

УДК 621.01:531.01

Математичний апарат обробки даних вимірювальною системою динаміки та енергетики мобільних машин

Р.В. Антощенко

Харківський національний технічний університет сільського господарства
ім. П. Василенка (м. Харків, Україна), roman.tiaxntusg@gmail.com

Розглядається математичний апарат обробки даних вимірювальною системою динаміки та енергетики мобільних машин. Мобільні машини працюють в умовах вібрацій і шумів, що створюються навколишнім середовищем та технологічними знаряддями. Дослідження динаміки функціонування мобільних машин потребують нових методів та засобів дослідження для цього використана вимірювальна система динаміки та енергетики мобільних машин. Сигнали датчиків вимірювальної системи складаються з чотирьох компонентів: дійсного прискорення, куту нахилу машини відносно горизонту, вібрації, що створює навколишнє середовище при русі та власний шум датчика. Пропонується алгоритм, що відокремлює перераховані компоненти сигналу. Проаналізовані алгоритми обробки даних сигналів прискорень машин, методів Фур'є. Першим етапом відбувається коригування значень сигналів акселерометрів та гіроскопів. Обробка фільтром Баттерворту. Визначення кутів нахилу машини відносно горизонту. Компенсація відцентрової сили та сили тяжіння Землі. Швидкість машини по трьом осям визначається інтегруванням. Для синтезу фільтру Баттерворту з частотою зрізу 3 Гц використаний GNU Octave. Отримані дані швидкості руху, прискорень, кутів нахилу та кутових швидкостей спільно з сигналами навігаційного приймача GPS обробляються фільтром Калмана. Він працює за двома етапами: перший – це передбачення та другий – корекція. Приведене графічне зображення алгоритму обробки даних вимірювальною системою. Перевірка якості роботи математичного апарату обробки даних вимірювальною системою проведена на результатах експериментальних досліджень трактору John Deere 8345R у складі посівного агрегату та трактору ХТЗ-17224 при русі по колу.

Ключові слова: мобільна машина, вимірювальна система, сигнал, фільтр Баттерворту та Калмана, прискорення, швидкість, куту.

Вступ. Мобільні машини (ММ), зокрема трактори і автомобілі, працюють в умовах вібрацій і шумів, що створюються навколишнім середовищем та технологічними знаряддями. Особливості руху цих систем та відповідність їх своєму функціональному призначенню – це фактори від яких залежать ступінь досконалості ММ. Подальше розширення технологічних можливостей і сфери їх застосування вимагають поглибленого вивчення процесу їх функціонування [1]. Дослідження динаміки функціонування ММ потребують нових методів та засобів дослідження, тому на кафедрі «Трактори і автомобілі» ХНТУСГ була створена вимірювальна система динаміки та енергетики мобільних машин (ВС) [2].

Сигнали датчиків ВС, з аналітичної точки зору, складаються з чотирьох компонентів:

1. Дійсне прискорення (це прискорення, що діє повздовж відповідної вісі ММ та створюється ним).
2. Кут нахилу ММ відносно горизонту.
3. Вібрації, що створює навколишнє середовище при русі, в стаціонарному режимі або технологічною машиною.
4. Власний шум датчика.

Перераховані компоненти сигналу впливають на точність визначення та потребують відокремлення.

Аналіз основних публікацій, досліджень. В теперішній час поширюються кількість досліджень динаміки тракторів і автомобілів з використанням датчиків прискорень [3, 4]. В цих та інших роботах не достатньо приділено уваги обробки даних отриманих з датчиків при випробуваннях. В роботах [5, 6] обґрунтовані похибки вимірювання, що вносять датчики. Значне поширення отримали методи, що базуються на перетворенні Фур'є [7]. Мельником В.І. запропонований метод уточнення траєкторії руху сошнику [8]. Однак всі перераховані компоненти сигналу потребують обґрунтування алгоритму та математичного апарату для їх відокремлення від корисного сигналу.

Метою даної роботи є обґрунтування алгоритму обробки даних вимірювальною системою динамічних та енергетичних показників мобільних машин.

Вирішення задачі. Осі трьохосового акселерометру або гіроскопу встановлений в корпусі інерційного вимірювального пристрою (ІВП) мо-

жуть не співпадати з дійсними осями датчику [9], тому необхідно компенсувати похибку його встановлення.

Датчики, що використовуються в інерційному ІВП мають лінійні залежності фізичної величини та вихідного сигналу. Використаємо лінійні рівняння для компенсації похибки.

Першим етапом обробки даних, що надходять від гіроскопу та акселерометру, необхідно відкоригувати їх значення:

$$\mathbf{a}_c = \begin{bmatrix} a_x c \\ a_y c \\ a_z c \end{bmatrix} = \mathbf{a}_r \cdot \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_x r \\ a_y r \\ a_z r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & b_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\omega}_c = \begin{bmatrix} \omega_x c \\ \omega_y c \\ \omega_z c \end{bmatrix} = \boldsymbol{\omega}_r \cdot \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \omega_x r \\ \omega_y r \\ \omega_z r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & c_1 \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & c_2 \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

де $\mathbf{a}_r = [a_x r \ a_y r \ a_z r]^T$ – вхідний сигнал акселерометру; $\boldsymbol{\omega}_r = [\omega_x r \ \omega_y r \ \omega_z r]^T$ – вхідний сигнал гіроскопу; $\mathbf{a}_c = [a_x c \ a_y c \ a_z c]^T$ – корегований сигнал акселерометру; $\boldsymbol{\omega}_c = [\omega_x c \ \omega_y c \ \omega_z c]^T$ – корегований сигнал гіроскопу; \mathbf{G} – матриця корегування гіроскопу; a_{ij}, b_i, g_{ij}, c_i – коефіцієнти матриць корегування.

Мобільні машини, зокрема трактори і автомобілі, працюють в умовах вібрацій і шумів, що створюються навколишнім середовищем та технологічними знаряддями. Розглянемо сигнал, що вимірює датчик прискорення (акселерометр) (рис. 1).

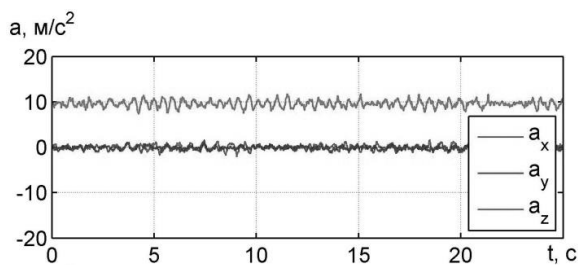


Рис. 1. Прискорення трактора John Deere 8345R по осям $x - a_x$, $y - a_y$ та $z - a_z$

Основний спектр коливань рами трактора John Deere 8345R при сівбі зернових культур (рис. 2) знаходиться в межах від 0 до 3 Гц [10].

Максимальна енергія коливань відповідає частоті 3 Гц. Друга гармоніка коливань знаходиться на частоті 10 Гц, а третя – 20 Гц, тому для виділення шуму та вібрацій необхідно використати фільтр нижніх частот Баттерворта [11] з частотою зрізу 3 Гц. Даний фільтр пропонується використовувати для фільтрації даних датчиків при дослі-

дженнях динаміки мобільних машин Клецом Д.М., Артёмовим М.П. [12, 13] та затверджений в РД 37.001.159-90 [14] при проведенні випробувань та дослідженнях мобільних машин.

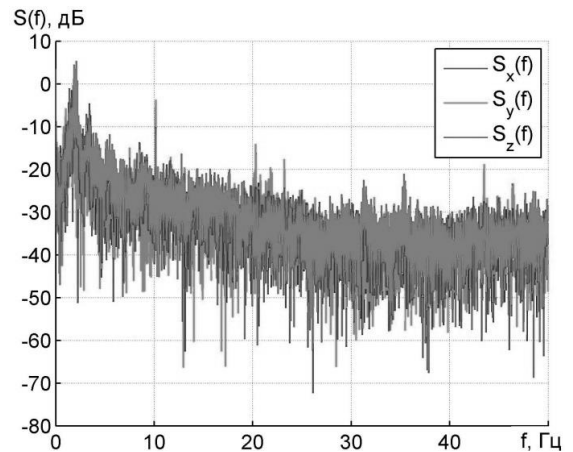


Рис. 2. Нормована спектральна щільність $S(f)$ коливань рами трактора John Deere 8345R по осям $x - S_x$, $y - S_y$, $z - S_z$

Для синтезу фільтру та обробки даних використовуємо GNU Octave [7, 11]. Порядок фільтру $n = 20$, а частота зрізу $f = 6$ Гц:

$$\text{Hd} = \text{butter}(20, 0.06);$$

$$\text{out} = \text{filter}(\text{Hd}, \text{in}).$$

Корегований сигнал акселерометру \mathbf{a}_c та гіроскопу $\boldsymbol{\omega}_c$ обробляються за допомогою фільтру Баттерворта:

$$\mathbf{a}_r = \text{filter}(\mathbf{a}_c),$$

$$\boldsymbol{\omega} = \text{filter}(\boldsymbol{\omega}_c), \quad (2)$$

де $\mathbf{a}_r = [a_x f \ a_y f \ a_z f]^T$ та $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ – матриці-вектори фільтрованого сигналу акселерометру та гіроскопу.

Після фільтрації сигналу гіроскопу (2) отримуємо дійсне значення кутової швидкості обертання $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ датчика навколо осей x, y, z .

Матрицю-вектор $\boldsymbol{\theta} = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T$ кутів повороту датчика α, β, γ навколо осей x, y, z можна знайти вирішивши наступну систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin \beta \cdot \sin \alpha}{\cos \beta} & \frac{\sin \beta \cdot \cos \alpha}{\cos \beta} \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \frac{\sin \beta}{\cos \beta} & \frac{\cos \beta}{\cos \beta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

У випадку коли ІВП встановлений не в центрі мас мобільної машини або її

елемента необхідно відняти від прискорення відцентрову силу:

$$\mathbf{a}_b = \begin{bmatrix} a_x b \\ a_y b \\ a_z b \end{bmatrix} = \mathbf{a}_f - \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{v} = \begin{bmatrix} a_x f \\ a_y f \\ a_z f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $\mathbf{v} = [v_x v_y v_z]^T$ – швидкість руху мобільної машини повздовж відповідних осей x , y та z .

Після віднімання відцентрової сили від прискорення необхідно відняти гравітаційну складову і таким чином отримаємо дійсне його значення:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \mathbf{a}_b + g \cdot \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \cdot \sin \alpha \\ \cos \beta \cdot \cos \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x b \\ a_y b \\ a_z b \end{bmatrix} + g \cdot \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \cdot \sin \alpha \\ \cos \beta \cdot \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Швидкість руху мобільної отримаємо інтегруванням прискорення:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^t a_x dt + v_x|_{t=0} \\ \int_0^t a_y dt + v_y|_{t=0} \\ \int_0^t a_z dt + v_z|_{t=0} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де $v_x|_{t=0}$, $v_y|_{t=0}$, $v_z|_{t=0}$ – початкове значення швидкостей.

Таким чином отримано дійсні кутові швидкості ММ (3), прискорення (5) і швидкість (6) та враховуючи похибки вимірювання інерційно-вимірювального пристрою необхідно отримані дані обробити фільтром Калмана.

Для боротьби з випадковими помилками, які можливі через боковий увід коліс, буксування, наявність нерівностей на поверхні пересування мобільної машини, використовують методи фільтрації. Крім того, усуненню випадкових помилок сприяє об'єднання інформації з різних датчиків, розташованих на платформі машини. Тому найкращим методом отримання точних параметрів поточного місцезнаходження є Калманівська фільтрація, що дає оптимальну за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки оцінку положення. Успіх фільтрації з допомогою фільтра Калмана полягає у [15, 16]:

– відносній простота та доступності для інженерних розробок нестационарних фільтрів у різних технічних додатках;

– можливість аналітичного доведення та підтвердження оптимальності фільтрації у різних за складністю варіантах конструктивного виконання фільтрів;

– наочність аналітичного апарату, що базується на звичайних диференціальних або різницевих рівняннях, на відміну від вінерівської фільтрації, яка вимагає розв'язання інтегральних рівнянь;

– можливість оцінити стан системи у часовій області на основі статистичних даних про всі джерела та характер похибок;

– можливість побудовання фільтрів для багатовимірних динамічних систем на основі Гільбертового уявлення простору стану;

– можливість одержання рекурентної системи алгоритмів і рекурсивних процедур оптимальної фільтрації, що набагато зручніше при використанні сучасних ЕОМ.

Застосування різних варіантів побудови фільтра Калмана (лінійного, адаптивного) в задачі відносної локалізації мобільних машин описано в роботах [17-19]. Проте всі отримані алгоритми мають високу обчислювальну складність, що є критичним для сучасних процесорів. Адже паралельно із завданням локалізації необхідно вирішувати задачі маршрутизації, обробки зображень, реалізації алгоритмів самонавчання, що вимагає величезних обчислювальних витрат.

Мета фільтра Калмана – мінімізація дисперсії оцінки векторного випадкового процесу $\mathbf{x}(k)$, що змінюється за часом у такий спосіб:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{u}(k), \quad (7)$$

де $\mathbf{A}(k)$ – матриця переходу; $\mathbf{u}(k)$ – випадковий вектор керування, або шум процесу, що має нормальний розподіл за кореляційною матрицею $\mathbf{Q}_p(k)$.

Для спостереження доступний лінійно перетворений процес $\mathbf{y}(k)$ спостереження, до якого додається шум:

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k), \quad (8)$$

де $\mathbf{H}(k)$ – матриця спостереження; $\mathbf{w}(k)$ – шум спостереження, що представляє собою випадковий вектор, що має нормальний розподіл з коваріаційною матрицею $\mathbf{Q}_m(k)$.

Пошук алгоритму для рекурсивного відновлення оцінки процесу $\bar{\mathbf{x}}(k)$ дає наступну послідовність формул:

– прогнозоване значення спостережуваного сигналу:

$$\bar{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C}(k) \mathbf{A}(k) \bar{\mathbf{x}}(k-1); \quad (9)$$

– визначення різниці між прогнозованим і спостережуваним значеннями:

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{y}(k) - \bar{\mathbf{y}}(k); \quad (10)$$

– розрахунок коефіцієнта підсилення фільтру:

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k-1) \mathbf{C}^T(k) \times (\mathbf{C}(k) \mathbf{P}(k-1) \mathbf{C}^T(k) + \mathbf{Q}_M(k))^{-1}; \quad (11)$$

– відновлення оцінки процесу $\mathbf{x}(k)$:

$$\bar{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{A}(k) \bar{\mathbf{x}}(k-1) + \mathbf{K}(k) \mathbf{e}(k); \quad (12)$$

– відновлення оцінки кореляційної матриці помилок фільтрації:

$$\mathbf{P}(k) = \mathbf{A}(k) [\mathbf{P}(k-1) - \mathbf{K}(k) \mathbf{C}(k) \mathbf{P}(k-1)] \cdot \Phi^T(k) + \mathbf{Q}_M(k). \quad (13)$$

Фільтр Калмана працює двома етапами: перший – це передбачення та другий – корекція.

Вектор стану \mathbf{x} вимірювальної системи, що включає датчики прискорення, гіроскоп та навігаційний приймач буде наступним:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_{GPS} \quad \mathbf{v}_{GPS} \quad \mathbf{a} \quad \boldsymbol{\theta} \quad \boldsymbol{\omega}]^T. \quad (14)$$

Матриця переходу \mathbf{A} розраховується із динамічної системи вимірювальної системи, яка будується за класичними законами динаміки трьох вимірній декартовій системі координат. Динамічна система просторового руху мобільної машини, динаміка якої визначається за допомогою датчиків описується системою:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x dt, \\ y = y_0 + v_y dt, \\ z = z_0 + v_z dt, \\ v_x = v_{x0} + a_x dt, \\ v_y = v_{y0} + a_y dt, \\ v_z = v_{z0} + a_z dt, \\ \alpha = \alpha_0 + \omega_x dt, \\ \beta = \beta_0 + \omega_y dt, \\ \gamma = \alpha_0 + \omega_x dt. \end{cases} \quad (15)$$

При відсутності вектору керування \mathbf{u} рівняння оцінки вектору стану (15) має вигляд:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_k, \quad (16)$$

Рівняння спостереження для даної динамічної системи, за умови одночасного виміру всіх елементів вектору \mathbf{x} (16), буде наступним:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \cdot \mathbf{x}_k. \quad (17)$$

Схема алгоритму обробки даних вимірювальною системою, що включає обробку фільтром Баттерворту, компенсацію відцентрових швидкостей, кутів нахилу, прискорення вільного падіння та обробку фільтром Калмана, представлена на рис. 3.

Розрахуємо статистичні дані сигналів прискорення за допомогою GNU Octave та результати порівняння сигналів зведемо до табл. 1.

Аналіз статистичних даних сигналів прискорення трактора John Deere 8345R (рис. 4, табл. 1) дозволяє зробити висновок щодо ефективності запропонованого алгоритму обробки даних вимірювальною системою, що включає фільтр Калмана, тому що, відбулося зниження стандартного відхилення $\sigma_{a_x} = 0,543$, $\sigma_{a_y} = 0,424$ і $\sigma_{a_z} = 0,957$ до $\sigma_{a_x, \text{filtered}} = 0,157$, $\sigma_{a_y, \text{filtered}} = 0,153$ і $\sigma_{a_z, \text{filtered}} = 0,080$; дисперсії вибірки $D_{a_x} = 0,295$, $D_{a_y} = 0,180$, $D_{a_z} = 0,917$ до $D_{a_x, \text{filtered}} = 0,025$, $D_{a_y, \text{filtered}} = 0,024$ і $D_{a_z, \text{filtered}} = 0,006$.

Фільтрований сигнал та необроблений сигнал з навігаційного приймача вимірювальної системи траєкторії руху трактору ХТЗ-17224 по колу під час експериментальних досліджень наведений на рис. 5. Ефективність запропонованого алгоритму обробки даних вимірювальною системою можна підтвердити з аналізу траєкторії руху трактора по колу (рис. 5).

Таблиця 1. Статистичні дані сигналів прискорення трактора John Deere 8345R

Значення	Не фільтрований			Фільтрований		
	a_x	a_y	a_z	$a_{x, \text{filtered}}$	$a_{y, \text{filtered}}$	$a_{z, \text{filtered}}$
Середнє, \bar{x}	-0,054	-0,033	9,573	-0,067	-0,034	9,570
Стандартна похибка, S	0,007	0,005	0,012	0,002	0,002	0,001
Медіана, m	-0,080	-0,010	9,570	-0,077	-0,032	9,574
Стандартне відхилення, σ	0,543	0,424	0,957	0,157	0,153	0,080
Дисперсія, D	0,295	0,180	0,917	0,025	0,024	0,006
Ексцес	0,284	0,070	0,006	2,781	6,511	6,019
Асиметричність	0,108	-0,047	0,029	0,992	-0,020	-0,406
Інтервал	3,920	2,910	5,890	1,031	1,236	0,883
Мінімум	-2,050	-1,460	6,710	-0,418	-0,659	9,183
Максимум	1,870	1,450	12,600	0,612	0,577	10,067

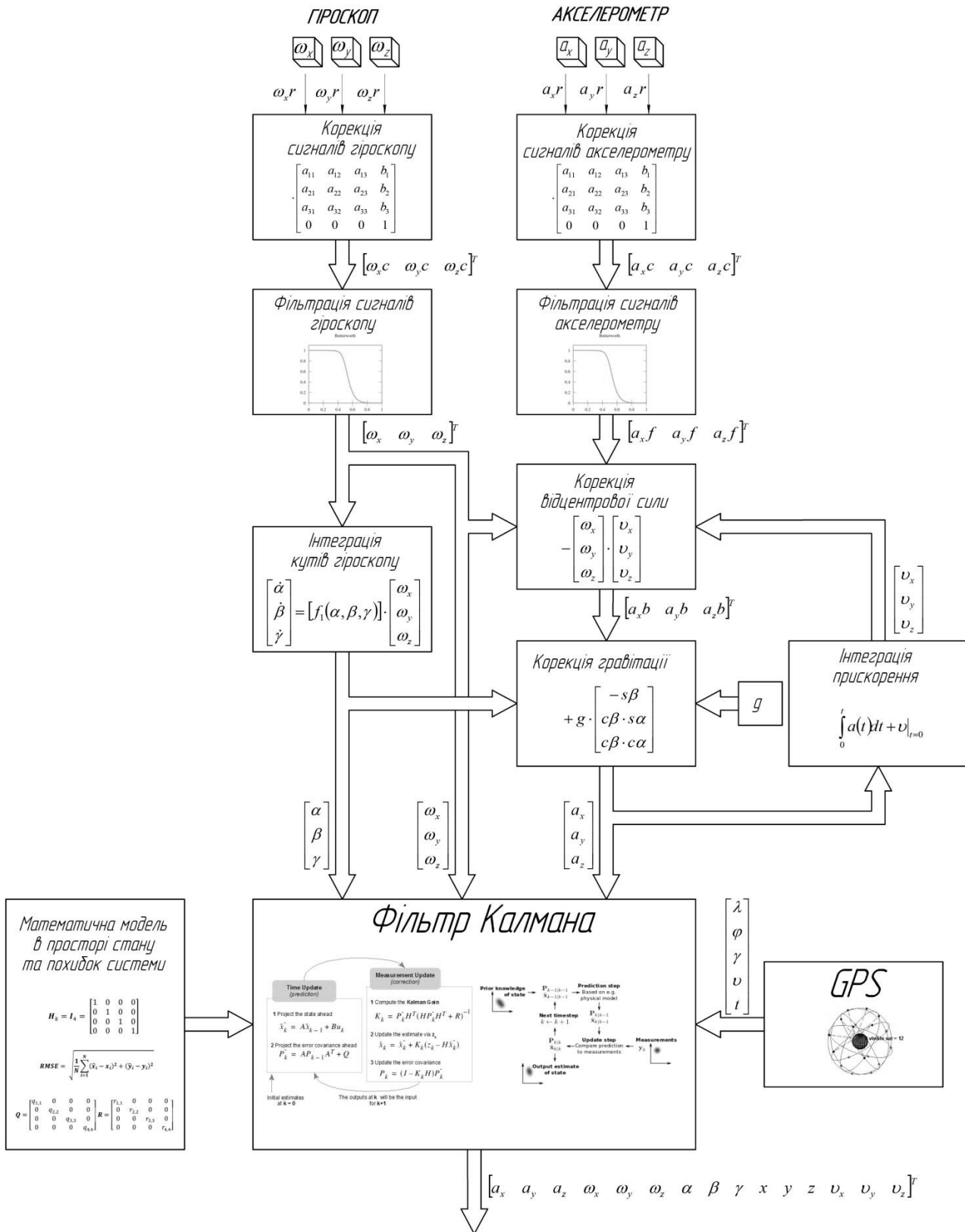


Рис. 3. Схема алгоритму обробки даних вимірювальною системою динаміки та енергетики мобільних машин

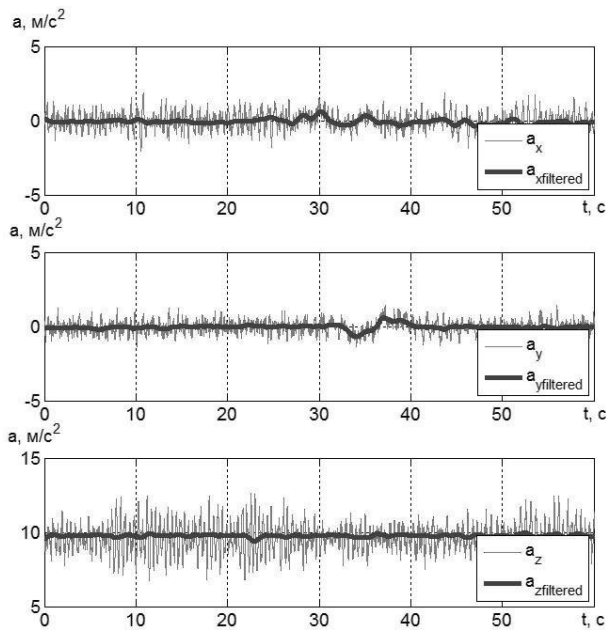


Рис. 4. Прискорення трактору John Deere 8345R при прямолінійному русі по вісям x , y , z :
 a_x , a_y , a_z – не фільтрований сигнал з датчику;
 $a_{x \text{ filtered}}$, $a_{y \text{ filtered}}$, $a_{z \text{ filtered}}$ – фільтрований сигнал

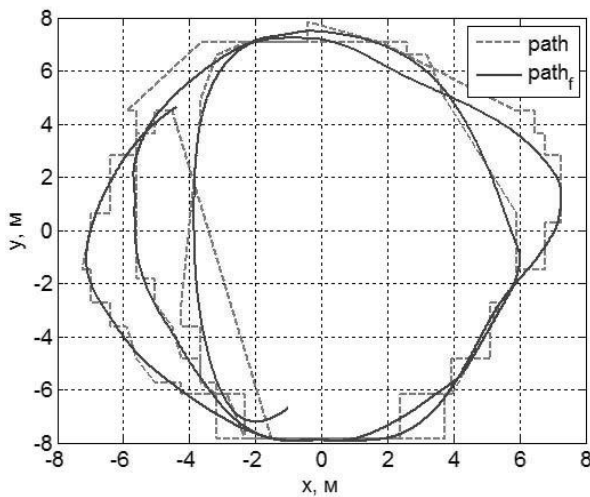


Рис. 5. Траєкторія руху трактору ХТЗ-17224 по колу (- - - – не фільтрований сигнал, — – фільтрований)

Висновки.

1. В роботі запропонований математичний апарат обробки даних вимірювальною системою динаміки та енергетики мобільних машин.

2. Сигнали датчиків вимірювальної системи складаються з чотирьох компонентів: дійсного прискорення, куту нахилу машини відносно го-

ризонту, вібрації, що створює навколишнє середовище при русі та власний шум датчика. Запропонований алгоритм відокремлює перераховані компоненти сигналу від корисного.

3. Перевірка якості роботи математичного апарату обробки даних вимірювальною системою проведена на результатах експериментальних досліджень трактору John Deere 8345R у складі посівного агрегату та трактору ХТЗ-17224 при русі по колу.

Література

1. Рославцев А.В. Средства исследования движения МТА [Текст] / А.В. Рославцев, В.М. Авдеев, В. М. Третьяк, С.Л. Абдула и др. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1999. № 3. – С. 26 - 29.
2. Антощенко Р.В. Спосіб та вимірювальна система для визначення енергетичних витрат мобільної машини [Текст] / Р.В. Антощенко, В.М. Антощенко // Технічний сервіс машин для рослинництва: Вісник ХНТУСГ. – Х.: ХНТУСГ, 2014. – Вип. 145. – С. 210 - 216.
3. Артемов Н.П. Метод парциальных ускорений и его приложения в динамике мобильных машин. Монография [Текст] / Н.П. Артёмов, А.Т. Лебедев, М.А. Подрыгалo, А.С. Полянский, Д.М. Клец, А.И. Коробко, В.В. Задорожня, под ред. М.А. Подрыгалo // – Харьков: Міськдрук, 2012. – 220 с.
4. Шадрин С.С. Методика расчетной оценки управляемости и устойчивости автомобиля на основе результатов полигонных испытаний [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / С.С. Шадрин. – М., 2009. – 130 с.
5. Сысоева С. Автомобильные акселерометры [Текст] / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2005. – № 8. – С. 12 - 18.
6. BOSCH. Автомобильный справочник / [пер. с англ.]; первое русское издание. – М.: За рулем, 2000. – 896 с.
7. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А.Б. Сергиенко / СПб.: Питер. – 2002. – 608 с.
8. Мельник В.И. Особенности методики восстановления траектории сошника методом парциальных ускорений [Текст] / В.И. Мельник, Р.В. Антощенко, Аль-Фтиххат Моусаб Абдулвахид Моххамед // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2014. – Вип. 14., Т. 3. – С. 144 - 155.
9. Salychev O. Applied inertial navigation: problems and solutions [Text] / O. Salychev. – М.: BMSTU Press. – 2004. – 304 p.

10. Антощенко Р.В. Обработка данных мобильного вимірювального комплексу для контролю за функціонуванням мобільних енергетичних засобів [Текст] / Р.В. Антощенко // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця, 2013. – №2(70) – С. 6-9.

11. Алексеев Е.Р. Введение в Octave для инженеров и математиков [Текст] / Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова – М.: ALT Linux, 2012. – 368с.

12. Артемов Н.П. Повышение точности обработки данных полученных в ходе испытании мобильных машин с помощью фильтра Баттерворта [Текст] / Н.П. Артемов, Д.М. Клец // Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства. Міжнародна науково-технічна конференція студентів, молодих учених. Матеріали конференції – Кременчук: КрНУ, 2013 – С. 162.

13. Клец Д.М. Повышение точности экспериментальной оценки эксплуатационных свойств колесных машин с помощью фильтра Калмана [Текст] / Д.М. Клец // Техніко-технологічні аспекта розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук.пр. ДНУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого – Дослідницьке: УкрНДІПВТ, 2012 – Вип. 16(30), кн. 1. – С. 467 - 484.

14. РД 37.001.159-90. Нормы точности измерений, метрологические характеристики средств измерений, применяемых при проведении сертификационных испытаний. – 50 с.

15. Dorobantu, R. Field Evaluation of a Low-Cost Strapdown IMU by means GPS. Ortung und Navigation / R. Dorobantu, B. Zebhauser // DGON. Bonn. – 1999. – pp. 51 - 65.

16. Умінський В.В. Диференційна модель фільтра Калмана для локалізації автономного мобільного робота [Текст] / В.В. Умінський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – № 1. – С. 33 - 36.

17. Negenborn R. Robot Localization and Kalman Filters: On finding your position in a noisy world. – Thesis, Utrecht university, 2003. – 156 p.

18. Забегаев А.Н. Адаптация фильтра Калмана для использования с локальной и глобальной системой навигации [Текст] / А.Н. Забегаев, В.Е. Павловский // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010, № 82. – 24 с.

19. Robot Localization and Map Building / Edited by Hanafiah Yussof, 2010. – 578 p. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.intechopen.com/books/robot-localization-and-map-building>.

Аннотация

Математический аппарат обработки данных измерительной системой динамики и энергетики мобильных машин

Р.В. Антощенко

Рассматривается математический аппарат обработки данных измерительной системой динамики и энергетики мобильных машин. Мобильные машины работают в условиях вибраций и шумов, создаваемых окружающей средой и технологическими орудиями. Исследование динамики функционирования мобильных машин требует новых методов и средств исследования и для этого использована измерительная система динамики и энергетики мобильных машин. Сигналы датчиков измерительной системы состоят из четырех компонентов: действительного ускорения, угла наклона машины относительно горизонта, вибрации, созданной окружающей средой при движении и собственный шум датчика. Предлагаемый алгоритм, отделяет перечисленные компоненты сигнала. Проанализированы алгоритмы обработки данных сигналов ускорений машин, методами Фурье. Первым этапом происходит корректировка значений сигналов акселерометров и гироскопов. Обработка фильтром Баттерворта. Определение углов наклона машины относительно горизонта. Компенсация центробежной силы и силы притяжения Земли. Скорость машины по трем осям определяется интегрированием. Для синтеза фильтра Баттерворта с частотой среза 3 Гц использован GNU Octave. Полученные данные скорости движения, ускорений, углов наклона и угловых скоростей совместно с сигналами навигационного приемника GPS обрабатываются фильтром Калмана. Он работает по двум этапам: первый – это предвидение и второй – коррекция. Приведенное графическое изображение алгоритма обработки данных измерительной системой. Проверка качества работы математического аппарата обработки данных измерительной системой проведена на результатах экспериментальных исследований трактора John Deere 8345R в составе посевного агрегата и трактора ХТЗ-17224 при движении по кругу.

Ключевые слова: *мобильная машина, измерительная система, сигнал, фильтр Баттерворта и Калмана, ускорение, скорость, углы.*

Abstract

The mathematical apparatus of the data measurement system dynamics and power of mobile machines

R.V. Antoshchenkov

Considered mathematical data processing unit of the measuring system dynamics and power of mobile machines. Investigation of the dynamics of mobile machine operation requires new methods and means of research and used for this measuring system dynamics and power of mobile machines. The signals of the measuring system of sensors consist of four components: the actual acceleration, the angle of the car relative to the horizon, the vibrations created by the environment with motion sensor and its own noise. The algorithm separates the listed components of the signal. Analyzed signal processing algorithms accelerations machines, Fourier methods. The first stage is a correction signal values of accelerometers and gyroscopes. Processing Butterworth filter. Determination of angles of inclination of the machine relative to the horizon. Compensation of centrifugal force and the Earth's gravity. Machine speed in three axes is determined by integration. For the synthesis of a Butterworth filter with a cutoff frequency of 3 Hz used GNU Octave. The received data speed, acceleration, inclination angle and angular velocity in conjunction with the GPS navigation signals are processed by a Kalman filter the receiver. It works in two stages: the first - and second this prediction - correction. A reduced graphic image data processing algorithm of the measuring system. Checking the quality of the measurement system of mathematical data processing apparatus held on the results of experimental studies of the tractor John Deere 8345R in the composition of the seed unit and tractor XT3-17224 on the circle.

Keywords: *mobile machine, measuring system, a signal Butterworth filter and Kalman, acceleration, speed, angles.*

Представлено: А.Т.Лебедєв / Presented by: A.T.Lebedev

Рецензент: М.П. Артьомов / Reviewer: M.P.Artyomov

Подано до редакції / Received: 14.04.2015