

**Антощенко Роман Вікторович**,  
доктор технічних наук, професор, завідувач  
кафедри мехатроніки, безпеки  
життєдіяльності та управління якістю  
Державного біотехнологічного  
університету

**Антощенко Віктор Вікторович**,  
кандидат технічних наук, професор, доцент  
кафедри тракторів і автомобілів  
Державного біотехнологічного  
університету

**Фабричнікова Ірина Анатоліївна**,  
кандидат технічних наук, доцент кафедри  
мехатроніки, безпеки життєдіяльності та  
управління якістю Державного  
біотехнологічного університету

**Сміцков Дмитро Сергійович**,  
аспірант кафедри мехатроніки, безпеки  
життєдіяльності та управління якістю  
Державного біотехнологічного  
університету

**Кісь Олександр Вікторович**,  
аспірант кафедри мехатроніки, безпеки  
життєдіяльності та управління якістю  
Державного біотехнологічного  
університету

**Antoshchenkov Roman**,  
Doctor of Sciences, Professor, Head  
of the Department of Mechatronics, Life  
Safety and Quality Management, State  
Biotechnological University,  
<https://orcid.org/0000-0003-0769-7464>

**Antoshchenkov Victor**,  
Phd, Professor, Associate Professor of the  
Department of Tractors and Automobiles,  
State Biotechnological University,  
<https://orcid.org/0000-0002-1136-5430>

**Fabrychnikova Irina**,  
Phd, Associate Professor of the Department of  
Mechatronics, Life Safety and Quality  
Management, State University of Biotechnology,  
<https://orcid.org/0000-0002-7937-1810>

**Smitskov Dmitriy**,  
PhD student of the Department of Mechatronics,  
Life Safety and Quality Management, State  
Biotechnological University,  
<https://orcid.org/0000-0001-9125-9736>

**Kis Oleksandr**,  
PhD student of the Department of Mechatronics,  
Life Safety and Quality Management, State  
Biotechnological University,  
<https://orcid.org/0000-0002-0033-4495>

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ КОЛЕСА МОБІЛЬНОЇ МАШИНИ DETERMINATION OF THE DYNAMICS OF THE WHEEL OF A MOBILE MACHINE

Антощенко Р. В., Антощенко В. В.,  
Фабричнікова І. А., Сміцков Д. С., Кісь О. В.  
Визначення динаміки колеса мобільної  
машини. *Український журнал прикладної  
економіки та техніки*.  
2023. Том 8. № 4. С. 115 – 120.

Antoshchenkov R., Antoshchenkov V.,  
Fabrychnikova I., Smitskov D., Kis O.  
Determination of the dynamics of the wheel of  
a mobile machine. *Ukrainian Journal of Applied  
Economics and Technology*.  
2023. Volume 8. № 4, pp. 115 – 120.

Для визначення динаміки колеса мобільної машини розроблено датчик, який складається з трьохосьових акселерометра, гіроскопа та магнітометра. Датчик підключений до мікроконтролера, який передає отримані дані каналом 2,4 ГГц. Він кріпиться співвісно до центра колеса. На першому етапі оброблення даних, що надходять від акселерометра, гіроскопа і магнітометра проводиться коригування їхніх значень. Коригований сигнал прискорень і кутових швидкостей обробляється за допомогою фільтра Butterworth. За допомогою фільтра Madgwick визначають кути орієнтації датчика у просторі. Далі від прискорень забираємо відцентровий компонент. Потім віднімається з прискорень гравітаційна складова та отримуємо дійсне його значення. Швидкість руху колеса отримуємо інтегруванням прискорень. Кутові швидкості колеса, прискорення та швидкості обробляються фільтром Kalman. Матрицю коваріації шуму вимірювання та матрицю процесу оцінювання розраховано за похибками датчиків. Проведено експериментальні дослідження запропонованого методу та датчика для визначення динаміки колеса мобільних машин на тракторах з колісною формулою 4x4. Датчики встановлювалися на всі колеса трактора.

**Ключові слова:** датчик, динаміка, колесо, мобільна машина, фільтр.

A sensor, which consists of a three-axis accelerometer, a gyroscope, and a magnetometer, has been developed to determine the dynamics of the wheel of a mobile machine. The sensor is connected to a microcontroller, which transmits the received data via a 2.4 GHz channel. It is mounted coaxially to the center of the wheel. At the first processing stage, the accelerometer, gyroscope, and magnetometer data values are adjusted. The corrected accelerations and angular velocities signal are processed using a Butterworth filter. Filter Madgwick determines the angles of orientation of the sensor in space. In the next step, we remove the centrifugal component from the accelerations. Next, the gravitational component is subtracted from the accelerations, and its real value is obtained. The speed of the wheel is obtained by integrating accelerations. The Kalman filter

© Антощенко Роман Вікторович, Антощенко Віктор Вікторович, Фабричнікова Ірина Анатоліївна,  
Сміцков Дмитро Сергійович, Кісь Олександр Вікторович, 2023

---

*processes the angular velocities, acceleration, and velocities. The measurement noise covariance matrix and the evaluation process matrix are calculated based on sensor errors. The results of experimental studies of the proposed method and sensor for determining the wheel dynamics of mobile machines on tractors with a 4x4 wheel arrangement were carried out. The sensors were installed on all wheels of the tractor. The developed wheel dynamics sensor allows us to determine the slippage of the engines of a mobile machine. This method of determining slipping is entirely accurate and does not require intervention in the design of the machine. The determination of the speed of rotation of the wheels of a mobile machine is based on the determination of the angular speed of rotation, which is measured with a gyroscope and accelerometer located in the center of the wheel of a mobile machine.*

**Keywords:** sensor, dynamics, wheel, mobile car, filter.

---

## Вступ

Дослідження динаміки функціонування мобільних машин вимагає визначення параметрів її стану як загалом, так і окремих її елементів [1].

Під час проведення тягово-динамічних випробувань колісних мобільних машин необхідно визначити швидкість обертання провідних і ведених коліс [1, 2]. Для керованих коліс це необхідно знати, щоб оцінити стійкість і керованість мобільних машин. Одним з показників ефективності руху мобільних машин є буксування коліс. Буксування провідних коліс автомобіля знижує динаміку під час розгону. Найвищі тягові характеристики колісних тракторів досягаються за 10-15% буксування провідних коліс. Перелічені параметри необхідно визначити під час експериментальних досліджень і випробувань мобільних машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначення положення та швидкості обертання колеса пов'язане з певними технічними проблемами, які посилюються під час підвищення точності вимірювання.

Буксування коліс мобільних машин визначається через дійсну швидкість руху машини та швидкості обертання. Швидкість обертання коліс машини визначається двома способами:

- зовнішнім енкодером;
- датчиком швидкості обертання, заснованим на ефекті Холла.

Енкодер набув широкого розповсюдження в робототехніці для контролю швидкості руху та положення робота [2].

Зовнішній енкодер складно встановити, він вимагає зовнішнього плеча для фіксації корпусу датчика в нерухомому положенні щодо кузова машини. Датчик швидкості обертання колеса, заснований на ефекті Холла, вимагає втручання в конструкцію машини, тобто виготовлення технічних отворів, кріплень. Сучасні трактори та автомобілі мають встановлені датчики, необхідні для роботи системи ABS\ESP. Під час розрахунку буксування необхідно враховувати динамічний радіус коліс, який вважається постійним для всіх режимів руху машини.

Спосіб вимірювання буксування коліс, який вимагає системи машинного зору, досить вимогливий до продуктивності системи цифрового оброблення сигналів [3] і працює недостатньо добре в запиленних умовах.

У навігаційних системах, які пов'язані з автоматичною системою кермового управління, використовують сигнал з датчика положення керованих коліс для оцінювання траєкторії руху.

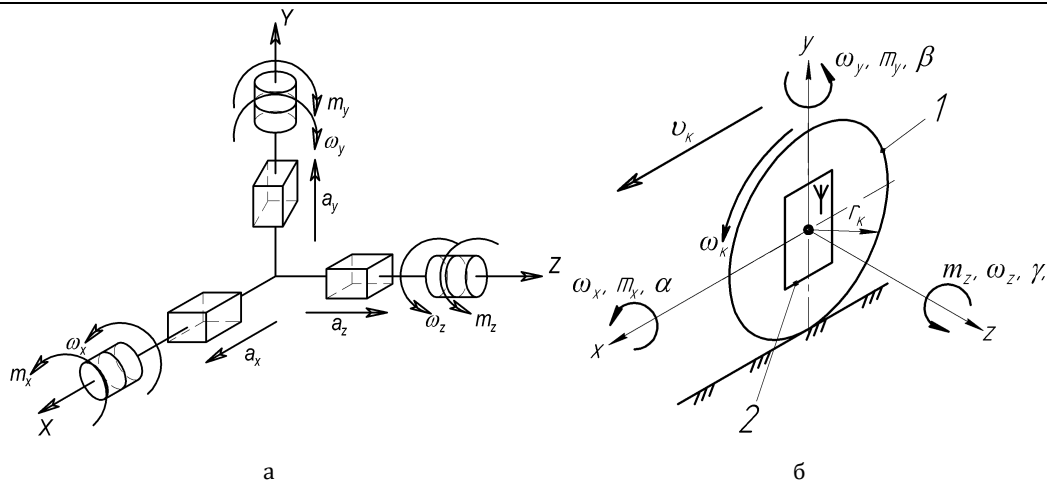
## Формулювання цілей статті

Мета статті: визначення динаміки колеса мобільної машини шляхом створення датчика динаміки.

## Виклад основного матеріалу дослідження

Для проведення експериментальних досліджень розроблено вимірювальну систему динаміки та енергетики мобільних машин [4, 5]. Вимірювальна система (ВС) належить до технічних засобів діагностування та експлуатаційного контролю і може бути використана в сільському господарстві та машинобудівній промисловості. ВС призначена для визначення кінематичних, динамічних, потужних та енергетичних характеристик мобільних машин і їхніх елементів під час дорожніх, польових і стендових випробувань. Кількість і типи датчиків, якими оснащується машина під час випробувань, залежать від її виду та параметрів, які необхідно визначити.

Розроблено датчик динаміки колеса мобільної машини, який складається з трьохосового акселерометра та магнетометра (LSM303DLHC), а також трьохосового гіроскопа (L3GD20) (рис. 1). Датчик є інерційно-вимірювальним пристроєм, який зібраний на базі STM32F3DISCOVERY. Мікроконтролер (STM32F303VCT6) передає дані каналом 2,4 ГГц через радіомодуль (nRF24L01). Датчик містить 3,7V Li-pol акумулятор. Датчик визначає швидкість обертання колеса мобільної машини (трактора чи автомобіля) чи провідної зірочки гусеничного трактора. Він дозволяє без втручання у конструкцію визначити дійсну швидкість обертання колеса, орієнтацію у просторі.



**Рис. 1. Схема вимірюваних параметрів датчиком динаміки колеса (а) та схема установки датчика на колесо (б): 1 - колесо; 2 - датчик;  $a_x, a_y, a_z$  - датчики прискорень (акселерометри) по осях  $x, y, z$ ;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  - датчики кутових швидкостей (гіроскопи) по осях  $x, y, z$ ;  $m_x, m_y, m_z$  - датчики напруженості магнітного поля (магнітометри) по осях  $x, y, z$**

Акселерометр, встановлений у датчику, вимірює прискорення  $a_x, a_y, a_z$  по трьох ортогональних осях (рис. 1, а). Аналогічно за трьома осями вимірюється кутова швидкість  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  і напруженість магнітного поля  $m_x, m_y, m_z$ . Датчик динаміки колеса встановлюється співвісно та по центру колеса мобільної машини. Схему установки датчика динаміки колеса наведено на рис. 1, б, а встановлений датчик на бортовий редуктор колісного трактора наведено на рис. 2.



**Рис. 2. Датчик динаміки колеса, встановлений на бортовий редуктор колісного трактора**

Мобільні машини такі, як трактори та автомобілі, працюють в умовах вібрацій і шумів, створюваних навколишнім середовищем та технологічним обладнанням. З аналітичної точки зору прискорення датчика ІМУ складається з чотирьох компонентів: дійсне прискорення (це прискорення, що діє уздовж відповідної осі мобільної машини); кут нахилу машини щодо горизонту; вібрації, створювані навколишнім середовищем під час руху машини чи стаціонарному становищі, створювані технологічною машиною; власний шум датчика.

Усунення сторонніх шумів і небажаних даних у сигналах датчика потребує математичного оброблення даних [6, 7].

Першим етапом оброблення даних, що надходять від акселерометра, гіроскопа та магнітометра, є коригування їхніх значень:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}_c &= \begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \\ 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_r \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{xr} \\ a_{yr} \\ a_{zr} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & b_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \boldsymbol{\omega}_c = \begin{bmatrix} \omega_{xc} \\ \omega_{yc} \\ \omega_{zc} \\ 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \omega_{xc} \\ \omega_{yc} \\ \omega_{zc} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_r \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \omega_{xr} \\ \omega_{yr} \\ \omega_{zr} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & c_1 \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & c_2 \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\
 \mathbf{m}_c &= \begin{bmatrix} m_{xc} \\ m_{yc} \\ m_{zc} \\ 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} m_{xc} \\ m_{yc} \\ m_{zc} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_r \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{xr} \\ m_{yr} \\ m_{zr} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & d_1 \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & d_2 \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

де  $\mathbf{a}_r = [a_{xr} \ a_{yr} \ a_{zr}]^T$  - вхідний сигнал акселерометра;  $\boldsymbol{\omega}_r = [\omega_{xr} \ \omega_{yr} \ \omega_{zr}]^T$  - вхідний сигнал гіроскопа;  $\mathbf{m}_r = [m_{xr} \ m_{yr} \ m_{zr}]^T$  - вхідний сигнал магнітометра;  $\mathbf{a}_c = [a_{xc} \ a_{yc} \ a_{zc}]^T$  - коригований сигнал акселерометра;  $\boldsymbol{\omega}_c = [\omega_{xc} \ \omega_{yc} \ \omega_{zc}]^T$  - коригований сигнал гіроскопа;  $\mathbf{A}, \mathbf{G}, \mathbf{M}$  - матриці коригування акселерометра, гіроскопа та магнітометра;  $a_{ij}, b_i, g_{ij}, c_i, m_{ij}, d_i$  - коефіцієнти матриць коригування.

На цьому етапі відбувається компенсація похибки встановлення акселерометра, гіроскопа та магнітометра в корпусі датчика. Коефіцієнти  $a_{ij}, b_i, g_{ij}, d_i, c_i, m_{ij}$  для відповідних матриць коригування отримуємо під час градування приладу на стенді [1].

Коригований сигнал прискорень  $\alpha_c$  і кутових швидкостей  $\omega_c$  обробляється за допомогою фільтра Butterworth 3-го порядку з частотою зрізу 3 Гц та частотою дискретизації (семплювання) 100 Гц:

$$\mathbf{a}_f = \text{filter\_butter}(\alpha_c); \boldsymbol{\omega} = \text{filter\_butter}(\omega_c), \quad (2)$$

де  $\mathbf{a}_f = [a_{xf} \ a_{yf} \ a_{zf}]^T$  – матриця-вектор фільтрованого сигналу акселерометра;  $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$  – матриця-вектор фільтрованого сигналу гіроскопа.

Обробляти дані магнітометра фільтром Butterworth немає потреби, оскільки фільтр Madgwick є фільтром низьких частот. Матриця-вектор  $\boldsymbol{\theta}$  містить кути орієнтації датчика динаміки колеса  $\alpha$ ,  $\gamma$  та  $\beta$  навколо осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , яка розрахована фільтром Madgwick [7]: (3).

Налаштування фільтра Madgwick для акселерометра та магнетометра (LSM303DLHC), а також трьохосового гіроскопа (L3GD20):  $\beta = 0.6$ ,  $f_s = 100$  Hz.

Віднімаємо від прискорень відцентрову силу: (4).

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = f_{\text{Madgwick}}(\mathbf{a}_f, \boldsymbol{\omega}, \mathbf{m}_c), \quad (3) \quad \mathbf{a}_b = \begin{bmatrix} a_{xb} \\ a_{yb} \\ a_{zb} \end{bmatrix} = \mathbf{a}_f - \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{v} = \begin{bmatrix} a_{xf} \\ a_{yf} \\ a_{zf} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де  $f_{\text{Madgwick}}$  – функція фільтра Madgwick;  $\mathbf{m} = [m_x \ m_y \ m_z]^T$  – дані датчика магнетометра.

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

Після віднімання відцентрової сили від прискорення необхідно відняти гравітаційну складову і таким чином отримаємо дійсне його значення: (5). Розраховуємо швидкість руху, яка необхідна для обліку відцентрових сил, через інтегрування прискорень: (6).

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \mathbf{a}_b + g \cdot \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \cdot \sin \alpha \\ \cos \beta \cdot \cos \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xb} \\ a_{yb} \\ a_{zb} \end{bmatrix} + g \cdot \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \cdot \sin \alpha \\ \cos \beta \cdot \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (5) \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^t a_x dt + v_x|_{t=0} \\ \int_0^t a_y dt + v_y|_{t=0} \\ \int_0^t a_z dt + v_z|_{t=0} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння.

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

Останнім етапом оброблення даних датчика динаміки колеса є оброблення даних прискорень, кутових швидкостей і кутів орієнтації фільтром Kalman. Цей фільтр не є обов'язковим для застосування, оскільки наведений вище алгоритм оброблення даних (1)-(6) є фільтром нижніх частот та інтегратором.

Метою фільтра Kalman є мінімізація дисперсії оцінки векторного випадкового процесу  $\mathbf{x}(k)$ , який змінюється у часі:

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

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

Для спостереження доступний лінійний процес,  $\mathbf{y}(k)$  на який накладений 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, який є випадковим вектором, що має нормальний розподіл за коваріаційною матрицею  $\mathbf{Q}_M(k)$ .

Фільтр Kalman виконується у два етапи: перший – це передбачення; другий – корекція. Алгоритм фільтра Kalman наведений у роботах [8-10].

Вектор стану  $\mathbf{x}$  датчика динаміки колеса, який містить датчики прискорення, гіроскоп і магнітометр, має вигляд:

$$\mathbf{x} = [\boldsymbol{\theta} \ \boldsymbol{\omega} \ \mathbf{a}]^T = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z \ a_x \ a_y \ a_z]^T \quad (9)$$

Матриця переходу  $\mathbf{A}$  розраховується з динамічної системи датчика, яка будується за класичними законами механіки руху тривимірної декартової системи координат.

За відсутності вектора управління  $\mathbf{u}$  рівняння оцінки вектора стану (7) має вигляд:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_k, \quad (10)$$

відповідно у розгорнутому вигляді:

Рівняння спостереження для цієї динамічної системи, за умови одночасного вимірювання всіх елементів вектора  $\mathbf{x}$  (10), матиме вигляд:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \cdot \mathbf{x}_k. \quad (11)$$

Враховуючи похибки вимірювання фізичних величин датчиками, розраховуємо матрицю шуму вимірювання  $\mathbf{R}$  і матрицю процесу оцінювання  $\mathbf{Q}$ . Значення матриць наведено у роботі [1]. Отримані матриці  $\mathbf{R}$  і  $\mathbf{Q}$  підставляють у фільтр Kalman (7)-(11).

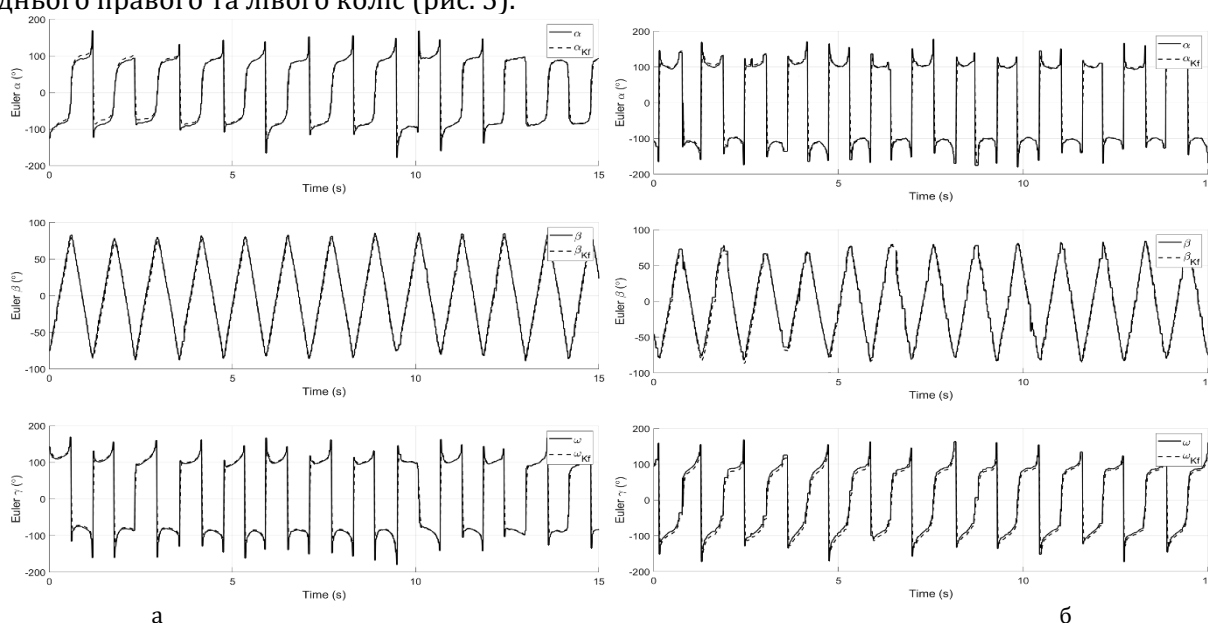
Дослідження динаміки трактора потребує визначення буксування його коліс. Метод визначення буксування коліс трактора, описаний у стандарті ISO 789-9:2018 та OECD Code 2, дозволяє отримати значення буксування після пробігу мірної ділянки. Цей метод дозволяє визначити буксування коліс мобільної машини у статиці. За допомогою розробленого датчика та вимірювальної системи можна визначити буксування коліс у динаміці, тобто миттєве його значення. Датчик динаміки колеса визначає кутову швидкість обертання колеса, яка перераховується в буксування з урахуванням швидкості руху машини:

$$\delta = \frac{\pi r_w \frac{\omega_z}{180} - v_{GPS}}{v_{GPS}} \cdot 100\%, \quad (12)$$

де  $\omega_z$  – кутова швидкість обертання колеса, яка визначається розробленим датчиком динаміки колеса,  $^\circ/\text{с}$ ;  $r_w$  – динамічний радіус колеса, що визначається за ISO 4251-1:2017, м;  $v_{GPS}$  – дійсна швидкість руху, визначається приймачем GPS, м/с.

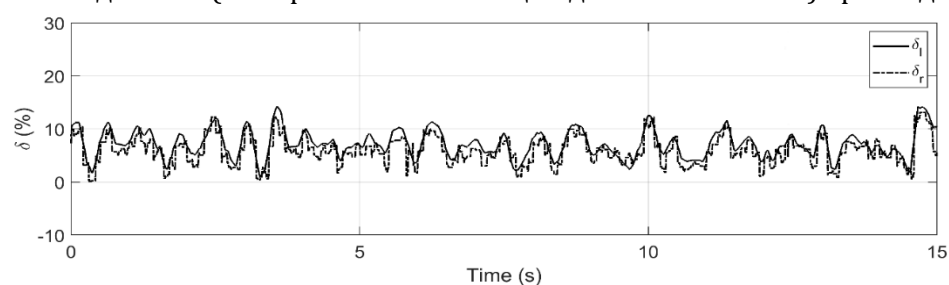
Визначення швидкості обертання коліс мобільної машини засноване на визначенні кутової швидкості обертання, яка вимірюється з гіроскопом та акселерометром, розташованими в центрі колеса мобільної машини. Кутова швидкість, що вимірюється гіроскопом, дорівнює кутовій швидкості обертання колеса. Під час обертання колеса сигнал акселерометра (по осі  $x$  або  $y$ ) змінюється за синусоїдальним законом, а його частота сигналу дорівнює швидкості обертання колеса.

За допомогою розробленої вимірювальної системи динаміки та енергетики мобільних машин проведено експериментальні дослідження трактора ХТЗ-243К.20. Трактор є повнопривідним з колісною формулою 4x4 та шарнірно-зчленованою рамою. Під час експериментальних досліджень на бортові редуктори трактора встановлювали датчики динаміки колеса. Справжню швидкість руху вимірювали приймачем GPS. Отримано дані прискорень, кутових швидкостей і напруженості магнітного поля, які оброблені запропонованим методом оброблення даних. За цими даними розраховані кути орієнтації коліс мобільної машини. Розраховано кути орієнтації заднього правого та лівого коліс (рис. 5).



**Рис. 5. Кути орієнтації заднього правого (а) та заднього лівого (б) коліс трактора**

Кут орієнтації  $\beta$  має вигляд пилкоподібного гармонійного сигналу, частота якого пропорційна до швидкості обертання колеса. Амплітуда сигналу дорівнює  $90^\circ$ . Похибка установки датчика (не паралельність площин датчика та колеса) призводить до отримання сигналів



**Рис. 6. Буксування ведучих коліс трактора**

кутів орієнтації  $\alpha$  та  $\gamma$  гармонійної форми (рис. 5). Визначено буксування ведучих коліс трактора (рис. 6).

Середнє значення буксування ведучих коліс трактора перебуває на рівні  $\delta = 5\%$ , тобто є досить низьким для

цього трактора. Розроблений датчик динаміки колеса придатний для промислового виготовлення та застосування під час випробування мобільних машин, таких як трактори та автомобілі.

### Висновки та перспективи подальших розвідок

Для відстеження в режимі реального часу тягово-динамічних та енергетичних характеристик мобільних машин, зокрема автомобілів і сільськогосподарських агрегатів, розроблено та виготовлено вимірювальну систему динаміки та енергетики мобільних машин.

Розроблено алгоритм оброблення даних ВС, що виключає вплив показників місця розташування датчиків, прискорення вільного падіння, нерівностей опорної поверхні та її нахилу. Для боротьби з випадковими помилками, які виникають під час досліджень, використано фільтри Madgwick та Kalman.

Розроблений датчик динаміки колеса дозволяє визначити буксування рушіїв мобільної машини. Такий спосіб визначення буксування є досить точним і не вимагає втручання в конструкцію машини. Визначення швидкості обертання коліс мобільної машини засноване на визначенні кутової швидкості обертання, яка вимірюється з гіроскопом та акселерометром, розташованими в центрі колеса мобільної машини. Кутова швидкість, що вимірюється гіроскопом, дорівнює кутовій швидкості обертання колеса. Встановлено, що під час обертання колеса сигнал акселерометра (по осі  $x$  або  $y$ ) змінюється за синусоїдальним законом, а його частота сигналу дорівнює швидкості обертання колеса.

### Література

1. Антощенко Р.В. Динаміка та енергетика руху багатоеlementних машинно-тракторних агрегатів: монографія. Харків: ХНТУСГ, «Міськдрук», 2017. 244 с.
2. Más F.R., Zhang Q., Hansen A.C. *Mechatronics and Intelligent Systems for Off-road Vehicles*. Springer-Verlag London: London, 2011. 277 p.
3. Song X., Seneviratne L., Althoefer K. A Vision Based Wheel Slip Estimation Technique for Mining Vehicles. *IFACMMM. Chile*. 2009. P. 179-184.
4. Artiomov N., Antoshchenkov R., Antoshchenkov V., Ayubov A. Innovative approach to agricultural machinery testing. *Engineering for Rural Development*. 2021. № 20. P. 692-698.
5. Antoshchenkov R., Antoshchenkova V., Kis V., Smitskov D. Increasing accuracy of measuring functioning parameters of agricultural units. *Engineering for Rural Development*. 2023. № 22. P. 210-215.
6. Dorobantu R., Zebhauser B. Field evaluation of a low-cost strapdown IMU by means GPS. *Ortung und Navigation*. DGON: Bonn. 1999. P. 51-65.
7. Madgwick O.H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays, 2010. 56 p.
8. Debain C.A., Chateau T., Berducat M., Martinet P., Bonton P. Guidance-assistance system for agricultural vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2000. № 25. P. 29-51.
9. Maklouf O., Ghila A., Abdulla A., Yousef A. Low Cost IMU\GPS Integration Using Kalman Filtering for Land Vehicle Navigation Application. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*. 2013. № 7 (2). P. 184-190.
10. Serrano J.M., Peça J.O., Shahidian S., Nunes M.C., Ribeiro L., Santos F. Development of a Data Acquisition System to optimizing the Agricultural Tractor Performance. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2011. P. 756-766.

### References

1. Antoschenkov, R.V. (2017). *Dynamika ta enerhetyka rukhu bahatoelementnykh mashynno-traktornykh ahrehativ*. [Dynamics and energetics of movement of multi-element machine-tractor units]. KhNTUSH, «Mis'kdruk». Kharkiv. Ukraine.
2. Más, F.R., Zhang, Q., Hansen, A.C. (2011). *Mechatronics and Intelligent Systems for Off-road Vehicles*. Springer-Verlag London. London. Great Britain.
3. Song, X., Seneviratne, L., Althoefer, K. (2009). «A Vision Based Wheel Slip Estimation Technique for Mining Vehicles». *IFACMMM. Chile*. pp. 179-184.
4. Artiomov, N., Antoshchenkov, R., Antoshchenkov, V., Ayubov, A. (2021). «Innovative approach to agricultural machinery testing». *Engineering for Rural Development*. № 20. pp. 692-698.
5. Antoshchenkov, R., Antoshchenkova, V., Kis, V., Smitskov, D. (2023). «Increasing accuracy of measuring functioning parameters of agricultural units». *Engineering for Rural Development*. № 22. pp. 210-215.
6. Dorobantu, R., Zebhauser, B. (1999). Field evaluation of a low-cost strapdown IMU by means GPS. *Ortung und Navigation*. DGON. Bonn. Germany.
7. Madgwick, O.H. (2010). An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays.
8. Debain, C.A., Chateau, T., Berducat, M., Martinet, P., Bonton, P. (2000). «Guidance-assistance system for agricultural vehicles». *Computers and Electronics in Agriculture*. № 25. pp. 29-51.
9. Maklouf, O., Ghila, A., Abdulla, A., Yousef, A. (2013). «Low Cost IMU\GPS Integration Using Kalman Filtering for Land Vehicle Navigation Application». *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*. № 7 (2). pp. 184-190.
10. Serrano, J.M., Peça, J.O., Shahidian, S., Nunes, M.C., Ribeiro, L., Santos, F. (2011). «Development of a Data Acquisition System to optimizing the Agricultural Tractor Performance». *Journal of Agricultural Science and Technology*. pp. 756-766.

Стаття надійшла до редакції 11.09.2023 р.