

Шуляк М.Л.

Харківський національний технічний  
університет сільського господарства  
імені Петра Василенка  
E-mail: m.l.shulyak@gmail.com

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ФІЛЬТРАЦІЇ ДАНИХ  
ПРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ДОСЛІДЖЕННІ  
ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

УДК 629.017

DOI 10.37700/ts.2020.21.175-184

*Шуляк М.Л. «Аналіз існуючих систем фільтрації даних при експериментальному дослідженні транспортного засобу»*

Збільшення швидкості розробки та введення в експлуатацію нової техніки ставить перед науковцями завдання більш швидкого проведення досліджень. Є необхідність змінити підходи до методик досліджень та вимірювального обладнання. Основна вимога, це швидкість проведення дослідження, якість та релевантність інформації. Застосування високочутливих датчиків, бортових вимірювальних пристроїв та відповідного програмного забезпечення вирішує цю задачу. Але виникає питання синтезу вимірювальних датчиків, робота яких спирається на застосування принципово різних фізичних ефектів (індукція, електромагнітні коливання, радіохвилі). Для кожного з таких датчиків властиві свої спектри шумів, тому при проведенні досліджень та обробці інформації потрібно використовувати алгоритми фільтрації здатні усунути цей недолік.

Останнім часом багато науковців проводять експериментальні дослідження з використанням смісних акселерометрів. Їх перевагою є висока чутливість, простота у використанні та не висока ціна. Але в загальному випадку показання, такого типу акселерометру, схильні до значного шуму, який зазвичай викликаний особливостями конструкції та умовами проведення польових досліджень, яким властиві стохастичні чинники, що пов'язані з середовищем експлуатації: небажані вібрації, висока вологість та температура, електромагнітні перешкоди від інших електромеханічних або механічних елементів.

Проведено аналіз переваг та недоліків існуючих фільтрів. Обґрунтування послідовності їх застосування та налаштувань необхідних при проведенні польових досліджень в режимі реального часу.

Визначено, що застосування каскаду активних фільтрів необхідно при проведенні досліджень в польових умовах, бо такі фільтри можна вбудувати в програмне забезпечення, що суттєво збільшить швидкість та якість проведення дослідження. При наявності точної інформації стосовно джерела небажаного шуму, застосування принципів перетворення Фур'є надає можливість розділити повний сигнал на складові та проводити подальшу обробку з тими частинами, які надають найбільш релевантну інформацію у відповідності до задач дослідження.

Уніфікувати програмне забезпечення для різних умов проведення експерименту в режимі реального часу можливо при забезпеченні модульного підключення, або відключення окремих фільтрів з основного каскаду фільтрації.

**Ключові слова:** транспортний засіб, експериментальне дослідження, акселерометр, фільтрація, динамічні навантаження.

*Шуляк М.Л. «Анализ существующих систем фильтрации данных при экспериментальном исследовании транспортного средства»*

Увеличение скорости разработки и введения в эксплуатацию новой техники ставит перед учеными задачу более быстрого проведения исследований. Есть необходимость изменить подходы к методикам исследований и измерительному оборудованию. Основное требование, это скорость проведения исследования, качество и релевантность информации. Применение высокочувствительных датчиков, бортовых измерительных устройств и соответствующего программного обеспечения решает эту задачу. Но возникает вопрос синтеза измерительных датчиков, работа которых опирается на применение принципиально различных физических эффектов (индукция, электромагнитные колебания, радиоволны). Для каждого из таких датчиков присущи свои спектры шумов, поэтому при проведении исследований и обработке информации нужно использовать алгоритмы фильтрации способные устранить этот недостаток.

В последнее время многие ученые проводят экспериментальные исследования с использованием емкостных акселерометров. Их преимуществом является высокая чувствительность, простота в использовании и не высокая цена. Но в общем случае показания, такого типа акселерометру, подвержены значительному шуму, который обычно вызван особенностями конструкции и условиями проведения полевых исследований, которым свойственны стохастические факторы, связанные со средой эксплуатации: нежелательные вибрации, высокая влажность и температура, электромагнитные помехи от других электромеханических и механических элементов.

Проведен анализ преимуществ и недостатков существующих фильтров. Обоснование последовательности их применения и настроек, необходимых при проведении полевых исследований в режиме реального времени.

Определено, что применение каскада активных фильтров необходимо при проведении исследований в полевых условиях, так как такие фильтры можно встроить в программное обеспечение, что существенно увеличит скорость и качество проведения исследования. При точной информации об источнике нежелательного шума, применение принципов преобразования Фурье позволяет разделить полный сигнал на

составляющие и проводит дальнейшую обработку с теми частями, которые предоставляют наиболее релевантной информации в соответствии с задачами исследования.

Унифицировать программное обеспечение для различных условий проведения эксперимента в режиме реального времени, возможно, при обеспечении модульного подключения, или отключения отдельных фильтров из основного каскада фильтрации.

**Ключевые слова:** транспортное средство, экспериментальное исследование, акселерометр, фильтрация, динамические нагрузки.

*M.L. Shuliak "Analysis of filtering systems in the experimental research of a transport unit"*

The increase in the speed of development and commissioning of new technology poses a challenge for scientists to conduct research more quickly. There is a need to change approaches to research methods and measuring devices. The main requirement is the speed of the research, the quality and relevance of the information. The use of highly sensitive sensors, on-board measuring devices and the corresponding software solves this problem. But the question arises of the synthesis of measuring sensors, the operation of which is based on the use of fundamentally different physical effects (induction, electromagnetic oscillations, radio waves). Each of these sensors has its own noise spectra; therefore, when conducting research and processing information, it is necessary to use filtering algorithms that can eliminate this drawback.

Recently, many scientists have been conducting experimental research using capacitive accelerometers. Their advantage is high sensitivity, ease of use and low price. But in the general case, readings of this type of accelerometer are subject to significant noise, which is usually caused by design and field conditions, which are characterized by stochastic factors associated with the operating environment: unwanted vibrations, high humidity and temperature, electromagnetic interference from other electromechanical and mechanical elements.

The analysis of the advantages and disadvantages of existing filters is carried out. Justification of the sequence of their application and settings required for field research in real time.

It has been determined that the use of a cascade of active filters is necessary when conducting research in the field, since such filters can be built into the software, which will significantly increase the speed and quality of research. With accurate information about the source of unwanted noise, the application of the principles of Fourier transform allows you to divide the entire signal into components and carry out further processing with those parts that provide the most relevant information in accordance with the research objectives.

Unify the software for various conditions of the experiment in real time, possibly by providing modular connection, or disconnecting individual filters from the main filtering cascade.

**Keywords:** transport unit, experimental study, accelerometer, filtration, dynamic loads.

## Вступ

Збільшення швидкості розробки та введення в експлуатацію нової техніки, що є необхідною складовою конкурентної боротьби світових виробників, ставить перед науковцями ряд питань при експериментальних дослідженнях. Зараз не можливо досліджувати параметри роботи автомобіля, чи трактора місяцями, або роками, бо за цей час він програє конкурентні боротьбу і втратить комерційну привабливість для кінцевого споживача. Тому, як до методик досліджень, так і до вимірювального обладнання висуваються зовсім інші вимоги. Це швидкість проведення дослідження, якість та релевантність інформації. Вирішенням цього завдання є застосування високочутливих датчиків та відповідного програмного забезпечення. Одна з найбільш важких проблем яку необхідно вирішити це синтез вимірювальних датчиків, робота яких спирається на застосування принципово різних фізичних ефектів (індукція, електромагнітні коливання, радіохвилі). Для кожного з таких датчиків властиві свої спектри шумів тому при проведенні досліджень та обробці інформації потрібно використовувати алгоритми фільтрації здатні усунути цей недолік.

Світовий досвід доводить, що одним з найкращих варіантів вирішення цієї проблеми є застосування дублюючих систем моніторингу. При виборі систем дублювання необхідно пам'ятати, що застосування великої кількості вимірювального обладнання призведе до ускладнення проведення дослідів та знизить їх ефективність, тому необхідно застосовувати необхідний мінімум приладів. При обранні яких потрібно керуватися правилом – для визначення узагальнених параметри функціонування техніки (прискорення, швидкість, буксування рушіїв) застосовується не менше двох дублюючих систем. Наприклад для визначення прискорення окрім акселерометра застосувати радар чи лідар.

### Актуальність проблеми

Останнім часом багато науковців проводять експериментальні дослідження з використанням ємнісних акселерометрів. Їх перевагою є висока чутливість, простота у використанні та не висока ціна. Але в загальному випадку показання, такого типу акселерометру, схильні до значного шуму, який зазвичай викликаний особливостями конструкції та умовами проведення польових досліджень, яким властиві стохастичні чинники, які пов'язані з середовищем експлуатації: небажані вібрації, висока вологість та температура, електромагнітні перешкоди від інших електромеханічних або механічних елементів і т.д. При цьому, показник шуму може досягати 0,08g, що суттєво погіршує якість отриманих експериментальних даних, і як наслідок не дає можливість проводити порівняння результатів, які отримані при проведенні різних серій експериментальних досліджень. В результаті, одним з основних в використанні акселерометрів є питання результативності, репрезентативності та надійності виміряних величин. Тому, для скорочення рівня перешкод, які інкапсулюють релевантну інформацію, використовують додаткові етапи перетворення та обробки сигналу, який отримується.

### Аналіз останніх досліджень

Використання мобільних реєстраційних комплексів для проведення польових досліджень є необхідною складовою наукового дослідження в сучасних реаліях [1-4]. Також слід зауважити, що сучасні транспортні засоби для керування їх роботою та моніторингу навколишнього середовища обладнані великою кількістю датчиків, які можна застосовувати при дослідженні, за умови, погодження сигналів та відповідної обробки і фільтрації. Це в подальшому дозволить зменшити кількість обладнання, що додатково встановлюється при проведенні польового експерименту. Проте, як для бортових датчиків, так і для обладнання реєстраційних комплексів питання зашумлених даних є одним з основних, що погіршують якість отриманої інформації.

Одним з методів боротьби з зашумленими даними є використання фільтру – частотно-вибіркового пристрою, який пропускає сигнали певної частоти та затримує або зменшує сигнали інших частот [5]. При цьому, задача аналізу динаміки системи формулює базову вимогу до фільтру – продуктивність, яка достатня для використання фільтру в режимі реального часу з мінімальними затримками сигналу.

В залежності від діапазону частот, які відносяться до смуги пропускання та смуги пригнічення, розрізняють фільтри низькочастотні, високочастотні, смугові та режекторні (загороджувальні) фільтри. Також використовуються всепропускні фільтри, які мають постійну амплітудно-частотну характеристику (фазочастотна характеристика представлена функціоналом частоти).

Фільтри нижніх частот являють собою групу фільтрів, які призначені для фільтрації сигналу наперед заданої частоти, що дозволяє позбутися шумових перешкод.

В сучасних технічних дослідженнях [5 – 11] розглядаються фільтри Бесселя (Гауса), Чебишева, Баттерворта, еліптичні фільтри, фільтри з критичним згасанням та ін. При цьому, дані фільтри нижніх частот в загальному випадку можуть бути описані передаточним функціоналом виду:

$$H(s) = \frac{k_0 + k_1s + k_2s^2 + k_3s^3 + \dots + k_ms^m}{c_0 + c_1s + c_2s^2 + c_3s^3 + \dots + c_Ns^N}, N \geq m, \quad (1)$$

де  $s$  – деяка комплексна змінна.

Для зручності використання вводять комплексну змінну  $s_n$ , яка є величиною, нормованою за частотою зрізу  $\omega_{zp}$  –  $s_n = s / \omega_{zp}$ .

Порядок поліному знаменника  $N$  характеризує порядок самого фільтру. Порядок чисельника  $m$  залежить від порядку фільтру та його типу. Фільтри, у яких порядок поліному чисельника нульовий, отримали назву поліноміальних фільтрів. До таких фільтрів відносяться фільтри Бесселя, Баттерворта, Чебишева 1-го роду та інші.

### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є аналіз переваг та недоліків існуючих фільтрів. Обґрунтування послідовності їх застосування та налаштувань необхідних при проведенні польових досліджень в режимі реального часу.

### Результати досліджень

Розглянемо наведені вище фільтри нижніх частот більш докладно. Фільтр Бесселя характеризується максимально гладкою груповою затримкою. В широкому діапазоні частот зсув по фазі вхідного та вихідного сигналів має пропорційну залежність з частотою, що визначає лінійний вигляд фазочастотної характеристики. Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) фільтру Бесселя має не достатньо великий кут спаду, що є суттєвим недоліком, який обмежує його використання.

Завдяки рівномірності зміни фази в залежності від частоти фільтр Бесселя майже не видає викидів при подачі на нього ступінчастих сигналів. Саме тому фільтр Бесселя доцільно використовувати при фільтрації сигналів тільки прямокутної форми.

Коефіцієнти фільтру Бесселя визначаються з виразу:

$$C'_k = \frac{2(N - k + 1)}{k(2N - k + 1)} C'_{k-1}, C_0 = C'_1 = 1 \quad (2)$$

де  $N$  – порядок фільтру;

$k$  – порядок  $s_n$ .

Амплітудно-частотна характеристика фільтру Чебишева найбільш круто переходить від смуги пропускання до смуги непрозорості. Фільтр першого роду має нерівномірності АЧХ в смузі пропускання, а фільтр другого роду – в смузі пригнічення. Окрім того, фільтр нижніх частот Чебишева другого роду, який також має назву інверсного фільтру Чебишева, має поліном від комплексної змінної  $S$  в чисельнику. В перехідних характеристиках обох типів фільтрів мають місце суттєві додатні викиди, величина яких залежить як від порядку фільтру, так і від коефіцієнта пульсації.

АЧХ фільтру першого роду будується на базі залежностей виду:

$$G_N(\omega) = |H_N(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\varepsilon T_N(\omega_n \gamma_n))^2}} \text{ для парних порядків,} \quad (3)$$

$$G_N(\omega) = |H_N(j\omega)| = \frac{\sqrt{1 + \varepsilon^2}}{\sqrt{1 + (\varepsilon T_N(\omega_n \gamma_n))^2}} \text{ для непарних порядків,} \quad (4)$$

де  $N$  – порядок фільтру;

$\varepsilon$  – коефіцієнт пульсації;

$T_N(\omega_n \gamma_n)$  – поліноми Чебишева  $N$ -го порядку;

$\gamma_n$  – коефіцієнт нормування за частотою.

Перевагою фільтра Чебишева є збільшення кута нахилу перехідної смуги при збільшенні амплітуди зубців. Можливість отримання високої швидкості зміни амплітуди на перехідній ділянці при відсутності умов рівномірності АЧХ дозволяє забезпечити за

допомогою фільтра Чебишева нахил перехідної ділянки з меншою кількістю ланок в порівнянні з усіма іншими фільтрами. Однак, основним недоліком фільтру Чебишева є нерівномірність фазочастотної характеристики.

Фільтр з критичним затуханням. Основною характеристикою даного фільтра є від'ємні дійсні полюси, які рівні між собою. При цьому, якщо передавальну функцію (1) представити у вигляді залежності:

$$H(s_n) = \frac{K_0}{(s_n - \alpha_1)(s_n - \alpha_2)(s_n - \alpha_3)\dots}, \quad (5)$$

тоді  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_i$ , і за умовою нормування:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_i = -\frac{1}{\sqrt{N\sqrt{2}-1}}; K_0 = |\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \dots \cdot \alpha_i|. \quad (6)$$

АЧХ фільтру має менший нахил спадання, ніж в інших фільтрах, а перехідна характеристика на має викидів.

Фільтр Баттерворта має максимальну гладку АЧХ на частотах смуги пропускання, яка прямує майже до нульового значення на частотах пригнічення. Даний фільтр в будь-якому порядку являє собою монотонно спадаючу функцію частоти АЧХ якої по нормованій частоті  $\omega_n$  має вигляд:

$$G(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega_n^{2N}}}. \quad (7)$$

Фільтр Баттерворта є єдиним фільтром, який має статичну форму АЧХ для більш високих порядків (не враховуючи більш крутих нахилів на смузі пригнічення), в той час як усі зазначені вище фільтри мають різні АЧХ при різних порядках поліномів.

В порівнянні з фільтрами Чебишева, даний фільтр має більш пологий спад характеристики і тому повинен мати більш високий порядок для забезпечення характеристики на смузі пригнічення.

Необхідно відмітити, що проектування даного фільтру відрізняється від інших фільтрів тим, що передбачає формування АЧХ з максимальною гладкістю на частотах смуги пропускання.

Необхідно відмітити, що, оскільки даний фільтр має високі показники ідентифікації системи, останній широко використовується дослідниками для аналізу та керування функціонуванням механічних систем.

В роботі [6] зазначено, що фільтр Баттерворта будь-якого порядку є стійким. Це дозволяє при настроюванні системи автоматичного регулювання (САР) на модульний оптимум не перевіряти на стійкість саму систему. Окрім того, сама САР стає оптимізованою за точністю та швидкістю.

В роботі [7], згідно протоколу фільтрації, рекомендовано для усіх каналів даних (не враховуючи кути повороту та кутову швидкість рульового колеса) використовувати саме фільтр Баттерворта.

Також, в роботах [8, 9] зазначено, що використання фільтру Баттерворта 12-го порядку з частотою відсічення 6 Гц призводить до зниження рівня шуму початкового сигналу та дозволяє підвищити точність експериментальної оцінки експлуатаційних властивостей колісних машин за допомогою акселерометрів.

В цілому, розглядаючи передавальні функціонали фільтрів нижніх частот можна відмітити, що для фільтрів першого порядку усіх типів передавальна функція однакова. Для

порядків  $N$  вище першого порядку передавальні функціонали розрізняються коефіцієнтами  $C_i$  – рис. 1.

Зі збільшенням порядку фільтру крутизна спаду АЧХ збільшується. Однак одночасно з цим реалізація фільтру стає складнішою та збільшується величина викиду перехідної характеристики. Саме тому, на практиці використовують фільтри з порядком, який не перевищує 10...12.

Для практичного використання широке розповсюдження отримали схеми активних фільтрів нижніх частот. Одним з основних методів проектування активних фільтрів, у яких порядок перевищує другий, є каскадне з'єднання ланок, що дозволяє отримати фільтр будь-якого порядку. Так, наприклад, каскадне з'єднання фільтрів першого та другого порядків дозволяє отримати фільтр третього порядку, а сумарний коефіцієнт передачі фільтру в такому разі дорівнює добутку коефіцієнтів передачі вихідних ланок.

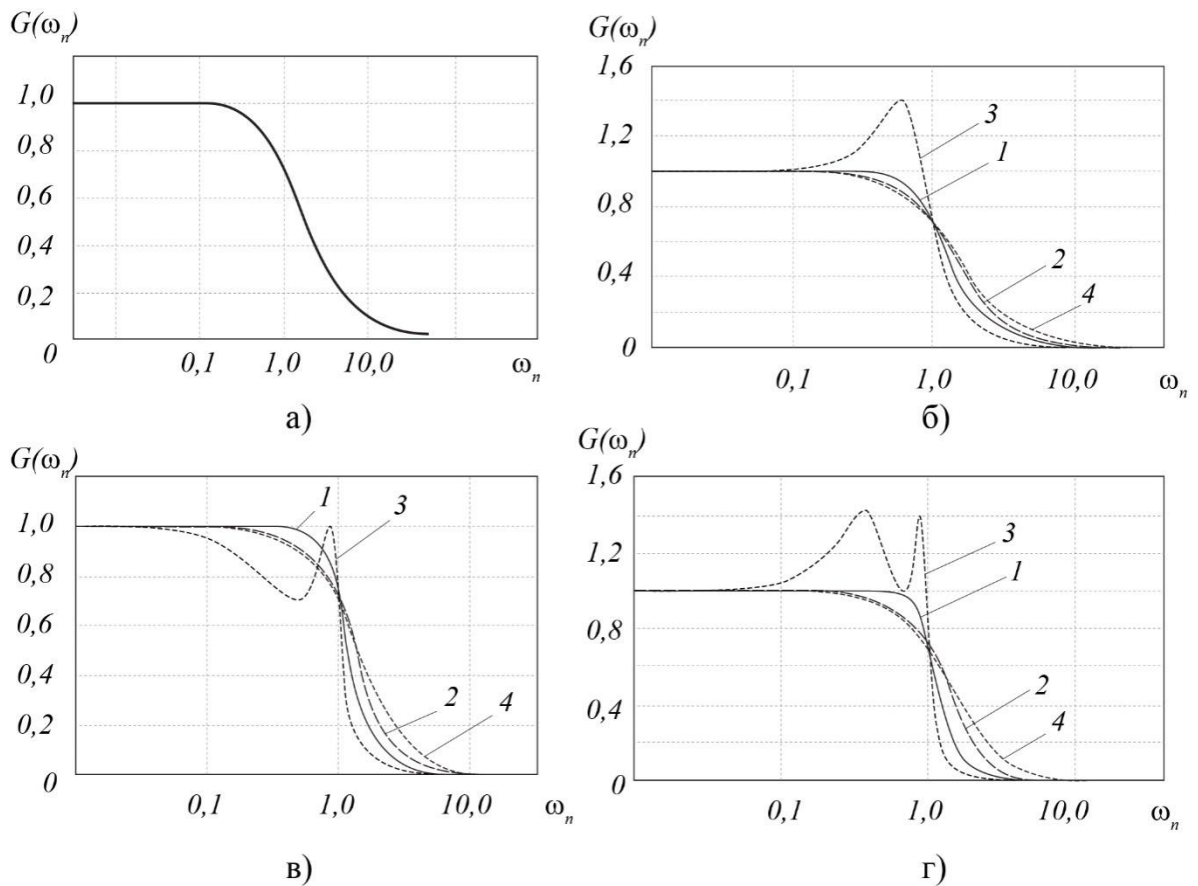


Рис. 1. Амплітудно-частотні характеристики фільтрів нижніх частот Баттерворта, Бесселя та Чебишева 1-го роду при  $\varepsilon=1$  і фільтра з критичним затуханням – криві 1, 2, 3 та 4 а – першого порядку; б – другого порядку; в – третього порядку; г – четвертого порядку

Для рекурсивного дооцінювання вектору стану відомої динамічної системи, в якості другої ланки каскаду активних фільтрів, найбільш широко використовують фільтр Калмана.

В загальному вигляді динаміка системи характеризується рівнянням виду:

$$x = Ax + Bu, \quad (8)$$

де  $x(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix}$  – вектор стану, складений з векторів відхилень  $q(t)$  від положення рівноваги та швидкостей  $\dot{q}(t)$  ланок системи;

$A$  – матриця, що характеризує динаміку системи,

$B$  – матриця врахування вектору  $u(t)$  керування системою.

Нехай в системі існують вимірювання, які визначаються виразом:

$$z = Cx, \quad (9)$$

де  $z$  – вектор вимірювань;

$C$  – матриця зв'язку вимірювань та вектору стану.

Для розрахунку оцінки стану системи на даному етапі фільтру Калмана необхідна оцінка стану (у вигляді оцінки стану системи та оцінки похибки визначення даного стану) на попередньому етапі та вектор  $z$  на даному.

Нехай  $x_{n|m}$  – оцінка істинного вектору  $x$  в момент  $n$  з врахуванням вимірювань з моменту початку досліду до момент  $m$  включно. Тоді, стан фільтру Калмана задається двома змінними:  $x_{k|k}$  – апостеріорна оцінка стану системи в момент  $k$ , яка отримана на базі результатів досліджень до моменту  $k$  включно;  $P_{k|k}$  – апостеріорна коваріаційна матриця похибок, яка задає оцінку точності отриманої оцінки вектору  $x$ .

Ітерація фільтру Калмана передбачає дві фази: екстраполяцію та корекцію.

Під час екстраполяції фільтр отримує попередню оцінку стану системи  $x_{k|k-1}$  на даний етап за кінцевою оцінкою стану з попереднього етапу. Таким чином, екстраполяція з шагу  $(k-1)$  до шагу  $k$  має вигляд:

$$x_{k|k-1} = A_k x_{k-1|k-1} + B_k u_{k-1}. \quad (10)$$

Таку попередню оцінку називають апріорною оцінкою стану, оскільки для її отримання не використовується вектор  $z$  даного етапу.

Коваріаційна матриця для екстрапольованого вектору стану має вигляд:

$$P_{k|k-1} = A_k P_{k-1|k-1} A_k^T + Q_{k-1}. \quad (11)$$

Під час фази корекції апріорна екстраполяція доповнюється відповідними значеннями з вектору  $z$  даного етапу для коректування оцінки. Скоректована оцінка також називається апостеріорною оцінкою стану, або оцінкою вектору стану  $x$ .

Відхилення отриманого на кроці  $k$  спостереження від спостереження, отриманого при виконаній екстраполяції визначиться виразом:

$$y_k = z_k - H_k x_{k|k-1}. \quad (12)$$

Коваріаційна матриця для вектору відхилень (вектору похибок) матиме вигляд:

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k. \quad (13)$$

Оптимальна, за Калманом, матриця коефіцієнтів підсилення, яка формується на базі коваріаційних матриць існуючої екстраполяції вектору стану та отриманих вимірювань:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1}. \quad (14)$$

Корекція раніше отриманої екстраполяції вектору стану – отримання оцінки вектору стану системи:

$$x_{k|k} = x_{k|k-1} + K_k y_k. \quad (15)$$

Розрахунок коваріаційної матриці оцінки вектору стану системи проводиться з рівняння виду:

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (16)$$

Вираз для коваріаційної матриці оцінки вектору стану системи є вірним тільки при використанні приведеного оптимального вектору коефіцієнтів.

У разі однієї змінної матриці вироджуються в скаляри наступного виду:  $A$  – змінна, що описує динаміку системи, отримує значення «1», тобто екстрапольоване значення буде дорівнювати значенню на попередньому етапі;  $B$  – змінна, що визначає використання керуючого впливу, отримує значення «0», оскільки такий вплив відсутній;  $H$  – матриця, що визначає співвідношення між вимірами та станом системи, отримує вигляд одиничної матриці.

Застосування каскаду активних фільтрів необхідно використовувати при проведенні досліджень в польових умовах, бо такі фільтри можна вбудувати в програмне забезпечення, що суттєво збільшить швидкість та якість проведення дослідження. При наявності точної інформації стосовно джерела небажаного шуму та можливості розділити повний сигнал на складові частки, або за допомогою налаштувань фільтрів, або на базі принципів, що застосовують при дискретному перетворенні Фур'є застосовувати комбіновану фільтрацію сигналів. Вилучення з повного сигналу складових, що генеруються двигуном, або рельєфом дороги дозволить більш точно дослідити характер зміни прискорення транспортного засобу при розгоні, чи сповільнення при гальмуванні.

Представлена компонента прискорення по осі  $x$  трактора John Deere 8310R при транспортуванні МЖТ–16 (рис. 2).

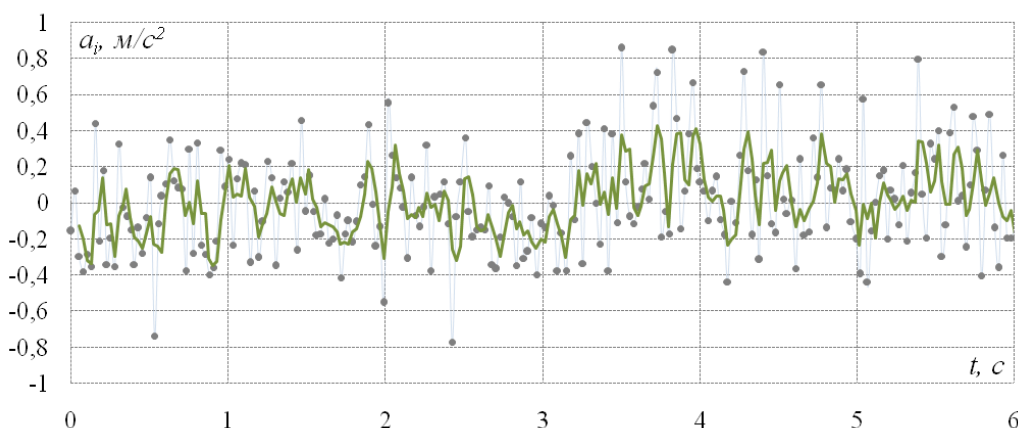


Рис. 2. Прискорення трактора John Deere 8310R при транспортуванні МЖТ–16

Дослідження проводилися при виконанні транспортно-технологічної операції, загальний вид агрегату та місця встановлення вимірального обладнання рис. 3



а)



б)

Рис. 3. Загальний вид транспортно-технологічного агрегату



Також слід зазначити, що необхідно максимально автоматизувати використання систем фільтрації, тобто зменшити кількість необхідних налаштувань параметрів особливо в польових умовах для отримання релевантної інформації в режимі реального часу. Проте для подальшої обробки та можливості застосування іншої послідовності каскаду фільтрів та зміни налаштувань, обов'язково потрібно закласти алгоритми інверсії сигналу на кожному етапі фільтрування.

Застосування вище зазначених фільтрів та ДПФ дозволяє виключити з основного сигналу шуми, що суттєво підвищує вірогідність вибору оптимального режиму з серії експериментів. За рахунок згладжування шумів різної фізичної природи досягається підвищення точності експериментальних досліджень.

### **Висновки**

Проведення наукового експерименту з використанням ємнісних акселерометрів вимагає застосування каскаду фільтрів параметри налаштування, яких необхідно обґрунтувати для кожної окремої задачі. Застосування принципів перетворення Фур'є надає можливість розділити повний сигнал на складові та проводити подальшу обробку з тими частинами, які надають найбільш релевантну інформацію у відповідності до задач дослідження. Окремі фільтри, як блоки, що можна підключити, або відключити, необхідно передбачити в програмному забезпеченні для реєстрації та обробки експериментальних сигналів. Це дасть можливість уніфікувати програмне забезпечення для різних умов проведення експерименту та проводити його в режимі реального часу.

### **Список використаних джерел**

1. Подригало М.А. Визначення необхідної кількості акселерометрів і місця їх установки при динамічних випробуваннях мобільних машин / М.А. Подригало, М.П. Артёмов, Д.М. Клец, А.І. Коробко // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХП», 2012. – № 2. – С. 127–135.
2. Артёмов М.П. Визначення тягових і енергетичних показників мобільних сільськогосподарських агрегатів при динамічних випробуваннях / М.П. Артёмов // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2018. – №. 13. – С. 115-120.
3. Антощенко Р. В. Вимірювальна система динамічних та тяговоенергетичних показників функціонування мобільних машин. Інженерія природокористування. Харків: ХНТУСГ, 2014. Вип. 2 (2). С. 15-19.
4. Сараев А. В. Информационное и метрологическое обеспечение аналогово-цифрового измерительного комплекса для исследования эксплуатационных свойств автомобиля / А. В. Сараев // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. - 2014. - № 2. - С. 155–162.
5. Артёмов М.П. Використання фільтра Баттерворта для підвищення точності дослідження динаміки машино-тракторних агрегатів / М.П. Артёмов // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». – 2013. – №2(70). – С. 153-158.
6. Аналоговые измерительные устройства [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://analogiu.ru/6/6-5-1.html>
7. Глобальные технические правила №8. Электронные системы контроля устойчивости / ESETRANS 180, 2008. – 116 с.
8. Клец Д.М. Метод повышения точности обработки данных, полученных в ходе испытаний мобильных машин, с помощью фильтра Баттерворта / Д.М. Клец // Вісник НТУ «ХП». Серія: Транспортне машинобудування. – 2012. – №60(966). – С. 98-104.
9. Бондаренко А.І. Просторова математична модель процесу гальмування колісного трактора Fendt 962 Vario/ А.І. Бондаренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – №5/4(53). – С. 47-51.

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

11. Клец Д.М. Разработка мобильного регистрационно-измерительного комплекса для проведения динамических испытаний колесных машин / Д.М. Клец // Вісник Національного транспортного університету. – 2012. – №25. – С. 234-241.

### References

1. Podrigalo M.A. Vznachennya neobhidnoyi kilkosti akselerometriv i miscya yih ustanovki pri dinamichnih viprobuvannya mobilnih mashin / M.A. Podrigalo, M.P. Artomov, D.M. Klec, A.I. Korobko // Mehanika ta mashinobuduvannya. – Harkiv : NTU «HPI», 2012. – № 2. – S. 127–135.

2. Artomov M.P. Vznachennya tyagovih i energetichnih pokaznikov mobilnih silskogospodarskih agregativ pri dinamichnih viprobuvannya / M.P. Artomov // Tehnichnij servis agropromislovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv. – 2018. – №. 13. – S. 115-120.

3. Antoshenkov R. V. Vimiryuvalna sistema dinamichnih ta tyagovoenergetichnih pokaznikov funkcionuvannya mobilnih mashin. Inzheneriya prirodokoristuvannya. Harkiv: HNTUSG, 2014. Vip. 2 (2). S. 15-19.

4. Saraev A. V. Informacionnoe i metrologicheskoe obespechenie analogovo-cifrovogo izmeritelnogo kompleksa dlya issledovaniya ekspluatatsionnyh svojstv avtomobilya / A. V. Saraev // Radioelektronni i komp'yuterni sistemi. - 2014. - № 2. - S. 155–162.

5. Artomov M.P. Vikoristannya filtra Battervorta dlya pidvishennya tochnosti doslidzhennya dinamiki mashino-traktornih agregativ / M.P. Artomov // Vseukrayinskij nauково-technichnij zhurnal «Vibraciyi v tehnici ta tehnologiyah». – 2013. – №2(70). – S. 153-158.

6. Analogovye izmeritelnye ustrojstva [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupu: <http://analogiu.ru/6/6-5-1.html>

7. Globalnye tehniccheskie pravila №8. Elektronnye sistemy kontrolya ustojchivosti / ESETRANS 180, 2008. – 116 с.

8. Klec D.M. Metod povysheniya tochnosti obrabotki dannyh, poluchennyh v hode ispytaniy mobilnyh mashin, s pomoshyu filtra Battervorta / D.M. Klec // Visnik NTU «HPI». Seriya: Transportne mashinobuduvannya. – 2012. – №60(966). – S. 98-104.

9. Bondarenko A.I. Prostorova matematiczna model procesu galmuvannya kolisnogo traktora Fendt 962 Vario/ A.I. Bondarenko // Shidno-Yevropejskij zhurnal peredovih tehnologij. – 2011. – №5/4(53). – S. 47-51.

10. Artomov M.P., Klec D.M. Dinamichni viprobuvannya datchikov priskoren na laboratornomu vibrostendi / M.P. Artomov, D.M. Klec // Vseukrayinskij nauково-technichnij zhurnal «Vibraciyi v tehnici ta tehnologiyah». – 2012. – №2(66). – S. 5-9.

11. Klec D.M. Razrabotka mobilnogo registracionno-izmeritelnogo kompleksa dlya provedeniya dinamicheskikh ispytaniy kolesnyh mashin / D.M. Klec // Visnik Nacionalnogo transportnogo universitetu. – 2012. – №25. – S. 234-241.