**III. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА**

Артёмов М. П.

Харківський
національний
технічний
університет
сізьського
господарства
імені Петра Василенка

УДК 629.017

**ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРА
БАТЕРВОРТА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
ТОЧНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ
ДИНАМІКИ МАШИНО-
ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ**

В статті предложен метод повышения точности обработки на основе низкочастотного фильтра Баттерворта экспериментальных показателей работы мобильных агрегатов с помощью контрольно-измерительного комплекса при проведении динамических испытаний.

In the article is proposed method of accuracy improving based on the low-pass Butterworth filter experimental performance of the mobile units using of measurement system for dynamic testing.

Вступ. Ємнісні інерціальні датчики прискорення мають саму високу точність вимірювання і найкращі споживчі характеристики в порівнянні з механічними і п'єзоелектричними аналогами. Сфера їх застосування охоплює промислову електроніку, автомобільну, тракторну електроніку, охоронні системи, медичне обладнання.

Все різноманіття технологічних вимог, що пред'являються до машинно-тракторних агрегатів (МТА) можна виразити наступними узагальненими показниками: продуктивністю і агротехнічною якістю операції, яка виконується, при низькій питомій собівартості робіт. Контроль за системою машин і механізмів, які є матеріально-технічною базою комплексної механізації виробничого циклу і являють собою сукупність окремих МТА, машин і механізмів, що взаємно доповнюють друг друга дозволять підвищити ефективність їх використання.[1] Перспектива щодо розширення застосування сізьськогосподарських тракторів вимагає більш ретельного підходу при комплектуванні МТА.

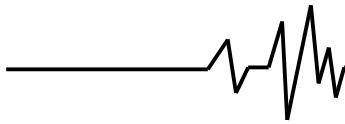
Проблема. Визначення експлуатаційних параметрів мобільних машин, в тому числі і сізьськогосподарських краще проводити використовуючи сучасні реєстраційно-вимірювальні комплекси, чутливими елементами яких слугують мікромеханічні інерціальні датчики (акселерометри). Використання акселерометрів фахівцями в процесі проведення випробувань мобільних машин відбувається в багатьох галузях через простоту їх встановлення.[2] Відповідно до

викладеного виникає необхідність розробки методів підвищення точності обробки експериментальних досліджень, які отримані за допомогою датчиків лінійних прискорень.

Аналіз досліджень і публікацій. Умови та принципи комплектації МТА, що входять в ту чи іншу систему машин, залежать від конструктивних параметрів та динамічних властивостей машин, які входять до агрегату. Якісно проведені випробування і значна точність отриманих результатів підтверджують динамічні властивості на даному етапі експлуатації, та цю точність можна отримати за допомогою сучасної елементної бази та фільтрації результатів експерименту.

Сьогодні серед лідерів ринку датчиків прискорень Freescale Semiconductor виробнича лінійка нараховує декілька десятків найменувань, що охоплюють діапазони від $\pm 1,5$ g до ± 250 g та здатних, в залежності від моделі, проводити виміри за однією, двома чи трьома осями. Датчики мають стандартний пропорційний аналоговий вихід по напрузі, що дуже зручно для підключення до АЦП. Резонансна частота чутливого елемента значно вище частоти зрізу вбудованого ФНЧ, тому вона ніяк не впливає на робочу характеристику датчика.

Фільтром називають частотно-вибірковий пристрій, який пропускає сигнали певної частоти і затримують або зменшують сигнали інших частот. Фільтри прийнято класифікувати за наступними ознаками.



За видом амплітудно-частотної характеристики (АЧХ): фільтри нижніх частот (ФНЧ), верхніх частот (ФВЧ), полосно-пропускаючі, або полосові (ПП), полосно-затримуючі (ПЗ), режекторні і фазові.

За типом елементів, що використовують для реалізації: пасивні LC-фільтри, активні RC-фільтри, фільтри на конденсаторах, що перемикаються та ін. [3].

У загальному випадку передатну функцію фільтра Баттерворта n - порядку можливо представити у вигляді

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2n}} \quad (1)$$

де n - порядок фільтру;

ω - частота зрізу.

При апроксимуванні передатної функції в залежності від поліномів, що використовуються розрізняють фільтри критичного затухання.

В загальному випадку для отримання передатної функції, що забезпечить задану форму частотних характеристик, використовують методи оптимізації. На практиці часто використовують типові передатні функції, які мають аналітичне вирішення. Найбільше розповсюдження отримали передатні функції, апроксимуючі АЧХ фільтру нижніх частот.

1. Фільтр Чебишева з рівнохвильовою характеристикою у полосі пропускання.

2. Інверсний фільтр Чебишева з рівнохвильовою характеристикою у полосі затримки.

3. Фільтр Баттерворта з максимальною пласкою амплітудно-частотною характеристикою.

4. Еліптичний фільтр, що має рівнохвильові характеристики у полосі пропускання і полосі затримки.

5. Фільтр Бесселя з фазочастотною характеристикою близькою до лінійної.

Практичне використання фільтрації експериментальних даних розглядалися у роботах [4,5,6,7]. На практиці широко застосовуються методи фільтрації Бесселя, Баттерворта, Чебишева та критичного затухання.

Фільтр Баттерворта — один з типів електронних фільтрів. Фільтри цього класу відрізняються від інших методом проектування. Фільтр Баттерворта проектується так, щоб його амплітудно-частотна характеристика була максимальною гладкою на частотах полоси пропускання та знижується практично до нуля на частотах полоси подавлення..

В роботі [2] згідно протоколу фільтрації рекомендовано для всіх каналів(за

виключенням кута повороту рульового колеса і кутової швидкості рульового колеса) використання фільтру нижніх частот Баттерворта.

Глобальні технічні правила №8 призначені для проведення випробувань автомобільного транспорту. Подібні дослідження були проведені і викладені в роботі [8].

Для забезпечення необхідної точності вимірювань треба мінімізувати похибки перехідного та усталеного режимів роботи МТА. Оскільки фільтри Баттерворта перших порядків мають непогані характеристики, тому багато дослідників і використовують їх у своїх роботах. На практиці зазвичай використовують фільтри з порядком $n = 2 \dots 8$ [9].

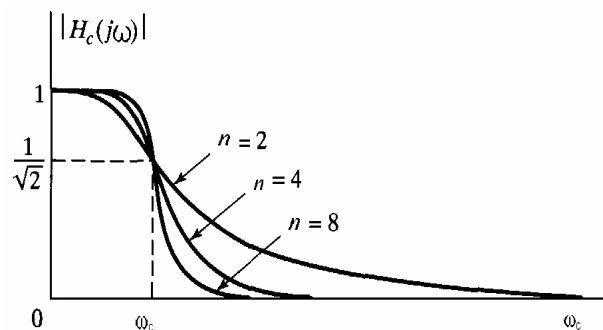


Рис. 1. Графік залежності амплітудно-частотних характеристик від порядку фільтру

АЧХ фільтру Баттерворта дуже близька за формою до прямокутної характеристики ідеального фільтру та згідно відомого визначення його частотна характеристика записується

$$|H_{Bn}(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega T_B)^{2n}}}, \quad (2)$$

де T_B - постійна часу фільтру Баттерворта;

Амплітудно-частотна характеристика фільтру Баттерворта має наступні властивості:

- при будь-якому порядку n значення АЧХ

$$|H(j\omega)| = 1.$$

- при частоті зрізу ω ,

$$|H(j\omega)| = 0,7 = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

АЧХ фільтру монотонно зменшується із зростанням частоти. З цієї причини фільтри Баттерворта називають фільтрами з максимальною пласкими характеристиками. На рис. 2 наведено АЧХ фільтрів нижніх частот.

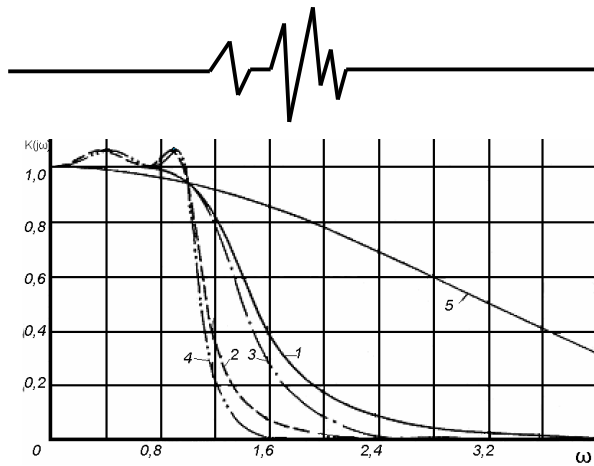


Рис. 2. Графіки амплітудно-частотних характеристик активних фільтрів нижніх частот четвертого порядку:
1 - фільтр Баттерворта; 2 - фільтр Чебишева; 3 - інверсний фільтр Чебишева; 4 - еліптичний фільтр; 5 - фільтр Бесселя

У роботі [3] зазначено, що фільтр Баттерворта любого порядку стійкий. Це означає, що при настроюванні системи автоматичного регулювання (САР) на модульний оптимум на основі фільтру Баттерворта немає необхідності перевіряти її на стійкість, окрім того система стає оптимізованою по точності та швидкодії.

Особливу цікавість викликає дослідження і використання фільтрації експериментальних даних в обчислювальному середовищі MATLAB, у якому знаходиться велика кількість вбудованих функцій, які дозволяють проводити цифрову обробку сигналів та моделювати процеси фільтрації. Для синтезування аналогових і дискретних фільтрів Баттерворта нижніх частот, верхніх частот, полосових і режекторних у простому вигляді функція пакету Signal Processing Toolbox «butter» представляє синтаксис

$$[b, a] = \text{butter}(n, W_n). \quad (3)$$

Цією функцією передбачено проводити синтез дискретного фільтру Баттерворта n -го порядку, який має АЧХ нижніх частот і нормовану частоту зрізу W_n . Функція повертає опис фільтру у вигляді векторів-строк b і a , що мають довжину $n+1$ та мають коефіцієнти поліномів чисельника та знаменника функції передачі в порядку зменшення ступенів змінної z

$$H(z) = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{1 + a(2)z^{-1} + \dots + a(n+1)z^{-n}} \quad (4)$$

Функція «butter» використовує значення частоти зрізу W_n , нормоване до частоти Найквіста (π радіан на відлік).

В MATLAB існує функція, що забезпечує реалізацію процедури дискретної одномірної фільтрації, називається «filter» та має наступний синтаксис

$$y = \text{filter}(b, a, x), \quad (5)$$

де X і Y вектори вхідного і вихідного сигналів відповідно.

Функція дискретної одномірної фільтрації, що задана виразом (5) проводить фільтрацію сигналу, який подається у вигляді одномірного масиву x , використовуючи дискретний фільтр, описаний кінцево-різностним рівнянням [11]

$$y(n) = b(1)x(n) + b(2)x(n-1) + \dots + b(nb+1)x(n-nb) - a(2)y(n-1) - \dots - a(na+1)y(n-na) \quad (6)$$

Алгоритм роботи фільтру наведено на рис.3 [5]

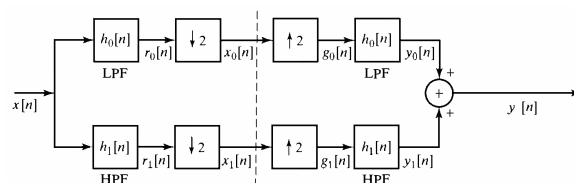
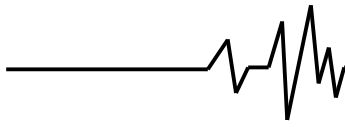


Рис. 3. Алгоритм роботи фільтру

Під час вибору алгоритму фільтрації необхідно керуватись наступними умовами [12]: швидкість збіжності, адаптивність, стійкість, вимоги до обчислювальних ресурсів. Таким чином для поліпшення якості сигналу, що надходить від акселерометрів при динамічних випробуваннях мобільних машин, необхідно використання, чи побудова, адаптивного фільтру. При дослідженні ефективності дії в роботі [13] досліджувалось застосування фільтра Калмана для усунення шумів від вібрацій двигуна під час обробки експериментальних даних, які були отримані від датчиків лінійних прискорень. Між тим для адаптації вимірювального комплексу до проведення динамічних випробувань мобільних машин у стандарті [2] рекомендується використання фільтру Баттерворта. Таким чином для підвищення точності експериментальної оцінки експлуатаційних властивостей підходить алгоритм фільтрації на прикладі фільтру Баттерворта і досліджень такого плану для сільськогосподарської техніки не проводилось це потребує додаткових досліджень.

Мета досліджень полягає в розробці методики фільтрації експериментальних даних, що отримані за допомогою акселерометрів при динамічних випробування мобільних машин з



використанням фільтра Баттерворта в процесі експериментальної оцінки їх властивостей.

Результати досліджень Від зовнішніх збурюючих чинників і технічного стану сільськогосподарських агрегатів та енергетичного засобу у більшості випадків відбувається зміна динамічних навантажень. Така зміна відбувається під час перехідних процесів, розгону, гальмування, заглиблення та виглиблення робочих органів сільськогосподарського знаряддя, у цей час найкраще проводити динамічні випробування.

Представлені раніше дослідниками засоби експериментальних досліджень руху мобільних машин дозволяли отримати інформацію з використанням великих витрат як на установку обладнання так і на обробку даних. За допомогою мобільного реєстраційно-вимірювального комплексу на базі акселерометрів є можливість значно зменшити трудовитрати та кількість приладів при проведенні досліджень в умовах експлуатації(рис.4).



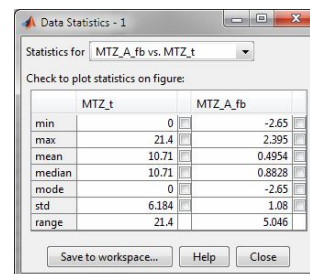
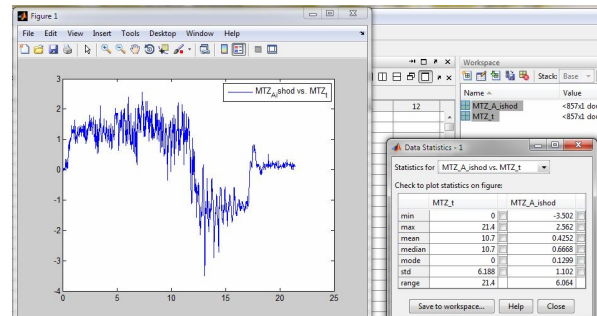
Рис. 4. Графік прискорень розгону і зупинки трактора МТЗ-80

Методика обробки отриманих даних, що наведена в Глобальних технічних правилах №8 [2], включає необхідні вимоги до методів фільтрації експериментальних даних, оскільки різні методи фільтрації можуть надати суттєвого впливу на кінцеві результати. Разом з використанням низькочастотного фільтра Баттерворта пропонується встановлення на нуль відфільтрованих даних. Така вимога пов'язана з тим, що необхідно усунути зміщення сигналу датчика з використанням статичних даних, зареєстрованих до досліджень.

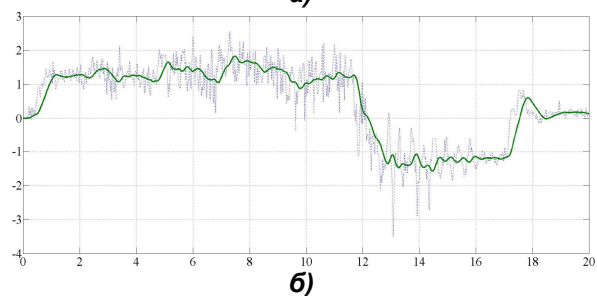
Проведемо фільтрацію результатів експериментальних досліджень, проведених за допомогою мобільного реєстраційно-вимірювального комплексу [14] прискорень трактора МТЗ-80 на бетонному полігоні, в пакеті MATLAB.

Для проведення розрахунку в якості алгоритму обробки сигналу будемо використовувати фільтр Баттерворта, який реалізується за допомогою вбудованої функції

«butter». Для виклику процедури обробки сигналу синтаксис запишемо наступним чином $[b, a] = \text{butter}(2, 0, 0.5); y = \text{filter}(b, a, \text{accel})$, де accel – масив, що містить значення вихідного сигналу акселерометра.



а)

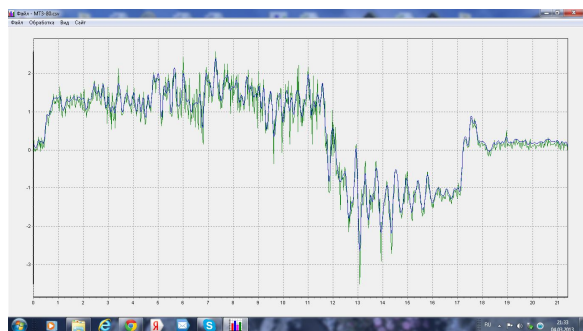
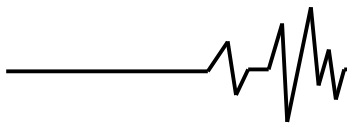


б)

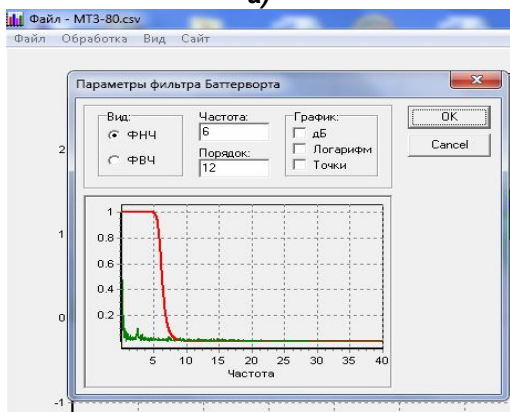
Рис. 5. Результати фільтрації експериментальних даних в пакеті MATLAB а – діалогові вікна фільтру; б – графік прискорень після обробки

Щоб не порушувати авторські права та полегшити автоматизацію обробки отриманих від акселерометрів результатів використаємо вільно розповсюджене програмне забезпечення (ПО) «Фільтр Баттерворта» [6], з відкритим початковим кодом. В основу алгоритму роботи даного програмного забезпечення покладено дискретне перетворення Фур'є, яке широко використовується в статистиці під час аналізу часових рядів.

На рис.6 наведено вигляд діалогових вікон програмного забезпечення «Фільтр Баттерворта» при обробці експериментального заїзду трактора МТЗ-80.



а)



б)

Рис. 6. Результати фільтрації в ПО «Фільтр Баттерворта»: а – импорт вихідних даних акселерометра і результати фільтрації; б – налаштування параметрів фільтра згідно вимог [2]

За ітогами проведеного аналізу отриманих результатів фільтрації з ПО «Фільтр Баттерворта» бачимо, що використання ФНЧ 12 порядку з частотою відсічки 6Гц згідно вимог [2], веде до зниження рівня шуму початого сигналу. Щоб краще проаналізувати результати фільтрації зробимо збільшення масштабу частини рис.6 в межах невеликого інтервалу часу 8...10с.

На основі аналізу збільшеного масштабу результатів фільтрації необхідно провести статистичну обробку графіка рис.7 та занести в таблицю.

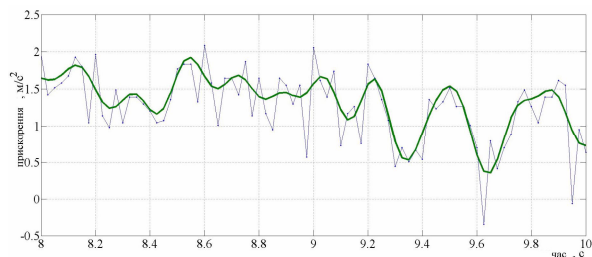


Рис. 7. Збільшений графік відфільтрованого сигналу акселерометра

**Таблиця 1
Результати статистичної обробки сигналу акселерометра**

Параметр розподілу	Невідфільтрований сигнал	Відфільтрований сигнал
Мінімальне значення	-3,502	-2,65
Максимальне значення	2,562	2,395
Середнє значення	0,4252	0,4354
Мода	0,1299	-2,65
Медіана	0,6668	0,8828
Середнє квадратичне відхилення	1,102	1,08
Діапазон розсіювання	6,064	5,046

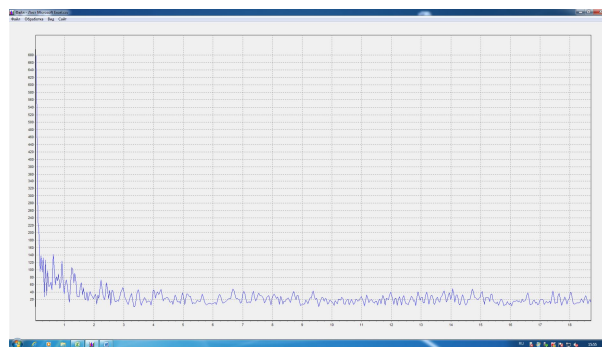
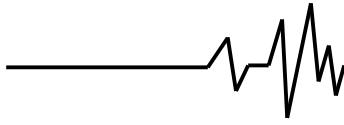


Рис. 8. АЧХ вихідного сигналу акселерометра при випробуваннях трактора МТЗ-80

Проведена статистична обробка відфільтрованих графіків свідчить про зменшення середньоквадратичного відхилення (1,08 замість 1,102), зміну діапазону розсіювання (5,046 замість 6,064) значень сигналу після фільтрації. Також на ділянці де проводилась статистична обробка слід відмітити, що середнє значення сигналу практично не змінилось.

Отримані результати фактично підтверджують ефективність фільтрації даних визначених за допомогою розробленого мобільного реєстраційно-вимірювального комплексу при експлуатаційно-технологічних випробуваннях мобільних машин і агрегатів. Умови та принципи комплектації МТА, що входять в ту чи іншу систему машин, залежать від конструктивних параметрів та динамічних властивостей машин, які входять до агрегату. Скомплектовані сільськогосподарські агрегати в роботі повинні забезпечувати функціональну стабільність під час виконання агротехнічних



операцій та відповідати класифікації оцінюючих показників: агротехнічним, експлуатаційним, промисловим, економічним, загальнотехнічним і естетико-ергономічним.

Висновки. Проведена фільтрація із допомогою ФНЧ Баттерворта результатів випробувань трактора МТЗ-80, за методикою призначеною для автомобільного транспорту, дозволило підвищити точність експериментальної оцінки експлуатаційних властивостей. При розгоні і зупинці трактора середньоквадратичне відхилення сигналу після фільтрації знизилось з 1,102 до 1,08, а діапазон розсіювання прискорень зменшився з 6,064 до 5,046. Використання зазначеного фільтра в дослідженнях практично не призводить до впливу на середнє значення сигналу.

Для підвищення якості фільтрації необхідно знизити частоту відсічки дискретного фільтру Баттерворта, але такий підхід знижує чутливість самого фільтру, що важливо при перевірці ефективності електронного контролюючого пристрою.

Література

1. Горячкин В.П. Теория массы и скоростей сельскохозяйственных прицепов / В.П.Горячкин – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
2. Глобальные технические правила №8. Электронные системы контроля устойчивости / ESE TRANS 180, 2008. – 116с.
3. Аналоговые измерительные устройства [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://analogiu.ru/6/6-5-1.html>.
4. Grewal M. Kalman filtering theory and practice using Matlab / M.Grewal, A.Andrews // Second edition. – New York: Wiley, 2001. – 410p.
5. 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.
6. Канунников Г. Фильтр Баттерворта [Электронный ресурс] / Г. Катунников – Режим доступа: <http://motosnz.narod.ru/bdcpf.htm>.
7. 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 і технологіях». – 2012. - №2(66) – С.5 – 9.
8. Клец Д.М. Метод повышения точности обработки данных, полученных в ходе испытания мобильных машин, с помощью фильтра Баттерворта / Д.М. Клец // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2012. с.98 – 104.
9. Лукас В.А. Теория автоматического управления / В.А. Лукас // Учеб. для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 416с.
10. Федосов Б.Т. О синтезе САР как фильтра Баттерворта. Модульный оптимум [Электронный ресурс] / Б.Т. Федосов // Руденский индустриальный институт – Режим доступа: http://model.exponenta.ru/bt/bt_00117.html.
11. Signal Processing Toolbox User's Guide. Natick: The MathWorks, Inc., 1993. – 720p.
12. Haykin S. Adaptive filter theory / Simon Haykin // Third edition. – Prentice-Hall, 1996. – 989 p.
13. 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» (УкрНДВШПТ ім. Л. Погорілого) Дослідницьке, 2012 – Вип.16(30), кн.1. – с.467 – 484.
14. 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.