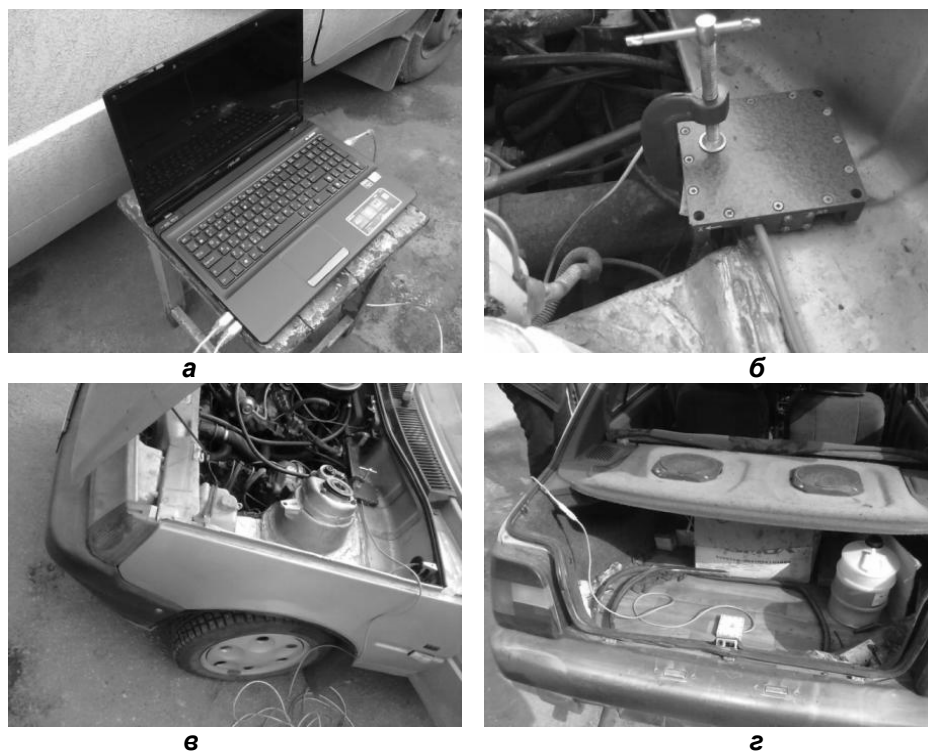
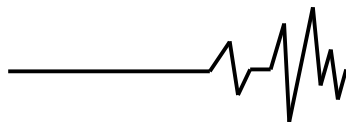


Рис. 5. Установка измерительной аппаратуры на испытуемый автомобиль: а – ноутбук с установленным ПО; б, в – крепеж датчика ДЛШ под капотом; г – установка датчика ДЛШ в багажнике

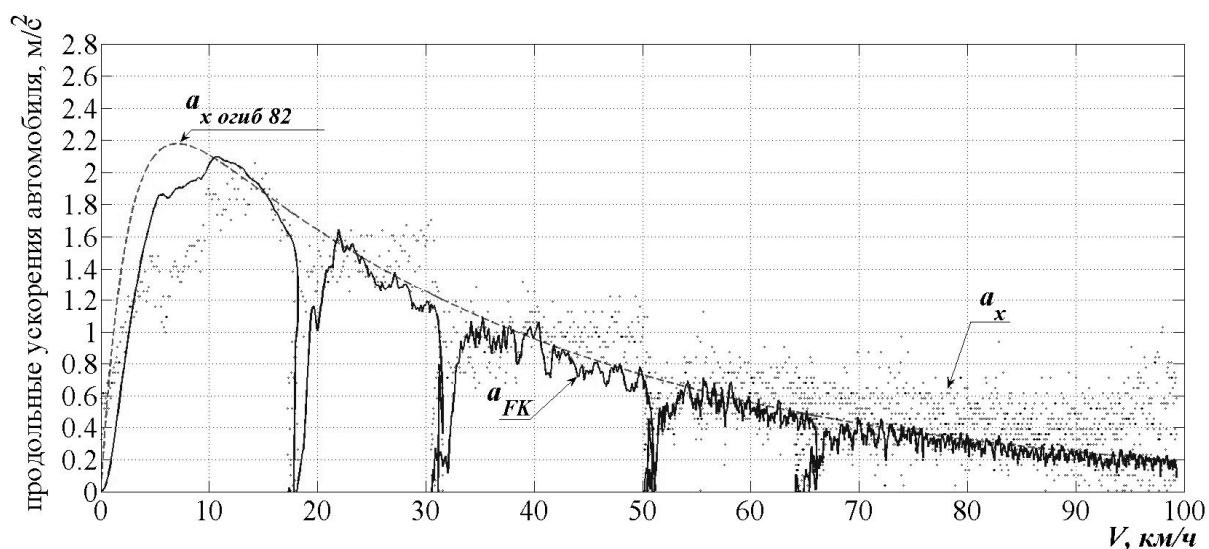
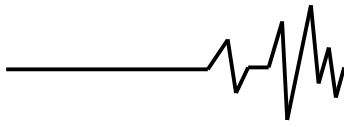


Рис. 6. Продольные ускорения испытуемого автомобиля

Анализ рис. 4 показывает, что при работе двигателя на холостом ходу виброускорения составляют $0,1 \text{ м/с}^2$, что дает погрешность сигнала величиной $1,43\%$ от 7 м/с^2 . При работе двигателя в режиме нагрузки, вибрации и соответственно погрешность измерения значительно возрастают. В то же время согласно требованиям ДСТУ 3310-96 [4], погрешность измерения ускорений должна не превышать 1% . Следовательно, вибрации от

двигателя необходимо учитывать при очистке сигнала от шумов. Таким образом, в качестве ожидаемого (известного нам) сигнала ошибки использовались виброускорения, возникающие от двигателя испытуемого автомобиля.

Используя описанные выше настройки фильтра, в пакете Matlab был реализован алгоритм Калмана. На рис. 6 приведена зависимость экспериментальных значений продольных ускорений a_x , расчетных значений



$a_{x\text{ осей}}$ при использовании мощности на 82 %, а также отфильтрованных данных a_{FK} от времени движения испытуемого автомобиля.

Анализ рис. 6 показывает, что применение адаптивного фильтра с учетом шумов от вибраций двигателя снижает погрешность входного сигнала в 8 раз (до $\pm 0,05 \text{ м/с}^2$, что составляет 0,71 % от 7 м/с^2) по сравнению с неотфильтрованным входным сигналом (погрешности $\pm 0,4 \text{ м/с}^2$, что составляет 5,71% от 7 м/с^2).

Выводы

1. Влияние температуры, отклонение осей чувствительности акселерометра от осей заданной системы координат, вибрация двигателя, а также собственные шумы датчика весьма затрудняют снятие требуемого сигнала при проведении динамических испытаний колесных машин. Погрешность может достигать $0,4 \text{ м/с}^2$ и более, что составляет 5,71% от 7 м/с^2 .

2. При работе двигателя на холостом ходу виброускорения составляют $0,1 \text{ м/с}^2$, что дает погрешность сигнала величиной 1,43% от 7 м/с^2 . При работе двигателя в режиме нагрузки, вибрации и соответственно погрешность измерения значительно возрастают.

3. Применение адаптивного фильтра с учетом шумов от вибраций двигателя снижает погрешность входного сигнала до 8 раз (до $\pm 0,05 \text{ м/с}^2$, что составляет 0,71 % от 7 м/с^2) по сравнению с неотфильтрованным входным сигналом.

Література

1. Автомобильный справочник Bosch / [пер. с англ. Г.С. Дугин]. – Москва: За рулем, 1999. – 895 с. – (Первое издание на русском языке).

2. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний : ГОСТ Р 52302-2004, – [Дата введения в действие 01.01.2006]. – М. : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2005. – 56 с. – (Национальный стандарт РФ).

3. Артьомов М.П., Клец Д.М. Динамічні випробування датчиків прискорень на лабораторному вібростенді / М.П. Артьомов, Д.М. Клец // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». – 2012. – № 2 (66) – С. 5-9.

4. Засоби транспортні дорожні. Стійкість. Методи вивчення основних параметрів випробуваннями : ДСТУ 3310-96, – [Чинний від 01.01.1997]. – К. : Держстандарт України, 1996. – 13 с. – (Національні стандарти України).

5. Коуэн К.Ф., Грант П.М. Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / Под ред. К. Ф. Коуэна и П. М. Гранта. – М.: Мир, 1988. – 392 с.

6. Метод парциальных ускорений и его приложения в динамике мобильных машин / [Н.П. Артемов, А.Т. Лебедев, М.А. Подригало, А.С. Полянский, Д.М. Клец, А.И. Коробко, В.В. Задорожня] – Харьков: изд-во «Міськдрук», 2012. – 220 с.

7. Пат. 51031 Україна, МПК G01P 3/00 25.06.2010. Система для визначення параметрів руху автотранспортних засобів при динамічних (кваліметричних) випробуваннях / Подригало М. А., Коробко А.И., Клец Д. М., Файст В.Л.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. університет. - № и 2010 01136; заявл. 04.02.10 ; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12.

8. Шевцов С.М., Ереско С.П. Измерительные преобразователи вибрационных процессов / С.М. Шевцов, С.П. Ереско // Вестник БрГУ «Системы. Методы. Технологии». – 2012. – Вып. 3 (7). – С. 42-49.