



Механізація, електрифікація

УДК 631.37

© 2022

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАВНОСТІ ХОДУ БАГАТООСНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

В.В. Адамчук¹, В.М. Булгаков², В.П. Кувачов³

^{1,2}доктори технічних наук, професори, академіки НААН

³доктор технічних наук

*¹Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН
вул. Вокзальна, 11, смт Глеваха Фастівського р-ну Київської обл., 08631, Україна*

*²Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна*

*³Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
просп. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь Запорізької обл., 72312, Україна
e-mail: ¹vadamchuk@gmail.com, ²vbulgakov@meta.ua, ³kuvachoff@ukr.net;
ORCID: ¹0000-0003-0358-7946, ²0000-0003-3445-3721, ³0000-0002-5762-256X*

Надійшла 1.12.2021

Мета. Підвищення плавності ходу модульного енергетичного засобу шляхом створення пружно-дисипативного зв'язку енергетичного модуля з технологічним. **Методи.** Математична формалізація досліджуваного процесу базувалася на положеннях теоретичної механіки, теорії трактора, статистичної динаміки, частотних методах теорії автоматичного регулювання лінійних динамічних систем за відпрацювання ними статистично випадкових збудувальних впливів. Експериментальні дослідження базувалися як на загальноприйнятих стандартних, так і на розроблених оригінальних методиках із застосуванням тензометричного, вібрографічного обладнання із записом сигналів, що реєструються на ПК за допомогою аналогово-цифрового перетворювача. Обробку результатів експериментів проводили на ПК з використанням теорії ймовірностей та кореляційно-спектрального аналізу. **Результати.** За результатами проведеного дослідження отримано адекватну динамічну модель модульного енергетичного засобу в складі орного агрегату, як багатовісної динамічної системи, що дає змогу досліджувати її рух у поздовжньо-вертикальній площині. Отримано значення амплітудних характеристик вертикальних переміщень заднього моста енергетичного модуля під час відтворення ним коливань профілю шляху і тягового опору плуга за різних величин коефіцієнта опору дисипативного зв'язку двох модулів модульного енергетичного засобу. На основі цих експериментальних досліджень отримано залежності нормованих кореляційних функцій та спектральних щільностей прискорень вертикальних коливань заднього моста енергетичного модуля за різних величин коефіцієнта опору дисипативного

зв'язку двох модулів. Їх аналіз дав змогу обґрунтувати величину раціональної жорсткості пружно-дисипативного зв'язку енергетичного і технологічного модулів модульного енергетичного засобу універсально-просапного призначення. **Висновки.** Проведеними дослідженнями встановлено, що зі збільшенням коефіцієнта опору дисипативного зв'язку двох модулів до $1,80 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$, амплітуди коливань заднього моста енергетичного модуля зменшуються в 10 разів, а резонансні піки частотних характеристик зміщуються в область низьких частот із $16,5 \text{ с}^{-1}$ до $6,0 \text{ с}^{-1}$ з одночасним зменшенням їх максимальних значень у 4 рази. Піки амплітудно-частотних характеристик за відтворення модульним енергетичним засобом коливань тягового опору плуга зміщуються з 13 до 10 с^{-1} з одночасним зменшенням їх максимальних значень у 3 рази. Доведено, що раціональна жорсткість пружно-дисипативного зв'язку двох модулів припадає на значення коефіцієнта опору $1,65 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$. При цьому дисперсії прискорень вертикальних коливань модульного енергетичного засобу зменшуються в 3 рази. Установлено, що коливання тягового опору сільськогосподарських знарядь у 10 разів менше впливають на плавність ходу модульного енергетичного засобу у складі орного агрегату, ніж коливання поздовжнього профілю колії.

Ключові слова: енергетичний засіб, технологічний модуль, вертикальні коливання, пружно-дисипативний зв'язок, теоретичні та експериментальні дослідження.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202201-06>

Альтернативний напрям розвитку тракторобудування способом компонування енергонасиченого енергетичного засобу за модульним принципом із використанням технологічних модулів [1, 2] ще недостатньо вивчений. Однак створений у такий спосіб багатівісний модульний енергетичний засіб дає можливість реалізувати закладений резерв потужності двигуна його енергетичного модуля [3, 4].

Проведені випробування модульних енергетичних засобів показали [5, 6], що однією з переваг використання технологічного модуля є можливість демпфування вертикальних коливань, викликаних нерівностями агрофону і силою тягового опору сільськогосподарського знаряддя.

Пружнодемпфувальні властивості технологічного модуля можуть істотно поліпшити плавність ходу модульного енергетичного засобу і знизити динамічне навантаження на трансмісію та двигун його енергетичного модуля, тому їх дослідження представляє певний інтерес [7]. Підвищення ефективності використання модульних енергетичних засобів способом підвищення їхньої

плавності ходу є важливою науковою проблемою, що має велике практичне значення.

Для покращення зчеплення з опорною поверхнею та зниження ступеня її ущільнення відомі спроби створення багатівісних тракторів. 3-вісні варіанти машинно-тракторних агрегатів було створено на базі вузлів та агрегатів Т-150К і К-701 [8].

Фінська фірма Valmet розробила трактор із колісною формулою 6К4 [9]. Німецька компанія Fendt свого часу [10] продемонструвала нову концептуальну розробку 3-мостового трактора Trisix Vario. Американською фірмою Versatile було випущено трактор Big Roy [11]. Німецькою фірмою Deutz-Fahr було представлено 8-колісний трактор Agro XXL [12].

Модульний принцип побудови енергетичних засобів типу МЕЗ-150, МЕЗ-200 і МЕЗ-300 є ефективнішим [1–6] (рис. 1). Компонувальна схема модульних енергетичних засобів (рис. 1) являє собою зчленування трактора (енергетичного модуля) із технологічним модулем за допомогою 3-точкової задньої навісної системи останнього [13].



Рис. 1. Модульні енергетичні засоби: а — МЕЗ-150 і МЕЗ-200; б — МЕЗ-300

Основне призначення технологічного модуля — створення додаткової сили тяги за рахунок використання надлишкової потужності двигуна енергонасиченого трактора. Принциповою відмінністю модульних енергетичних засобів від традиційних тракторів є їх висока універсальність, пов'язана зі змінним тяговим класом, що дає змогу скоротити номенклатуру тракторів там, де вона надто розгалужена. Або вирішити проблему, спричинену відсутністю енергетичних засобів певного тягового класу. Правильний підбір ваги технологічних модулів дає можливість забезпечити перехід модульного енергетичного засобу до суміжного тягового класу [1–5].

Дослідження пружнодемпфувальних властивостей технологічного модуля має певний науковий інтерес, оскільки дає змогу істотно покращити плавність ходу модульного енергетичного засобу та зменшити динамічне навантаження на трансмісію і двигун енергетичного модуля, а також підвищити віброзахисність водія-оператора [3–5].

Мета досліджень. Підвищення плавності ходу модульного енергетичного засобу шляхом створення пружнодемпфувального зв'язку енергетичного модуля із технологічним.

Методи досліджень. Синтез параметрів зв'язку модулів модульного енергетичного засобу здійснювали способом моделювання на ПК умов його функціонування. Математична формалізація досліджуваного процесу базувалася на положеннях теоретичної механіки, теорії трактора, статистичної динаміки, частотних методах теорії автоматичного регулювання лінійних динамічних систем за відпрацювання ними

статистично випадкових збурювальних впливів.

Експериментальні дослідження базувалися як на загальноприйнятих стандартних, так і на розроблених оригінальних методиках із застосуванням тензометричного, вібрографічного обладнання із записом сигналів, що реєструються на ПК за допомогою аналогово-цифрового перетворювача. Обробку результатів експериментів проводили на ПК із використанням теорії ймовірностей та кореляційно-спектрального аналізу. Об'єктом експериментальних досліджень був орний агрегат у складі модульного енергетичного засобу універсально-просапного призначення, що складався з енергетичного та технологічного модулів та тензометричного плуга ПЛН-5-35 (рис. 1, а).

Лабораторно-польові експериментальні дослідження модульного енергетичного засобу у складі орного агрегату проводили на оранці стерні соняшнику. Середнє значення вологості ґрунту в шарі 0–15 см становило 23,7%, а щільності — $1,43 \text{ г·см}^{-3}$.

Результати досліджень. Для проведення теоретичних досліджень плавності ходу модульного енергетичного засобу у складі орного агрегату, що рухається по нерівностях агрофону, представимо його у вигляді еквівалентної схеми (рис. 2), на якій відобразимо сили, що діють на нього. Механічний зв'язок енергетичного та технологічного модулів доповнимо пружно-дисипативними елементами. На рис. 2 цей зв'язок представлено еквівалентною динамічною моделлю Герца, на якій пружні елементи представлено пружиною з жорсткістю C_n , а дисипативні — поршнем із коефіцієнтом опору K_n .

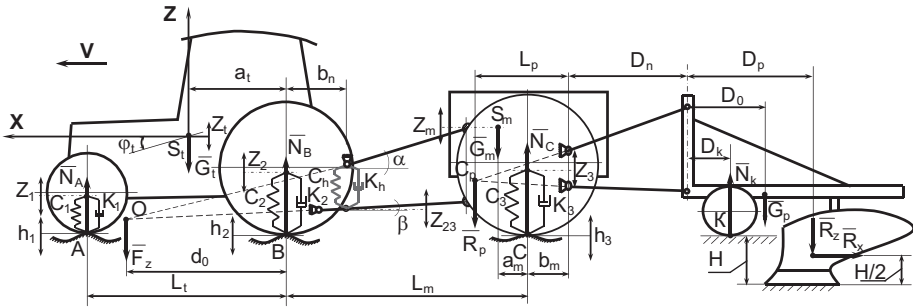


Рис. 2. Розрахункова схема руху модульного енергетичного засобу у складі орного агрегату в поздовжньо-вертикальній площині

Під час робочого руху орного агрегату на його енергетичний і технологічний модулі, а також плуг, передаються поштовхи й удари, зумовлені нерівностями профілю поля та нерівномірністю тягового опору сільськогосподарського знаряддя. У загальному випадку модулі енергетичного засобу здійснюють при цьому вертикальні поступальні взаємопов'язані переміщення. Енергетичний модуль має два ступені вільності: вертикальне переміщення Z_t центру його мас, зосередженого у точці S_t , і кутові коливання його остова φ_t . Технологічний модуль має лише один ступінь вільності — вертикальне переміщення $Z_m = Z_3$ його центру мас, зосередженого в точці S_m . Тому за узагальнені координати прийнято вертикальні переміщення: Z_1 , Z_2 і Z_3 мостів модульного енергетичного засобу.

Для розроблення математичної моделі руху модульного енергетичного засобу у складі орного агрегату у вертикальній площині використовували рівняння Лагранжа другого роду:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_t}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T_t}{\partial q_i} + \frac{\partial E_t}{\partial q_i} + \frac{\partial F_t}{\partial \dot{q}_i} = Q_i, \quad (1)$$

де q_i , Q_i — відповідно i -ті узагальнені координати і сила; T_t , E_t — відповідно кінетична та потенційна енергії енергетичного засобу; F_t — дисипативна функція.

Прийняті під час складання рівняння (1) положення та припущення такі: рух орного агрегату приймається рівномірним і прямолінійним, а профіль опорної поверхні під колесами правого та лівого бортів модульного енергетичного засобу однаковим; колеса енергетичного і технологічного модулів

під час переміщення по полю зберігають постійний контакт із поверхнею агрофону, яка є випадковою стаціонарною ергодичною функцією шляху; коливання тягового опору плуга неістотно впливають на швидкість поступального переміщення агрегату, завдяки цьому вона приймається постійною; кутовими коливаннями плуга можна знехтувати; при малих кутах φ_t переміщення остова енергетичного модуля справедливі рівності: $\tan \varphi_t \approx \varphi_t$, а $\cos \varphi_t \approx 1$.

Після знаходження кінетичної T_t та потенційної E_t енергій, а також відповідних дисипативних F_t та узагальнених Q_i сил одержано математичну модель вертикального руху модульного енергетичного засобу у складі орного агрегату у вигляді такої системи диференціальних рівнянь (2):

$$\left. \begin{aligned} A_{11} \cdot \ddot{Z}_1 + A_{12} \cdot \dot{Z}_1 + A_{13} \cdot Z_1 + A_{14} \cdot \ddot{Z}_2 &= \\ = f_{11} \cdot \dot{h}_1 + f_{12} \cdot h_1 + f_{13} \cdot R_x + f_{14}, \\ A_{21} \cdot \ddot{Z}_2 + A_{22} \cdot \dot{Z}_2 + A_{23} \cdot Z_2 + A_{24} \cdot \ddot{Z}_1 &= \\ = f_{21} \cdot \dot{h}_2 + f_{22} \cdot h_2 + f_{23} \cdot R_x + f_{24}, \\ A_{31} \cdot \ddot{Z}_3 + A_{32} \cdot \dot{Z}_3 + A_{33} \cdot Z_3 &= \\ = f_{31} \cdot \dot{h}_3 + f_{32} \cdot h_3 + f_{33} \cdot R_x + f_{34}, \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\text{де } A_{11} = \frac{M_t \cdot a_t^2 + J_t}{L_t^2}; \quad A_{12} = K_1; \quad A_{13} = C_1;$$

$$A_{14} = \frac{2[M_t \cdot a_t \cdot (L_t - a_t) - J_t]}{L_t^2};$$

$$A_{21} = \frac{M_t \cdot (L_t - a_t)^2 - J_t}{L_t^2}; \quad A_{22} = K_2;$$

$$A_{23} = C_2; \quad A_{24} = \frac{2[M_t \cdot a_t \cdot (L_t - a_t) - J_t]}{L_t^2};$$

$$A_{31} = M_m; \quad A_{32} = K_3; \quad A_{33} = C_3; \quad f_{11} = K_1; \quad f_{12} = C_1;$$

$$f_{13} = \frac{d_0 \cdot (L_p - b_m) \cdot [0,5H - 0,2(D_p - D_k)]}{L_t \cdot (L_p + D_n + D_k) \cdot (L_m + d_0)};$$

$$f_{14} = \frac{d_0}{L_t \cdot (L_m + d_0)} \cdot \left[G_m \cdot (a_m - f_m \cdot r_{km}) \right.$$

$$\left. - \frac{G_p \cdot (L_p - b_m) \cdot (D_0 - D_k)}{(L_p + D_n + D_k)} \right];$$

$$f_{21} = K_2; \quad f_{22} = C_2;$$

$$f_{23} = \frac{(1 - d_0 \cdot L_t^{-1}) \cdot (L_p - b_m)}{(L_p + D_n + D_k) \cdot (L_m + d_0)} \times$$

$$\times [0,5H - 0,2(D_p - D_k)]$$

$$f_{24} = \frac{(1 - d_0 \cdot L_t^{-1})}{(L_m + d_0)} \left[G_m \cdot (a_m - f_m \cdot r_{km}) - \right.$$

$$\left. - \frac{G_p \cdot (L_p - b_m) \cdot (D_0 - D_k)}{(L_p + D_n + D_k)} \right]; \quad f_{31} = K_3; \quad f_{32} = C_3;$$

$$f_{33} = \frac{[0,5H - 0,2(D_p - D_k)]}{(L_p + D_n + D_k)} \cdot \left[1 - \frac{L_p - b_m}{L_m + d_0} \right];$$

$$f_{34} = \frac{G_p \cdot (D_0 - D_k)}{(L_p + D_n + D_k)} \cdot \left[\frac{L_p - b_m}{L_m + d_0} - 1 \right] -$$

$$- \frac{G_m \cdot (a_m - f_m \cdot r_{km})}{(L_m + d_0)}.$$

У системі рівнянь (2) позначено такі параметри: M_t, J_t — маса і момент інерції в поздовжньо-вертикальній площині енергетичного модуля; M_m, G_m — маса та сила тяжіння технологічного модуля; G_p — сила тяжіння плуга; f_m, r_{km} — коефіцієнт опору і радіус кочення коліс технологічного модуля; R_x — горизонтальна складова тягового опору плуга; K_1, K_2, K_3 та C_1, C_2, C_3 — відповідно наведені коефіцієнти опору дисипативних і пружних елементів демпфування коливань модульного енергетичного засобу.

Природу інших конструктивних параметрів ілюструє рис. 2.

Рішення системи рівнянь (2) в операторній формі дало змогу отримати передавальні функції, а потім частотні характеристики переміщень $A_{z_2/h_2}(\omega)$, а також прискорень $A_{\ddot{z}_2/h_2}(\omega)$ за $s=i \cdot \omega$ (де i — уявна одиниця, а ω — частота збурювального впливу).

Під час проведення досліджень змінним чинником виступав дисипативний коефіцієнт опору зв'язку двох модулів. На практиці зміна цієї величини досягалася дроселюванням прохідного перетину гідромагістралі основного гідроциліндра гідросистеми заднього навісного механізму енергетичного модуля.

Аналіз амплітудно-частотних характеристик вертикальних переміщень заднього моста енергетичного модуля під час відтворення ним коливань профілю шляху показав (рис. 3), що основний спектр вертикальних коливань сконцентровано в діапазоні частот $\omega = 0 - 16 \text{ с}^{-1}$. З погляду бажаності відпрацювання динамічною системою нерівностей профілю агрофону — збільшення жорсткості в'язкопружного зв'язку двох модулів у орному агрегаті є ефективним, оскільки наближає амплітудно-частотні характеристики до нуля.

Зі збільшенням величини коефіцієнта опору K_n дисипативного зв'язку двох модулів від 0 до $1,80 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-1}$ амплітуди коливань заднього моста енергетичного модуля зменшуються майже в 10 разів, а резонансні піки частотних характеристик зміщуються в область низьких частот з $16,5 \text{ с}^{-1}$ до $6,0 \text{ с}^{-1}$, з одночасним зменшенням їх максимальних значень майже у 4 рази (рис. 3). Цей факт є позитивним у підвищенні плавності ходу модульного енергетичного засобу, оскільки така слідуюча динамічна система прагне копіювання нерівностей агрофону без підсилення.

Аналіз амплітудно-частотних характеристик вертикальних коливань заднього моста енергетичного модуля під час відпрацювання ним збурювання від нерівномірності тягового опору плуга показав (рис. 4), що коливання цього збурення здійснюють значно менший вплив на плавність ходу енергетичного засобу, ніж коливання поздовжнього профілю. Максимальне значення

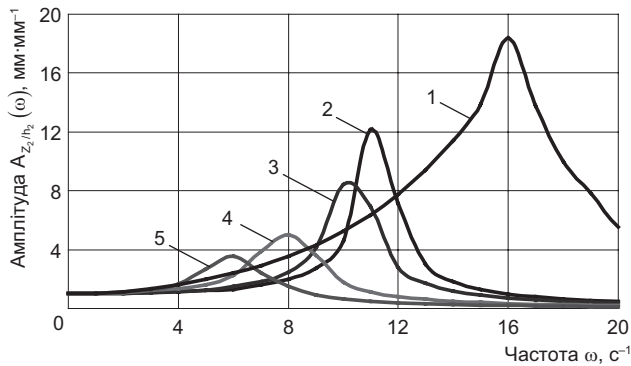


Рис. 3. Амплітудно-частотні характеристики вертикальних переміщень заднього моста енергетичного модуля під час відтворення ним коливань профілю шляху за різної величини коефіцієнта опору дисипативного зв'язку двох модулів: 1 — $K_h = 0 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 2 — $K_h = 1,00 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 3 — $K_h = 1,35 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 4 — $K_h = 1,65 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 5 — $K_h = 1,80 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$

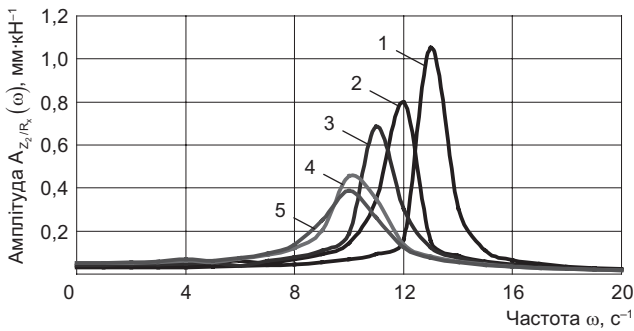


Рис. 4. Амплітудно-частотні характеристики вертикальних переміщень заднього моста енергетичного модуля під час відтворення ним коливань тягового опору плуга за різної величини коефіцієнта опору дисипативного зв'язку двох модулів: 1 — $K_h = 0 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 2 — $K_h = 1,00 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 3 — $K_h = 1,35 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 4 — $K_h = 1,65 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 5 — $K_h = 1,80 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$

амплітуди коливань зменшується разом із збільшенням коефіцієнта опору K_h дисипативного зв'язку двох модулів з одночасним зміщенням їх максимумів в область нижчих частот, що також є бажаним фактом.

Проведеними теоретичними дослідженнями вертикальних коливань модульного енергетичного засобу у складі орного агрегату встановлено, що збільшення жорсткості пружно-дисипативного зв'язку технологічного й енергетичного модулів призводить до зміщення частотних характеристик в область низьких частот з одночасним зменшенням їх максимальних значень. Характер зміни частотних характеристик коефіцієнта опору дисипативного зв'язку двох модулів під час відтворення агрегатом зовнішніх збурень неоднаковий. Інтенсивне

зменшення величини амплітудно-частотної характеристики спостерігається зі збільшенням до $1,65 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$, а далі — уповільнюється. Отримана величина K_h є раціональним рівнем жорсткості пружно-дисипативного зв'язку двох модулів.

Результати експериментальних досліджень показали, що за швидкості руху орного агрегату $1,5\text{--}1,7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ основну частку дисперсії прискорень вертикальних коливань заднього моста енергетичного модуля, як і коливання поздовжнього профілю агрофону, зосереджено в діапазоні частот $0\text{--}16 \text{ с}^{-1}$.

Графіки нормованих кореляційних функцій вертикальних коливань модульного енергетичного засобу у складі орного агрегату представляють функції, які поряд із випадковими складовими містять і гармонійні

періодичні коливання, що згасають (рис. 5). Такий характер коливань мали й нерівності профілю агрофону. Найбільша довжина кореляційного зв'язку (збільшення якого є бажаним) досягається за максимально можливої жорсткості пружно-дисипативного зв'язку двох модулів і становить приблизно 0,62 с. За вказаної вище швидкості руху орного агрегату це відповідає довжині 0,8–0,9 м.

Оцінка динаміки вертикальних коливань модульного енергетичного засобу у складі орного агрегату підтвердила теоретичні дослідження. Підтверджено той факт, що відсутність пружнодисипативного зв'язку двох

модулів ($K_h = 0 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$) характеризується дуже негативним коливальним процесом багаточасової технологічної системи у поздовжньо-вертикальній площині з незадовільним характером і величиною спектральної щільності та великою дисперсією (рис. 6). Водночас збільшення величини коефіцієнта опору дисипативного зв'язку двох модулів до $K_h = 1,80 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$ зменшує частотний діапазон основного спектра дисперсій прискорень вертикальних коливань до 8 с^{-1} . Це менше частотного діапазону коливань профілю агрофону, що також є бажаним.

Характер зменшення дисперсії прискорень вертикальних коливань модульного

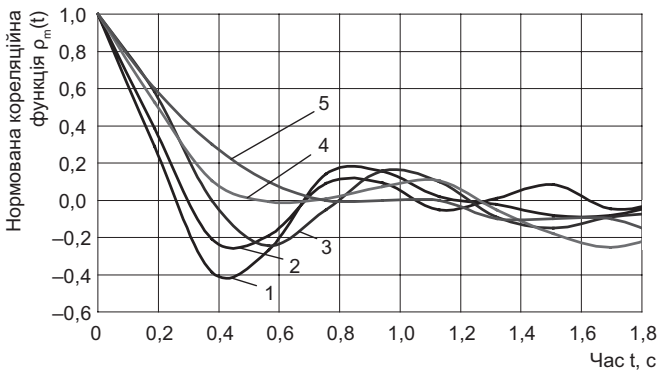


Рис. 5. Нормовані кореляційні функції прискорень вертикальних коливань заднього моста енергетичного модуля за різної величини коефіцієнта опору дисипативного зв'язку двох модулів: 1 – $K_h = 0 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 2 – $K_h = 1,00 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 3 – $K_h = 1,35 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 4 – $K_h = 1,65 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 5 – $K_h = 1,80 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$

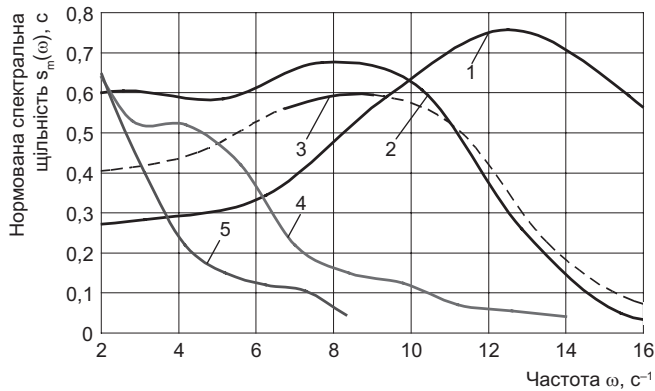


Рис. 6. Нормовані спектральні щільності прискорень вертикальних коливань заднього моста енергетичного модуля за різної величини коефіцієнта опору дисипативного зв'язку двох модулів: 1 – $K_h = 0 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 2 – $K_h = 1,00 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 3 – $K_h = 1,35 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 4 – $K_h = 1,65 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$; 5 – $K_h = 1,80 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$

енергетичного засобу зі збільшенням жорсткості пружнодисипативного зв'язку його модулів — однаковий. Інтенсивне зменшення дисперсій спостерігається зі збільшенням K_n до $1,65 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$, а далі залишається майже незмінним.

Основний спектр дисперсій коливань тягового опору плуга зосереджено в діапазоні

частот $0-18 \text{ с}^{-1}$. Збільшення жорсткості з'єднання двох модулів мало впливає на характер коливань тягового опору сільськогосподарського знаряддя. Нерівномірність коливань плуга майже в 10 разів менше впливає на плавність руху агрегату, ніж збурення від нерівностей поздовжнього профілю колії.

Висновки

Отримана адекватна динамічна модель модульного енергетичного засобу у складі сільськогосподарського агрегату як складових єдиної динамічної системи дає змогу досліджувати її рух у поздовжньо-вертикальній площині. Встановлено, що зі збільшенням коефіцієнта опору дисипативного зв'язку двох модулів до $1,80 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$ амплітуди коливань заднього моста енергетичного модуля зменшуються в 10 разів, а резонансні піки частотних характеристик зміщуються в область низьких частот із $16,5 \text{ с}^{-1}$ до $6,0 \text{ с}^{-1}$ з одночасним зменшенням їх максимальних значень у 4 рази. Піки амплітудно-частотних характеристик за відтворення модульним енергетичним засобом коливань тягового опору плуга

зміщуються з 13 до 10 с^{-1} з одночасним зменшенням їх максимальних значень у 3 рази.

Теоретичними й експериментальними дослідженнями доведено, що раціональна жорсткість пружно-дисипативного зв'язку двох модулів припадає на значення коефіцієнта опору $1,65 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$. Водночас дисперсії прискорень вертикальних коливань модульного енергетичного засобу зменшуються в 3 рази.

Установлено, що коливання тягового опору сільськогосподарських знарядь надають у 10 разів менший вплив на плавність ходу модульного енергетичного засобу у складі орного агрегату, ніж коливання поздовжнього профілю колії.

Adamchuk V.¹, Bulgakov V.², Kuvachov V.³

¹Institute of Mechanics and Automation of Agricultural Production of NAAS, 11 Vokzalna Str., vil. Hlevakha, Fastiv district, Kyiv oblast, Ukraine, 08631, ²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, Ukraine, 03041, ³Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University, 18 B. Khmelnytskyi Ave., Melitopol, Zaporizhzhia oblast, Ukraine, 72310; e-mail: ¹vvadamchuk@gmail.com, ²vbulgakov@meta.ua, ³volodymyr.kuvachov@tsatu.edu.ua; ORCID: ¹0000-0003-0358-7946, ²0000-0003-3445-3721, ³0000-0002-5762-256X

Research of smooth running of multi-axis technological systems

Goal. To improve the smooth running of the modular energy unit by creating an elastic-dissipative connection of the energy module with the technological one. **Methods.** Mathematical formalization of the studied process was based on the provisions of theoretical mechanics, tractor theory, statistical dynamics, frequency methods of the theory of automatic control of linear dynamical systems

for testing statistically random perturbing effects. The experimental studies were based on both generally accepted standards and developed original methods using tensometric, vibrographic equipment with the recording of signals recorded on a PC using an analog-to-digital converter. Processing of experimental results was performed on a PC using probability theory and correlation spectral analysis.

Results. According to the results of the study, an adequate dynamic model of a modular power tool in the plow unit as a multi-axis dynamic system is obtained, which allows studying its motion in the longitudinal-vertical plane. The values were obtained of the amplitude characteristics of the vertical displacements of the rear axle of the power module during the reproduction of the oscillations of the path profile and traction resistance of the plow at different values of the coefficient of dissipative resistance of the two modules of the modular power vehicle. Based on these experimental studies, the dependences of the normalized correlation functions and the spectral densities of the accelerations of the vertical oscillations of the rear axle of the energy module at different values of the coefficient of resistance

of the dissipative connection of the two modules were obtained. Their analysis made it possible to substantiate the value of the rational rigidity of the elastic-dissipative connection of the energy and technological modules of the modular energy unit of universal use. **Conclusions.** Studies proved that with increasing the coefficient of resistance of the dissipative connection of the two modules to $1.80 \text{ kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$, the amplitude of oscillations of the rear axle of the power module decreased 10 times, and resonant peaks of frequency characteristics were shifted to low frequencies from 16.5 s^{-1} to 6.0 s^{-1} with simultaneous reduction of their maximum values by 4 times. The peaks of the amplitude-frequency characteristics for the reproduction of the modular energy unit of oscillations of the traction

resistance of the plow shifted from 13 to 10 s^{-1} with a simultaneous decrease in their maximum values by 3 times. It is proved that the rational stiffness of the elastic-dissipative connection of two modules falls on the value of the resistance coefficient $1.65 \text{ kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$. The dispersion of the accelerations of the vertical oscillations of the modular energy unit was reduced by 3 times. It is established that the oscillations of the traction resistance of agricultural tools have 10 times less effect on the smoothness of the modular power tool in the plowing unit than the oscillations of the longitudinal profile of the track.

Key words: energy unit, technological module, vertical oscillations, elastic-dissipative connection, theoretical and experimental researches.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agroviznyk202201-06>

Бібліографія

1. Надикто В.Т. Модульні енергозасоби. *The Ukrainian Farmer*. 2010. № 7. С. 70–71.
2. Надикто В.Т. Роль модульних енергетических средств в формировании типажа тракторов на Украине. *Тракторы и сельхозмашины*. 2010. № 6. С. 22–25.
3. Nadykto V., Bulgakov V., Kyurchev V., Olt J. Structure development and results of testing a novel modular power unit. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015. V. 7. P. 40–44.
4. Надикто В., Кюрчев В., Панченко А. Перспективи та ефективність використання модульних енергетических засобів в Україні. *Збірник наукових праць УкрНДІПВТ*. 2003. № 6 (20). С. 6–10.
5. Кюрчев В.М., Надикто В.Т., Кувачов В.П. Рекомендації з підвищення плавності руху машинно-тракторних агрегатів на основі модульних енергетических засобів. *Праці ТДАТУ*. 2008. Вип. 8. Т. 8. С. 16–21.
6. Сидоров М. Упруго-демпфирующие свойства транспортно-технологического модуля в составе сельскохозяйственного машинно-тракторного агрегата. *Международный исследовательский журнал*. 2014. № 10–2 (41). С. 119–121.
7. Bulgakov V., Adamchuk V., Kuvachov V., Arak M. & Olt J. Study into movement of wide span tractors (vehicles) used in controlled traffic farming. 28TH DAAAM International symposium on intelligent manufacturing and automation Vienna. 2017. P. 199–208.
8. Судин Ю., Грицик Б. Самоходные машины для химизации. *Тракторы и сельхозмашины*. 1989. № 7. С. 40–42.
9. Гумилевский Ю. Трехосный трактор «Валмет 1502». *Тракторы и сельхозмашины*. 1978. № 2. С. 39–40.
10. Интеллектуальная технология для королевского класса. *Современная сельхозтехника и оборудование*. 2008. № 1. С. 26–28.
11. Беляев Н.М. Мощные и сверхмощные колесные сельскохозяйственные тракторы за рубежом. *Тракторы и сельхозмашины*. 1986. № 5. С. 52–58.
12. 600 л.с. на 8 колесах. *Современная сельхозтехника и оборудование*. 2010. № 1. С. 20–22.
13. Надикто В.Т., Кюрчев В.М., Кувачов В.П. Використання техніки в АПК: підручник. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2020. 268 с.