

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ АГРЕГАТІВ

Сміцков Д. С., Череватенко Г. І, Антощенко Р. В., д.т.н., проф.

Державний біотехнологічний університет

В роботі наведено методи підвищення точності вимірювання параметрів функціонування сільськогосподарських агрегатів.

Сільськогосподарські агрегати, що являють собою зчипку енергетичного засобу (трактора) та сільськогосподарської машини, працюють в умовах вібрацій і шумів, що створюються навколишнім середовищем та самими знаряддями. Особливості функціонування цих систем та відповідність їх своєму функціональному призначенню – це фактори від яких залежать ступінь досконалості СГА. Подальше розширення технологічних можливостей і сфери їх застосування вимагають поглибленого вивчення процесу функціонування [1].

Дослідження динаміки функціонування СГА потребує нових методів та засобів дослідження, тому була створена вимірювальна системи динаміки та енергетики мобільних машин [2, 3].

В теперішній час поширюються кількість досліджень динаміки елементів СГА з використанням датчиків прискорень [4–6]. В цих та інших роботах не достатньо приділено уваги обробки даних отриманих з датчиків при випробуваннях. В роботах [7, 8] обґрунтовані похибки вимірювання, що вносять датчики. Таким чином залишається актуальним завдання підвищення точності вимірювання параметрів функціонування СГА.

Основним компонентом вимірювальної системи (ВС) є інерційний вимірювальний пристрій (ІВП), що складається з акселерометра, гіроскопа та магнітометра.

Розглянемо сигнал, що вимірює датчик прискорення (акселерометр). З аналітичної точки зору він складається з чотирьох компонентів:

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

Підчас експериментальних досліджень ІВП може розташовуватись у довільному місці СГА відносно центру мас.

Першим етапом обробки даних, що надходять від гіроскопа та акселерометра, має бути корегування їх значень

$$\mathbf{a}_c = \begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \\ a_{zc} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_r \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{xr} \\ a_{yr} \\ a_{zr} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & b_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\omega}_c = \begin{bmatrix} \omega_{xc} \\ \omega_{yc} \\ \omega_{zc} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \omega_{xc} \\ \omega_{yc} \\ \omega_{zc} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_r \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \omega_{xr} \\ \omega_{yr} \\ \omega_{zr} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & c_1 \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & c_2 \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

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; $\mathbf{a}_c = [a_{xc} \ a_{yc} \ a_{zc}]^T$ – корегований сигнал акселерометра; $\boldsymbol{\omega}_c = [\omega_{xc} \ \omega_{yc} \ \omega_{zc}]^T$ – корегований сигнал гіроскопа; \mathbf{G} – матриця корегування гіроскопа; a_{ij}, b_i, g_{ij}, c_i – коефіцієнти матриць корегування.

Коефіцієнти матриць корегування визначаються підчас тарування ІВП за методом, що наведений у роботі [1]. ІВП розташовують чотири рази, коли сила тяжіння Землі відносно корпусу пристрою буде відомою, паралельною одній осі та перпендикулярною двом іншим. Визначивши значення дійсного тяжіння розраховуються коефіцієнти матриць корегування.

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

$$\mathbf{a}_f = filter(\mathbf{a}_c), \boldsymbol{\omega} = filter(\boldsymbol{\omega}_c), \quad (2)$$

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.

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

Матрицю-вектор $\boldsymbol{\theta}$ кутів повороту датчика α, β, γ навколо осей x, y, z можна знайти, вирішивши таку систему диференціальних рівнянь:

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

У випадку коли ІВП встановлений не в центрі мас мобільної машини або її елемента, необхідно відняти від прискорення відцентрову силу:

$$\mathbf{a}_b = \begin{bmatrix} a_{xb} \\ a_{yb} \\ a_{zb} \end{bmatrix} = \mathbf{a}_f - \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{v} = \begin{bmatrix} a_{xf} \\ a_{yf} \\ a_{zf} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $\mathbf{v} = [v_x \ v_y \ v_z]^T$ – швидкість руху мобільної машини повздовж

відповідних осей x , y та z .

Після віднімання відцентрової сили від прискорення необхідно відняти гравітаційну складову і таким чином отримуємо 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 елемента СГА отримуємо інтегруванням прискорення:

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

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

Ефективність розробленого методу оцінюється по спектральній щільності, що визначається з формули [9]:

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-2j\pi f\tau} d\tau, \quad (7)$$

де $x(t)$ – випадковий стаціонарний процес;

$R_{xx}(\tau)$ – кореляційна функція випадкового процесу.

Таким чином, отримано дійсні кутові швидкості мобільної машини (2), прискорення (5) і швидкості (6). Розробленим методом обробки даних ІВП компенсується кут нахилу елемента СГА на етапі (5), вібрації та шуми видаляються фільтром Баттерворта (2).

Основний спектр коливань знаходиться в межах від 0 до 3 Гц (Рис. 1). Максимальна енергія коливань відповідає частоті 0,4 Гц. Друга гармоніка коливань знаходиться на частоті 25 Гц для трьох осей акселерометру. Для виділення дійсного прискорення використано фільтр нижніх частот Баттерворта з частотою зрізу 3 Гц.

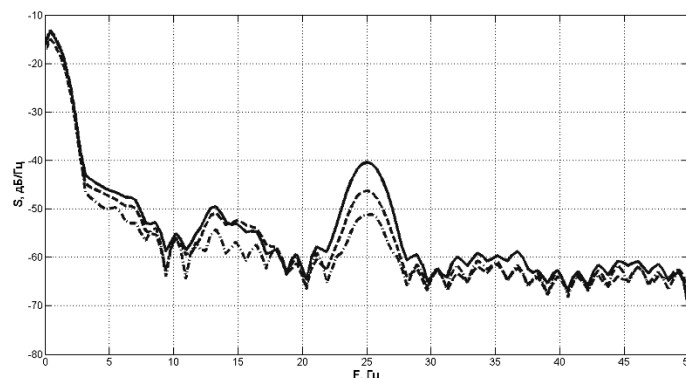


Рис. 1. Спектральна щільність прискорень рами трактора по осях x , y та z

Для обробки даних приймача GPS та даних датчика тягового зусилля аналогічно використовуємо фільтр Баттерворта з частотою зрізу 3 Гц.

Розроблено метод обробки даних вимірювальною системою, що виключає вплив показників місця розташування датчиків, прискорення вільного падіння,

нерівностей полів та нахилу. Встановлено, що сигнали з ІВП з аналітичної точки зору складаються з чотирьох компонентів: дійсного прискорення; куту нахилу елемента; вібрації, що створює навколишнє середовище та власного шуму датчика.

Визначено, що основний спектр коливань елементів СГА знаходиться в межах від 0 до 3 Гц. Максимальна енергія коливань відповідає частоті 0,4 Гц. Друга гармоніка коливань знаходиться на частоті 25 Гц для трьох осей акселерометру. Для виділення дійсного прискорення використано фільтр нижніх частот Баттерворта з частотою зрізу 3 Гц. Для обробки даних приймача GPS та даних датчика тягового зусилля також використовується фільтр Баттерворта.

Список літератури:

1. Антощенко Р. В. Динаміка та енергетика руху багатоелементних машинно-тракторних агрегатів: монографія. Х.: ХНТУСГ, 2017. 244 с.
2. Антощенко Р. В. Обробка даних мобільного вимірювального комплексу для контролю за функціонуванням мобільних енергетичних засобів. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця, 2013. №2(70). С. 6–9.
3. Volodymyr Bulgakov, Roman Antoshchenkov, Valerii Adamchuk, Ivan Halych, Yevhen Ihnatiev, Ivan Beloev, Semjons Ivanovs. Investigation of the tractor performance when ballasting its rear half-frame. *INMATEH –Agricultural Engineering*, 2022. Vol. 68. No. 3. PP. 533–542.
4. Antoshchenkov, R., Bogdanovich, S., Halych, I., Cherevatenko, H. Determination of dynamic and traction-energy indicators of all-wheel-drive traction-transport machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023. 1 (7 (121)), 40–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.270988>.
5. Artiymov, N., Antoshchenkov, R., Antoshchenkov, V., Ayubov, A. Innovative approach to agricultural machinery testing. *Engineering for Rural Development*, 2021, 20. 692–698.
6. R. Antoshchenkov, V. Antoshchenkova, V. Kis, D. Smitskov. Increasing accuracy of measuring functioning parameters of agricultural units. *Engineering for Rural Development*, 2023, 22. P. 210–215.
7. Antoshchenkov, R., Halych, I., Nikiforov, A., Cherevatenko, H., Chyzhykov, I., Sushko, S., Ponomarenko, N., Diundi, S., Tsebriuk, I. Determining the influence of geometric parameters of the traction-transportation vehicle's frame on its tractive capacity and energy indicators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. 2 (7-116), pp. 60-61. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.254688.
8. Антощенко Р. В., Никифоров А. О., Череватенко Г. І., Антощенко В. М. Мікропроцесорна вимірювальна система динаміки та енергетики мобільних машин. *Український журнал прикладної економіки та техніки*, 2021. Том 6. № 4. С. 241–248.
9. Galych I., Antoshchenkov R., Antoshchenkov V., Lukjanov I., Diundik S., Kis O. Estimating the dynamics of a machine-tractor assembly considering the effect of the supporting surface profile. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7 (109)), 51–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225117>