

УДК 629.017

Д. М. КЛЕЦ, канд. техн. наук, доц. ХНАДУ

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ,
ПОЛУЧЕННЫХ В ХОДЕ ИСПЫТАНИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН,
С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРА БАТТЕРВОРТА**

Предложен метод повышения точности обработки экспериментальных данных, полученных с использованием датчиков линейного ускорения в ходе дорожных испытаний мобильных машин, с помощью низкочастотного фильтра Баттерворта.

Ключевые слова: мобильная машина, испытания, акселерометр, точность, фильтр Баттерворта.

Введение. Основной целью дорожных испытаний мобильных машин является экспериментальное определение их технических характеристик в реальных условиях эксплуатации. Определение эксплуатационных свойств колесных машин на всем протяжении их жизненного цикла оптимально с применением современных мобильных регистрационно-измерительных комплексов, чувствительными элементами которых могут служить микромеханические инерциальные датчики (акселерометры). Использование акселерометров специалистами, занимающимися испытанием транспортных средств, носит повсеместный характер вследствие простоты их установки [6]. Различные методы фильтрации полученных данных могут оказать существенное влияние на конечные результаты [6]. Следовательно, представляет интерес разработка метода повышения точности обработки экспериментальных данных, полученных с помощью датчиков линейного ускорения.

Анализ последних достижений и публикаций. Фильтром называют частотно-избирательное устройство, которое пропускает сигналы определенных частот и задерживает или ослабляет сигналы других частот. Фильтры могут быть классифицированы по ряду признаков [5]. По виду АЧХ они подразделяются на фильтры нижних частот, верхних частот, полосовые, режекторные и фазовые. В зависимости от полиномов, используемых при аппроксимации передаточной функции, различают фильтры критического затухания, Бесселя, Баттерворта, Чебышева. По элементной базе фильтры разделяются на пассивные и активные. Вопросам фильтрации экспериментальных данных посвящены работы [1-3, 5-7, 9-11, 14, 15] отечественных и зарубежных ученых. На практике широко применяются методы фильтрации Чебышева, Баттерворта, Бесселя и критического затухания. На рис. 1 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) указанных фильтров нижних частот (ФНЧ).

Для обеспечения последовательности и повторяемости результатов испытаний должны использоваться одни и те же протоколы фильтрации и обработки. В работе [6] рекомендуется следующий протокол фильтрации для всех каналов (за исключением угла поворота рулевого колеса и угловой скорости рулевого колеса) – использование ФНЧ Баттерворта [6]. АЧХ фильтра Баттерворта близка по форме к прямоугольной характеристике идеального фильтра и определяется из следующего выражения [11]

$$A_B(\omega) = |W_B(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 + T\omega)^{2n}}}, \tag{1}$$

© Д. М. Клец, 2012

где n – порядок фильтра;

ω – частота среза,

T – постоянная времени фильтра Баттерворта.

На практике обычно используют фильтры с порядком $n = 2 \dots 8$ [11]. Как видно из рис. 1, АЧХ ФНЧ Баттерворта имеет довольно длинный горизонтальный участок и резко падает за частотой среза. Переходная характеристика такого фильтра при ступенчатом входном сигнале имеет колебательный характер. С увеличением порядка фильтра колебания усиливаются [5]. Увеличение числа полюсов (порядка фильтра) дает возможность сделать более плоским участок характеристики в полосе пропускания и увеличить крутизну спада от полосы пропускания к полосе подавления [15].

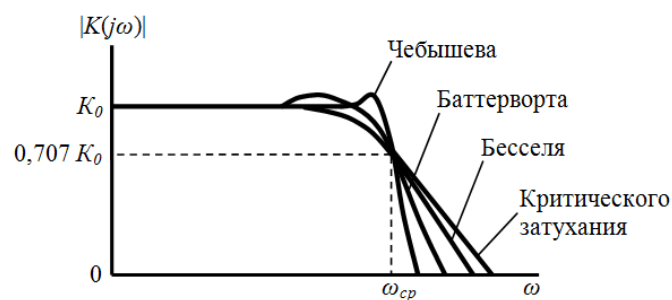


Рисунок 1 – АЧХ фильтров нижних частот

В работе [14] указывается, что Фильтр Баттерворта любого порядка устойчив. Это значит, что при настройке системы автоматического регулирования (САР) на модульный оптимум на основе фильтра Баттерворта, нет необходимости проверять ее устойчивость. Более того, САР при этом оказывается оптимизированной по точности и быстродействию [14]. Автор работы [13] предлагает проведение исследований, связанных с фильтрацией данных, в вычислительной среде MATLAB, в которой содержится большое число встроенных функций, позволяющих выполнять цифровую обработку сигналов и, в частности, моделировать процессы фильтрации. Функция пакета Signal Processing Toolbox «butter» позволяет синтезировать аналоговые и дискретные фильтры Баттерворта нижних частот, верхних частот, полосовые и режекторные и имеет в простейшем виде следующий синтаксис

$$[b, a] = \text{butter}(n, Wn). \quad (2)$$

Указанная функция производит синтез дискретного фильтра Баттерворта n -го порядка, имеющего АЧХ фильтра нижних частот и нормированную частоту среза Wn . Функция возвращает описание фильтра в виде векторов-строк b и a , имеющих длину $n+1$ и содержащих коэффициенты полиномов числителя и знаменателя функции передачи в порядке убывания степеней переменной z

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{1 + a(2)z^{-1} + \dots + a(n+1)z^{-n}}. \quad (3)$$

Частотой среза фильтра Баттерворта называется частота, на которой модуль коэффициента передачи равен $\sqrt{1/2}$. Функция «butter» использует значение частоты среза Wn , нормированное к частоте Найквиста (π радиан на отсчет). Таким образом, нормированное значение частоты среза Wn должно лежать в пределах от 0 до 1, при этом 1 соответствует частоте Найквиста (то есть половине частоты дискретизации) [4].

Основная функция, реализующая процедуру дискретной одномерной фильтрации в MATLAB, носит имя «filter» и имеет следующий синтаксис

$$y = \text{filter}(b, a, x), \quad (4)$$

где x и y - это векторы входного и выходного сигналов соответственно.

Функция, заданная выражением (4) фильтрует сигнал, заданный в виде одномерного массива x , используя дискретный фильтр, описываемый конечно-разностными уравнениями вида [4]

$$y(n) = b(1) \cdot x(n) + b(2) \cdot x(n-1) + \dots + b(nb+1) \cdot x(n-nb) - a(2) \cdot y(n-1) - \dots - a(na+1) \cdot y(n-na). \quad (5)$$

Алгоритм работы фильтра приведен на рис. 2 [3].

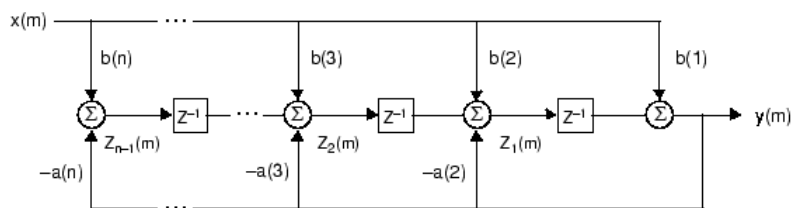


Рисунок 2 – Алгоритм работы фильтра

В работе [9] исследуется применение фильтра Калмана для устранения шумов от вибраций двигателя при обработке экспериментальных данных, полученных с датчиков линейного ускорения. Однако для адаптации мобильного регистрационно-измерительного комплекса к проведению динамических испытаний колесных машин в стандарте [6] рекомендуется использование фильтра Баттерворта. Таким образом, вопрос синтеза указанного фильтра с помощью ЭВМ для обработки выходного сигнала акселерометров требует дополнительного исследования.

Цель и постановка задачи. Целью исследования является разработка метода фильтрации данных, получаемых с помощью акселерометров с использованием фильтра Баттерворта в процессе экспериментальной оценки эксплуатационных свойств колесных машин.

Синтез фильтра Баттерворта. Методика обработки данных, приведенная в Глобальных технических правилах № 8 [6], включает требования к методам фильтрации данных, поскольку различные методы фильтрации могут оказать существенное влияние на конечные результаты. В частности, рекомендуется использование низкочастотного фильтра Баттерворта, а также выставление на ноль отфильтрованных данных [6]. Выставление на ноль выполняется с целью устранения

смещения сигнала датчика с использованием статических данных, зарегистрированных до испытания. Метод регистрации статистических данных перед проведением испытаний предложен автором в работе [8]. Использование указанных методов фильтрации и обработки данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, обеспечит повторяемость их результатов. Проверка эффективности электронных систем курсовой устойчивости автомобилей согласно требованиям [6] должна выполняться по схеме, приведенной на рис. 3. Акселерометр для определения боковых ускорений рекомендуется устанавливать как можно ближе к точке расположения продольного и поперечного центров тяжести транспортного средства.

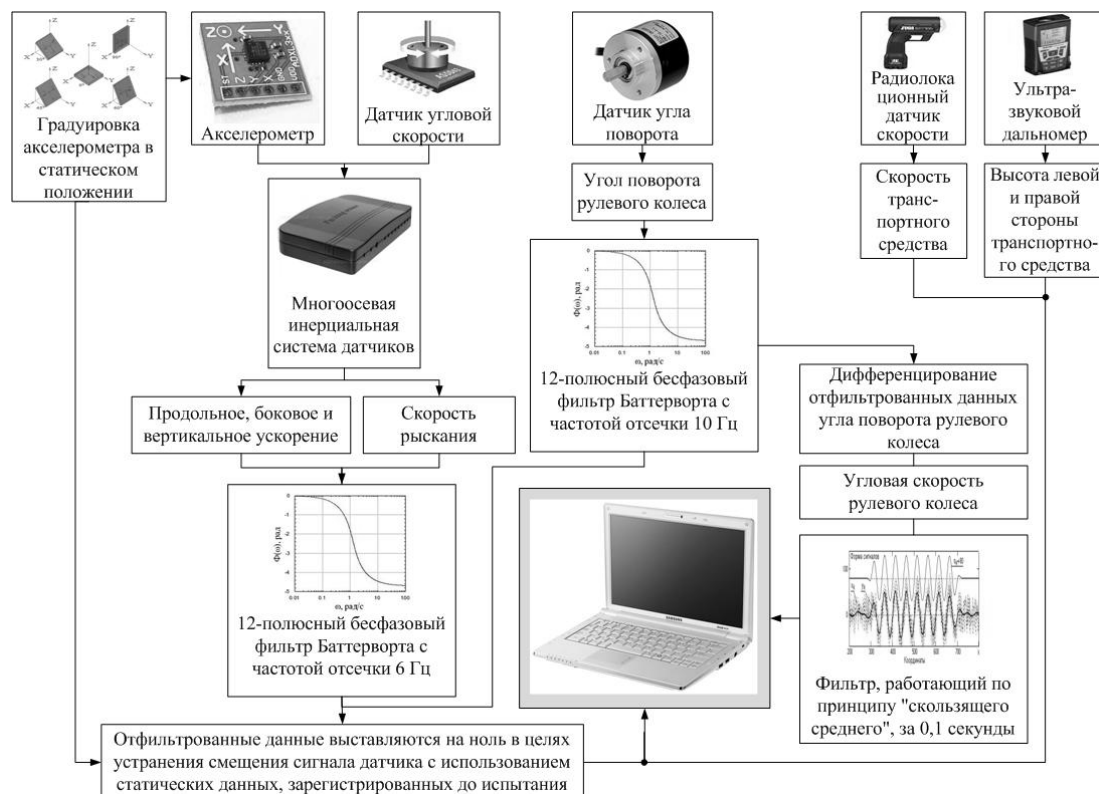


Рисунок 3 – Схема проверки эффективности ЭКУ автомобилей

Выполним фильтрацию полученных экспериментально с помощью мобильного регистрационно-измерительного комплекса [12] ускорений автомобиля ЗА3-1103 "Славута" в пакете Matlab. В качестве алгоритма обработки сигнала используем фильтр Баттерворта, который реализуется с помощью встроенной функции «butter». Синтаксис вызова процедуры примет следующий вид

$$[b,a] = \text{butter}(2,0.05); \quad y = \text{filter}(b,a, \text{accel}), \quad (6)$$

где *accel* – массив, содержащий значения выходного сигнала акселерометра.

В данном случае синтезирован ФНЧ второго порядка с частотой отсечки 0,05, нормированной к частоте Найквиста. Зашумленный (необработанный) сигнал и отфильтрованные данные вместе с результатами их статистического анализа приведены на рис. 4.

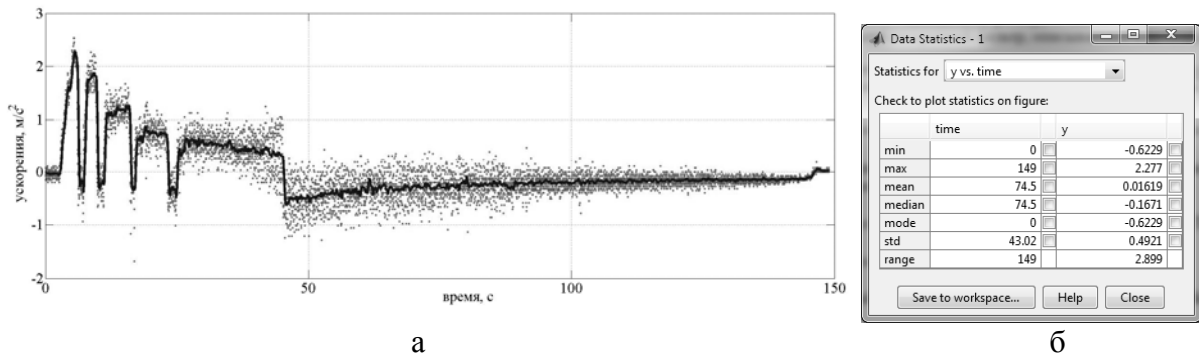


Рисунок 4 – Результаты фильтрации экспериментальных данных в пакете MATLAB: а – исходный (зашумленный) и отфильтрованный сигнал акселерометра; б – результаты статистического анализа отфильтрованного сигнала

Для автоматизации обработки получаемых с акселерометров данных удобно использовать свободно распространяемое программное обеспечение (ПО) "Фильтр Баттерворта" [7] с открытым исходным кодом. Алгоритм работы данной программы основан на дискретном преобразовании Фурье, которое широко применяется в статистике, при анализе временных рядов. На рис. 5 приведен внешний вид диалоговых окон ПО "Фильтр Баттерворта" при обработке данных экспериментального заезда автомобиля ЗАЗ-1103 "Славута".

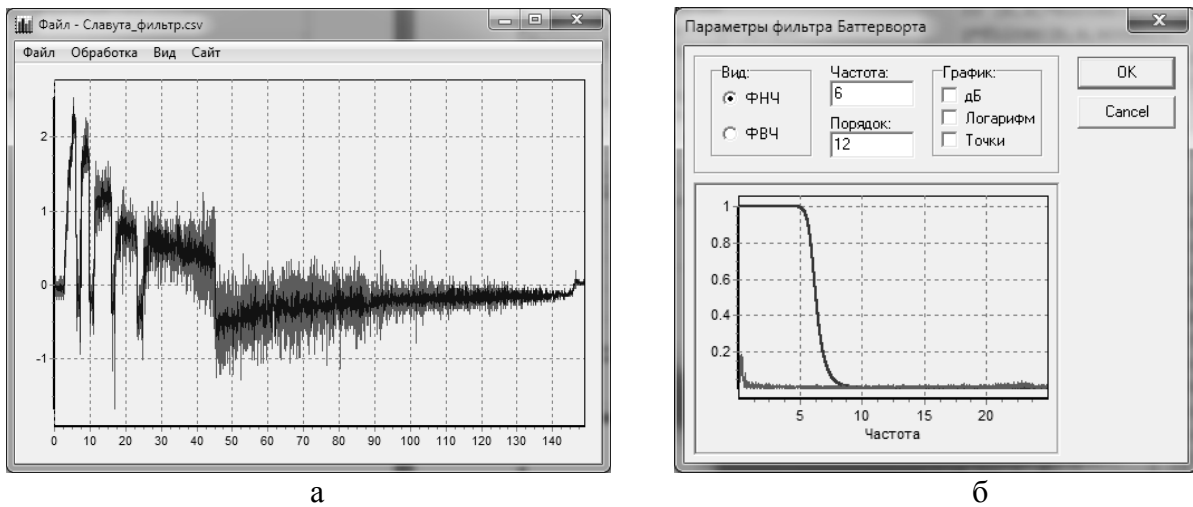


Рисунок 5 – Результаты фильтрации экспериментальных данных в ПО "Фильтр Баттерворта": а – импорт выходных данных акселерометра и результаты фильтрации; б – настройка параметров фильтра согласно требованиям [6]

Анализ рис. 5 показывает, что использование ФНЧ Баттерворта 12-го порядка с частотой отсечки 6 Гц согласно требованиям [6] приводит к снижению уровня шума исходного сигнала. Для оценки результата фильтрации рассмотрим в увеличенном масштабе часть рис. 5 на небольшом интервале, например в пределах 42...45 с (см. рис. 6).

Статистическая обработка полученных графиков (табл. 1) свидетельствует о меньшем среднем квадратичном отклонении (0,113 вместо 0,4221), а также меньшем разбросе (0,5245 вместо 1,716) величин сигнала после фильтрации. Среднее значение сигнала практически не изменилось и составляет около 0,35 м/с² на указанном участке.

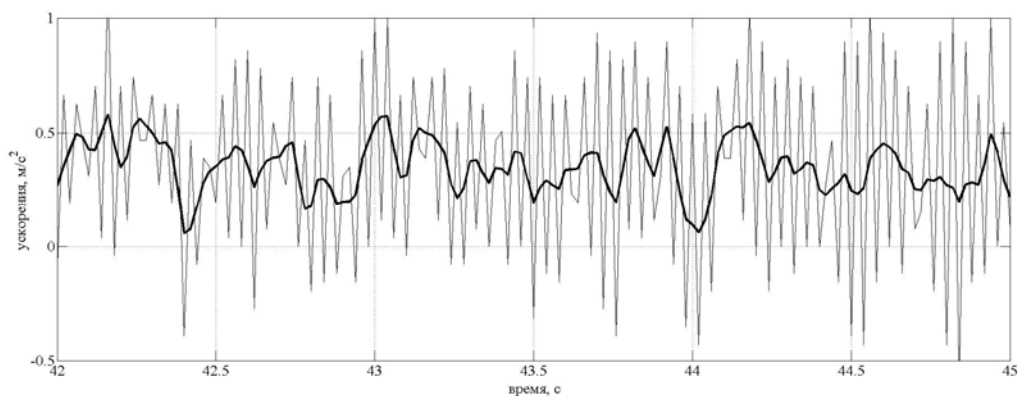


Рисунок 6 – Результати фільтрації вихідного сигналу акселерометра

Таблиця – Результати статистическої обробки сигналу акселерометра

| Параметр розподілення | Неотфільтрований сигнал | Отфільтрований сигнал |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Мінімальне значення | -0,5863 | 0,05696 |
| Максимальне значення | 1,13 | 0,5815 |
| Середнє значення | 0,3466 | 0,3498 |
| Мода | 0,7397 | 0,05696 |
| Медіана | 0,3887 | 0,3474 |
| Середнє квадратичне відхилення | 0,4221 | 0,113 |
| Розброс | 1,716 | 0,5245 |

Указанні факти підтверджують ефективність фільтрації даних, визначених з допомогою мобільного реєстраційно-вимірювального комплексу при динамічних випробуваннях мобільних машин за методикою, запропонованою в роботі [6]. Зниження частоти відсічки дискретного фільтра Баттерворта дозволяє значно підвищити якість фільтрації сигналу акселерометрів, однак знижує чутливість фільтра.

Висновки

1. Фільтрація даних, отриманих з допомогою акселерометрів з використанням ФНЧ Баттерворта дозволяє підвищити точність експериментальної оцінки експлуатаційних властивостей колесних машин. Так, для автомобіля ЗАЗ-1103 "Славута" при русі на 3-й передачі середнє квадратичне відхилення сигналу після фільтрації знизилось з 0,4221 до 0,113, а розброс величин прискорень знизився з 0,5245 до 1,716. Застосування вказаного фільтра не впливає на середнє значення сигналу, яке становило 0,35 м/с² для випробуваного автомобіля.
2. Зниження частоти відсічки дискретного фільтра Баттерворта дозволяє значно підвищити якість фільтрації сигналу акселерометрів, однак знижує чутливість фільтра, що важливо при перевірці ефективності ЕКУ.

Список літератури: 1. Grewal M. Kalman filtering theory and practice using Matlab / M. Grewal, A. Andrews // Second edition. – New York: Wiley, 2001. – 410 p. 2. Haykin S. Adaptive filter theory / Simon Haykin // Third edition. – Prentice-Hall, 1996. – 989 p.

3. *Oppenheim A.V., Schaffer R.W.* Discrete-Time Signal Processing / A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989, pp. 311-312. 4. Signal Processing Toolbox User's Guide. Natick: The MathWorks, Inc., 1993. – 720 p. 5. Аналоговые измерительные устройства [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://analogiu.ru/6/6-5-1.html>. 6. Глобальные технические правила № 8. Электронные системы контроля устойчивости / ESE TRANS 180, 2008. – 116 с. 7. *Канунников Г.* Фильтр Баттерворта [Электронный ресурс] / Г. Канунников – Режим доступа: <http://motosnz.narod.ru/bdprf.htm>. 8. *Клец Д.М.* Градуировка акселерометров методом постоянного ускорения // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Вип. 2 (32), т. 1. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – с. 87-92. 9. *Клец Д.М.* Повышение точности экспериментальной оценки эксплуатационных свойств колесных машин с помощью фильтра Калмана / Д. М. Клец // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. / ДНУ «Український наук.-досл. ін-т прогнозування та випробування техніки і технологій для с.-г. виробництва ім. Леоніда Погорілого» (УкрНДШВТ ім. Л. Погорілого); Редкол.: Кравчук В.І. (голов. ред.) та ін. - Дослідницьке, 2012 - Вип. 16 (30), кн. 1. - с. 467-484. 10. *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. 11. *Лукас В.А.* Теория автоматического управления / В.А. Лукас // Учеб. Для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 416 с. 12. 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. - № у 2010 01136; заявл. 04.02.10 ; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12. 13. *Сукачев Э.А., Шкулипа П.А.* Использование фильтра Баттерворта для сглаживания ступенчатых функций в синтезаторе телекоммуникационных сигналов / Э.А. Сукачев, П.А. Шкулипа // Цифрові технології : збірник наукових праць Одеської Національної Академії Зв'язку – Одеса – №5, 2009. – с. 111-115. 14. *Федосов Б.Т.* О синтезе САР как фильтра Баттерворта. Модульный оптимум [Электронный ресурс] / Б.Т. Федосов // Рудненский индустриальный институт – Режим доступа: http://model.exponenta.ru/bt/bt_00117.html. 15. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл // Изд. 5-е, переработанное. – М.: Мир, 1998. – 704 с.

Поступила в редколлегию 19.11.2012

УДК 629.017

Метод повышения точности обработки данных, полученных в ходе испытаний мобильных машин, с помощью фильтра Баттерворта / Д. М. Клец // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2012. – № 60 (966). – С. 98–104. – Бібліогр.: 15 назв.

Запропоновано метод підвищення точності обробки експериментальних даних, отриманих із використанням датчиків лінійного прискорення в ході дорожніх випробувань мобільних машин, за допомогою низькочастотного фільтра Баттерворта.

Ключові слова: мобільна машина, випробування, акселерометр, точність, фільтр Баттерворта.

A method of experimental data accuracy improving obtained by linear acceleration sensors in mobile machines road tests with low-pass Butterworth is offered.

Keywords: mobile machine, testing, accelerometer, accuracy, Butterworth filter.