

*М. П. Артьомов, к.т.н., доц.  
Харківський національний технічний університет сільського господарства  
імені Петра Василенка*

## **ПРО ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРІВ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ВИПРОБУВАНЬ З ОЦІНЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОБІЛЬНИХ МАШИН**

*Запропоновано методику проведення фільтрації експериментальних даних, що отримані при проведенні досліджень експлуатаційних властивостей мобільних машин за допомогою багатокомпонентних акселерометрів.*

***Ключові слова:** мобільна машина, експлуатаційні властивості, фільтр, акселерометр, мобільний вимірювальний комплекс*

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Обов'язковою умовою ефективного функціонування мобільних машин, до яких можна віднести машинно-тракторні агрегати (МТА), є отримання достовірної інформації щодо експлуатаційних властивостей. У практиці досліджень з оцінювання експлуатаційних властивостей мобільних машин велике значення має визначення їх тягово-динамічних показників, а також керованості й стійкості в різних режимах руху. Для визначення зазначених властивостей мобільних машин у процесі експлуатації на сучасному етапі необхідно використовувати сучасні контрольно-вимірювальні прилади та комплекси. У такій вимірювальній апаратурі як чутливі елементи використовується сучасна елементна база, інколи встановлюються мікромеханічні інерціальні датчики – трьохкомпонентні акселерометри Freescale Semiconductor моделі MMA 7260 QT.

Під час пуску мобільної машини рівень інтенсивності акустичного та вібраційного шуму двигуна інколи досягає таких значень, що їх можна представляти як реальний механічний вплив, здатний викликати реакцію різних інерціальних приладів. У випадку, коли до складу вимірювальної апаратури входять акселерометри, акустичний і вібраційний шум може спровокувати додатковий сигнал або похибку.

Економічні умови роботи в сільському господарстві вимагають зменшення витрат при експлуатації мобільних агрегатів та збільшення їх продуктивності. На це спрямовано також дослідження науковців щодо ефективної комплектації та експлуатації МТА. При проведенні випробувань мобільних агрегатів велика кількість шумів різної фізичної природи призводить до спотворення сигналу, який отримується з контрольно-вимірювальної апаратури. Досить жорсткі вимоги до точності вимірювань викладено у ДСТУ 3310-96 для оцінювання керованості й

стійкості руху транспортних засобів [1]. Необхідність підвищення безпеки руху, ефективності роботи мобільних машинно-тракторних агрегатів будуть ці вимоги постійно посилювати. Підвищення точності вимірювань можливе, якщо використовують більш точні та вищі за вартістю вимірювальні прилади чи шляхом комп'ютерної обробки (фільтрації) отриманих результатів. Застосовування дорогої вимірювальної техніки не завжди обґрунтоване, тому є необхідність розроблення методики використання адаптивних фільтрів під час проведення динамічних випробувань мобільних машин.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми та на які спирається автор, виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Дослідженнями, проведеними до цього часу, з впливу на точність вимірювань різного роду шумів у інерціальних чутливих елементів, якими є акселерометри, приділено не зовсім достатньо уваги. У минулому сторіччі цією проблемою займався В.С. Дідковський – Київський політехнічний інститут. Серед сучасних дослідників В.В. Карачун, В.М. Мельник, В.В. Аврутов вивчали вплив шуму на перехідні процеси акселерометрів [2,3,4].

Для оцінювання тягово-енергетичних параметрів мобільних сільськогосподарських агрегатів у Харківському НТУСГ ім. П. Василенка використовується модернізований мобільний реєстраційно-вимірювальний комплекс, розроблений у Харківському НАДУ за участю Харківського НТУСГ ім. П. Василенка для дорожніх випробувань автомобілів. Основою цього комплексу [5] є два трикомпонентних датчики прискорень ДЛШ, а також інформаційний пристрій (ноутбук ASUS) для зняття й архівації даних із спеціалізованим авторським програмним забезпеченням «Acceleratev.3.2.», елементи кріплення та апаратура для фотовідеофіксації проходження досліджень.

Під час проведення динамічних випробувань мобільних машин за допомогою зазначеного комплексу ускладнюють отримання необхідного сигналу: вплив температури, вібрації двигуна, відхилення осей чутливості акселерометрів від осей заданої системи координат, власні шуми датчика в процесі роботи. Через виникнення об'єктивних перешкод для підвищення якості сигналу та якості оцінювання експлуатаційних властивостей виникла необхідність розробки комп'ютерної обробки (фільтрації) вхідних сигналів від акселерометрів.

Шум виникає від різних джерел та шкодить одержанню якісного сигналу. Наприклад, зашумлені сигнали можуть бути отримані від самих акселерометрів чи з'явитися при передачі сигналу по з'єднувальному каналу. Фільтри використовують для зменшення перешкод та розв'язання трьох видів задач: фільтрація, згладжування, прогнозування [6]. Поняття «фільтр» застосовують для опису пристрою або частини фізичного

апаратного чи програмного забезпечення, яке використовують для пригнічення чи виділення певних частот (шумів) сигналу, що обробляється.

Вимоги до точності вимірювань окремих параметрів, які можливо контролювати за допомогою розробленого мобільного реєстраційно-вимірювального комплексу на базі акселерометрів [5], наведено в таблиці 1.

Шум, що відображається у вихідному сигналі акселерометра, визначає роздільну здатність пристрою, важливу при визначенні малих прискорень [7]. Граничну розподільну здатність визначають рівнем шуму вимірювань, який поєднує зовнішній фоновий шум та власний шум датчика. Застосування різного роду обмежувачів, які пригнічують або не пропускають сигнали з певними властивостями, призводить до зменшення рівня шуму. Такий підхід до фільтрації поліпшує співвідношення сигнал/шум та розподільну здатність, але при цьому ми отримуємо амплітудні та фазові викривлення [8].

Вимоги до обчислювальних ресурсів, адаптивність, стійкість, швидкість збіжності – основні умови, якими необхідно керуватись при виборі алгоритму фільтрації.

**Таблиця 1. Вимоги до точності вимірювань [1]**

Параметри, що вимірюються, одиниці вимірювань	Діапазон вимірювань	Похибка, не більше від	
		абсолютних одиниць	відносних одиниць (%)
швидкість ТЗ, км/год	5-150	–	±0,5
Кутова швидкість ТЗ, градус/с	±45	±0,5	±1,0
Бокове прискорення, м/с <sup>2</sup>	±7	±0,15	±1,0
Час, с	–	±0,01	–
Температура, °С	–	±1,0	–

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Завданням дослідження є пошук і розроблення ефективної методики фільтрації сигналів, що отримані від акселерометрів контрольно-вимірювального комплексу при проведенні експериментального оцінювання експлуатаційних властивостей мобільних машин.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Для отримання сигналу, що відповідає умовам, та поліпшення якості сигналу, який отримують від акселерометра при випробуваннях мобільних машин, необхідне розроблення та використання адаптивного фільтра. Із розглянутих варіантів найбільший інтерес становить реалізація алгоритму фільтрації на прикладі фільтра Калмана для підвищення точності

експериментальної оцінки експлуатаційних властивостей мобільних машин. Посилаючись на центральну граничну теорему Ляпунова, яка формулює вплив кожної з великої кількості незалежних випадкових величин на всю суму дуже малим, то їх розподіл, близький до нормального [9]. Необхідно відзначити, що центральна гранична теорема справедлива не тільки для безперервних, а й для дискретних випадкових величин. Таким чином, використання фільтра Калмана буде виправданим.

Фільтр Калмана оперує поняттям вектора стану системи (набором параметрів, які описують стан системи у певний проміжок часу) і його статистичним описом. У загальному випадкові динаміка вибраного вектора стану описується щільністю вірогідності розподілу його компонентів у кожний момент часу. За наявності певної математичної моделі спостережень та контролюючої системи, а також моделі апіорної зміни параметрів вектора стану в кожен момент часу відстежують динаміку стану системи. Фільтр Калмана розраховує щільність вірогідності вектора стану в кожний момент часу. Виходячи з цього, зробимо висновок, що запропонований фільтр повною мірою описує вектор стану як випадкову векторну величину.

На практиці використовують декілька різновидів фільтра Калмана, що відрізняються наближеннями і припущеннями, які доводиться застосовувати для зведення фільтра до описаного вигляду й зменшення його розмірності.

Фільтри Калмана базуються на дискретизованих у часі лінійних динамічних системах. Такі системи моделюють за допомогою лінійних операторів і доданків з нормальним розподілом. Стан системи описують вектором кінцевої розмірності – вектором стану. Лінійний оператор у кожен момент часу впливає на вектор стану та переводить його в інший вектор стану (детермінована зміна стану), додається деякий вектор нормального шуму (випадкові фактори) й у загальному випадкові вектор керування, що моделює вплив системи керування.

Калманівська фільтрація є важливою частиною теорії керування, відіграє значну роль у створенні систем керування. Вказаний алгоритм лежить в основі сучасних методів оперативної обробки інформації [10].

При використанні фільтра Калмана для отримання оцінок вектора стану процесу за серією зашумлених вимірювань необхідно представити модель цього процесу відповідно до структури фільтра певного типу. Для кожного такту  $t$  роботи фільтра необхідно визначити матриці: еволюції процесу  $F_t$ ; матрицю спостереження  $H_t$ ; коваріаційну матрицю процесу  $Q_t$ ; коваріаційну матрицю шуму вимірювань  $R_t$ ; за наявності керуючих впливів – матрицю їх коефіцієнтів  $B_t$ .

Обробку даних фільтром Калмана поділяють на два етапи:

– екстраполяція (передбачення вектора стану системи за оцінюванням вектора стану і застосованим вектором керування з кроку  $t-1$  на крок  $t$ ; коваріаційна матриця для екстрапольованого вектора стану);

– корекція (відхилення отриманого на кроці  $t$  спостереження від спостереження, що очікується при проведеній екстраполяції; коваріаційна матриця для вектора відхилення (вектора похибки); оптимальна, за Калманом, матриця коефіцієнтів підсилення, що формуються на основі коваріаційних матриць отриманої екстраполяції вектора стану і одержаних вимірів (за допомогою коваріаційної матриці вектора відхилення); корекція отриманої раніше екстраполяції вектора стану – одержання оцінки вектора стану системи; розрахунок коваріаційної матриці оцінювання вектора стану системи) [11].

Екстраполяція (передбачення) вектора стану системи за оцінкою вектора стану та застосованим вектором керування з кроку  $t-1$  на крок  $t$  (передбачення стану системи в поточний момент часу) виконується за такою залежністю:

$$\hat{x}_t = F \hat{x}_{t-1} + B u_{t-1} + w_t, \quad (1)$$

де  $F$  – матриця переходу між станами (динамічна модель системи);

$B$  – матриця застосування керуючого впливу;

$u_{t-1}$  – керуючий вплив у попередній момент часу;

$\hat{x}_{t-1}$  – стан системи у попередній момент часу;

$w_t$  – нормальний випадковий процес з нульовим математичним очікуванням і коваріаційною матрицею  $Q_t$ , який описує випадковий характер динаміки процесу.

Корекцію отриманої екстраполяції вектора стану – отримання оцінки вектора стану системи виконують за такою залежністю:

$$\hat{x}_t = \hat{x}_t + K_t (a_x - H \hat{x}_t), \quad (2)$$

де  $a_x$  – вимірювання в поточний момент часу;

$K_t$  – матриця коефіцієнта підсилення;

$H$  – матриця вимірювань, що відображає відношення вимірювань і станів.

Розрахунок коваріаційної матриці оцінювання вектора стану системи

$$P_t = (I - K_t H) P_t, \quad (3)$$

де  $P_t$  – коваріаційна матриця для екстрапольованого вектора стану (передбачення помилки).

Якщо розглянути машинно-тракторний агрегат, який виконує агротехнологічну операцію, то на початку він знаходиться у точці 0, але під дією певних сил агрегат отримує випадкове прискорення. В процесі роботи ми виміряємо стан агрегату з кроком  $\Delta t$  секунд. Нам необхідно

отримувати інформацію про стан агрегату з якомога більшою точністю. Застосуємо до цієї задачі фільтр Калмана і визначимо всі необхідні матриці.

Будемо вважати, що між  $t-1$ -им і  $t$ -им вимірюваннями агрегат рухається з прискоренням  $v_t$ , яке розподіляється за нормальним законом з нульовим математичним очікуванням і середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_a$ . Використовуючи закони механіки Ньютона, маємо можливість записати

$$x_t = Fx_{t-1} + Gv_t \quad (4)$$

де  $G$  – випадкові впливи на агрегат.

Коваріаційна матриця випадкових впливів у процесі роботи агрегату буде записана у вигляді

$$Q = cov(Gv_t) = E(Gv_t)(Gv_t)^T = GE^2G^T = s_a^2GG^T, \quad (5)$$

де  $E$  – математичне очікування;

$s_a$  – скаляр.

На кожному етапі роботи проводять вимірювання стану агрегату. Припустимо, що похибка вимірювань  $\eta$  має нормальний розподіл з нульовим математичним очікуванням і середньоквадратичним відхиленням  $s_a$ . При цьому коваріаційна матриця шуму вимірювань буде записана [12]

$$R = E(\eta\eta^T) = s_a^2I. \quad (6)$$

Вплив на зміну шуму процесу визначають якістю кріплення приладів, що використовують (у нашому випадкові – трикомпонентні акселерометри ММ А7260 QT), вібраціями двигуна, коливанням температури. Шум вимірювання може задаватися похибкою вимірювання акселерометрів (1% для ММА 7260 QT за паспортом) і передавання сигналу з'єднувальними кабелями, а також іншими факторами (див. рис. 1).



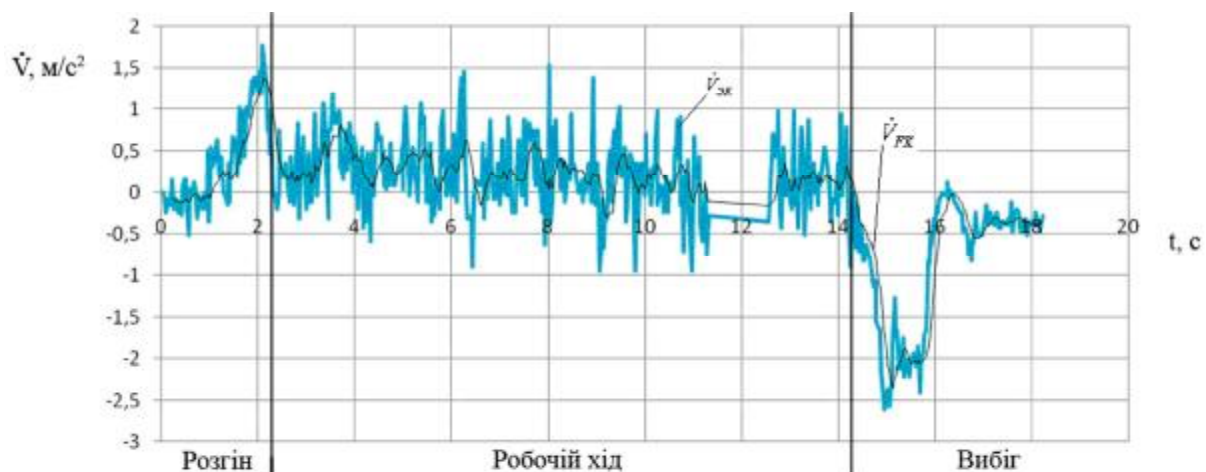
**Рис. 1. Схема вимірювань лінійних прискорень мобільного агрегату з використанням фільтра Калмана**

Можливості роботи фільтрів з ефективною обробки вимірювань, що проводять під час динамічних випробувань мобільних машин, залежать від правильності завдання коваріаційних матриць шуму вимірювання  $R$  та шуму процесу  $Q$  і багато в чому визначають згладжуючі властивості фільтра.

При застосуванні адаптивного фільтра Калмана його алгоритм має певні складності з розрахунковою реалізацією, тому краще використовувати вже розроблене програмне забезпечення наприклад, Visual Kalman Filter компанії HANSoftware [8].

На рисунку 2 відображено результат застосування фільтра Калмана, проведений на ЕОМ. Результати дослідження підтвердили з достовірною ймовірністю 95% адекватність отриманих закономірностей зміни прискорення у часі при дійсній швидкості агрегату МТЗ-80 + КПС-4.

Отримані характеристики суттєво відрізняються від статистичних тягових характеристик заводів-виробників тракторів, що зумовлено насамперед нестабільністю тягового опору сільгоспмашин, витратами потужності на розгін поступально-рухомих і обертових мас машинно-тракторного агрегату. Запропонований метод визначення за прискоренням розгону дозволяє встановити тягові характеристики при несталому русі, коли виконуються різні технологічні операції. На рисунку 2 прийнято такі позначення:  $\dot{V}_{ЭК}$  – експериментальні значення поздовжніх прискорень, що отримані за допомогою мобільного реєстраційно-вимірювального комплексу,  $\dot{V}_{FK}$  – згладжені результати, що отримані з допомогою фільтра Калмана за методикою, яка була описана раніше.



**Рис. 2.** Експериментальні значення прискорень машинно-тракторного агрегату в складі МТЗ-80 + КПС-4

Згідно з аналізом результатів за рисунком 2, робимо висновок, що визначення прискорення мобільного агрегату за допомогою акселерометрів без застосування фільтрації у деяких випадках дає

розсіювання результату від  $0,1 \text{ м/с}^2$  до  $0,8 \text{ м/с}^2$ . Із збільшенням швидкості руху буде збільшуватись і розсіювання (коливання) через збільшення питомого опору сільськогосподарського знаряддя (формула В.П. Горячкіна). Використання фільтрації результатів вимірювання (фільтр Калмана) дозволило мінімізувати дисперсію сигналу акселерометрів.

#### **Висновки з цього дослідження.**

При експериментальному визначенні прискорень МТА за допомогою акселерометрів без застосування фільтрів дає розсіювання результату від  $0,1 \text{ м/с}^2$  до  $0,8 \text{ м/с}^2$ . Із збільшенням швидкості руху агрегату розсіювання збільшується.

Використання мобільного реєстраційно-вимірювального комплексу на базі акселерометрів MMA7260QT з програмним забезпеченням Visual Kalman Filter дозволяє мінімізувати дисперсію отриманих сигналів. За рахунок згладжування шумів різної фізичної природи досягається підвищення точності експериментальної оцінки експлуатаційних властивостей машинно-тракторних агрегатів.

#### *Література*

1. 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).
2. Карачун В.В. О дополнительных погрешностях поплавкового гироскопа при циркуляции ракеты-носителя / В.В. Карачун, В.Н.Мельник // *Космична наука і технологія*. – 2009. – №6(15). – С.49-56.
3. Карачун В.В. Проникающее акустическое излучение как фактор перехода инерциальных чувствительных элементов гиростабилизированных в импедансные. Смешанная краевая задача / В.В. Карачун, В.Н. Мельник // *Космична наука і технологія*. – 2011. – №2(17). – С. 22 -31.
4. Аврутов В.В. Влияние акустического шума на переходную характеристику акселерометра / В.В. Аврутов, Д.В. Аврутов, П.М. Бондарь, Ю.Ф. Лазарев // *Вісник НТУУ «КПІ», Серія: Приладобудування*. – 2012. – Вип.43. – С. 175-180.
5. 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.
6. Haykin S. *Adaptive filter theory* / Simon Haykin // *Third edition*. – Prentice-Hall, 1996. – 989 p.
7. 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.
8. *Design Kalman Filter with ease!* [Електронний ресурс] : HANSoftware – Режим доступу : <http://www.luckhan.com/kalman-filter-design.htm>.



9. Орлов А. И. Прикладная статистика: учебник / А. И. Орлов. – М.: Издательство «Экзамен», 2004. – 656 с.

10. Сеницын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева / И. Н. Сеницын: учеб. пособие. – М.: Университетская книга. Логос. – 2006. – 640 с.: ил.

11. Раевский Н. В. Применение алгоритма классического линейного фильтра Калмана для оценки параметров движения маневрирующего в пространстве объекта / Н. В. Раевский, А. А. Киселёва, М. В. Лютая // Вісник ЧДТУ. – 2011. – № 2. – С. 85-90.

12. Grewal M. Kalman filtering theory and practice using Matlab / M. Grewal, A. Andrews // Second edition. – New York: Wiley, 2001. – 410 p.

Надійшла до редакції 20.11.2012

© М. П. Артёмов

**УДК 629.017**

*М. П. Артемов, к.т.н., доц.  
Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
имени Петра Василенко*

## **ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФИЛЬТРОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ ПО ОЦЕНИВАНИЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОБИЛЬНЫХ МАШИН**

*Предложено методика проведения фильтрации экспериментальных данных, которые получены при проведении исследований эксплуатационных свойств мобильных машин с помощью многокомпонентных акселерометров.*

**Ключевые слова:** *мобильная машина, эксплуатационные свойства, фильтр, акселерометр, мобильный измерительный комплекс*

**UDC 629.017**

*M. Artiomov, Ph. D., Associate Professor  
Petro Vasilenko named Kharkov National Technical University of Agriculture*

## **ABOUT USING OF FILTERS FOR TESTING BY ESTIMATION OPERATING PROPERTIES OF MOBILE MACHINES**

*The article deals with methodology of realization experimental data filtration, that's getting during researches of operating properties with mobile machines by means of multicomponent accelerometers.*

**Keywords:** *mobile machine, operating properties, filter, accelerometer, mobile measuring complex*