

УДК 631.37:631.3.00.65

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ВЕРТИКАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ОДНООСЬОВОГО ҐРУНТООБРОБНОГО АГРЕГАТУ З КОПАЧЕМ

Кувачов В.П., д.т.н.,

Дружич В.М., аспірант,

Шевченко С.О., аспірант,

Зеленов К.О., аспірант.

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені
Дмитра Моторного, м. Запоріжжя.*

Постановка проблеми. Актуальність теми забезпечення плавності руху ґрунтообробного агрегату, що складається з одноосьового енергетичного засобу та сільськогосподарського знаряддя з робочими органами реактивного типу (за типом копача), обумовлена кількома ключовими факторами.

По-перше, плавність руху агрегату безпосередньо впливає на ефективність обробітку ґрунту, адже його нерівномірний рух значно погіршує якість технологічної операції копання. Забезпечення рівномірного руху агрегату сприяє точності та однорідності обробітку, що є важливим для отримання високих врожаїв [1].

В друге – важливим питанням є енергозбереження, оскільки вертикальні коливання агрегату, вібрації та погіршення якості зчеплення рушіїв енергетичного засобу з ґрунтом призводять до підвищення витрати пального й загальної енергоємності процесу [2]. Розв’язання цієї проблеми дозволяє оптимізувати енерговитрати, що є особливо актуальним у сучасних умовах зростання цін на енергоносії. Крім того, плавність руху сприяє зниженню нерівномірних навантажень і вібрацій, які спричиняють передчасне зношення деталей енергетичного засобу та знаряддя. Це дозволяє збільшити строк служби техніки, а також зменшити витрати на її ремонт і обслуговування.

Окремої уваги заслуговує роль таких агрегатів у підтримці малих фермерських господарств, де великогабаритна техніка часто є недоступною чи недоцільною. Забезпечення стабільності роботи одноосьових енергетичних засобів підвищує доступність якісного ґрунтообробітку для фермерів, що сприяє популяризації малогабаритної техніки. Покращення її функціональності та усунення недоліків розширює можливості використання зазначених агрегатів у сільському господарстві.

Забезпечення плавності руху ґрунтообробних агрегатів також має важливе екологічне значення, оскільки нестабільний рух техніки може викликати зайве ущільнення ґрунту і порушення його структури [3]. Рівномірність руху агрегатів сприяє збереженню родючості ґрунту, що

є ключовим для сталого землеробства. До того ж, сучасний аграрний сектор висуває високі вимоги до продуктивності праці, що передбачає скорочення часу на виконання операцій без втрати їхньої якості. Плавний рух агрегатів дозволяє мінімізувати простої та втрати продуктивності роботи, забезпечуючи стабільний і якісний обробіток ґрунту.

Таким чином, дослідження плавності руху одноосового ґрунтообробного агрегату з копачем є надзвичайно актуальним з позиції енергоощадності, екологічної безпеки, продуктивності та підвищення ефективності сучасного сільського господарства. Дослідження та вирішення цієї проблеми не тільки покращить ефективність техніки, але й сприятиме розвитку аграрної галузі, зокрема малих і середніх господарств.

Наукова проблема плавності руху ґрунтообробного агрегату, що працює у складі одноосового енергетичного засобу та сільськогосподарського знаряддя з робочими органами реактивного типу (за типом копача), полягає в забезпеченні стабільності траєкторії, рівномірності швидкості та мінімізації його вертикальних коливань. Це зумовлено специфікою робочих органів реактивного типу, які під час роботи створюють нерівномірні навантаження. Зокрема, робочі органи, такі як копачі, генерують змінні сили, що можуть впливати на стійкість руху агрегату. Ці сили можуть викликати ривки, коливання або зміщення траєкторії руху агрегату. Також необхідно враховувати взаємодію між тяговим силою одноосового енергетичного засобу та зусиллями, що передаються від знаряддя на ґрунт. Дисбаланс сил може призвести до втрати зчеплення коліс із ґрунтом або до бічного зміщення агрегату. Нерівномірний тяговий опір ґрунту або його змінні характеристики можуть ускладнювати плавність руху агрегату [4, 5]. Наприклад, твердіші чи вологіші ділянки створюють нерівномірні навантаження. Крім того, одноосовий енергетичний засіб має обмежені можливості для стабілізації через свої конструктивні параметри. Відсутність додаткових осей чи систем активного управління погіршує ситуацію його сталого руху. Водночас, вібрації і коливання ґрунтообробних агрегатів виникають через динамічну взаємодію між знаряддям і енергетичним засобом, що знижує ефективність роботи та підвищує зношення його елементів.

Рішення окреслених проблем може включати:

- оптимізацію конструкції робочих органів і системи агрегування ґрунтообробного знаряддя з робочими органами реактивного типу;
- розроблення амортизаційних систем для зниження вертикальних коливань;
- використання інтелектуальних систем управління рухом;
- адаптацію параметрів роботи знаряддя до типу ґрунту та умов експлуатації.

Основні матеріали дослідження.

Динаміка руху одноосьових агрегатів, що працюють у складі сільськогосподарського знаряддя з робочими органами реактивного типу (за типом копача), у вертикальній площині визначається вхідними збурювальними впливами [6]. До таких впливів можна віднести нерівності поздовжнього профілю агрофону та нерівномірність тягового опору копача.

Відомо, що якість відпрацювання будь-якою динамічною системою вхідних змінних залежить від її характеристик. Відносно зазначеного агрегату такими характеристиками є його схема, а також конструктивні та інші параметри. Тому правильний вибір цих параметрів з урахуванням вимог до плавності руху агрегату забезпечує оптимальне перетворення збурювальних впливів, що діють на нього.

Для дослідження динаміки плоско паралельного руху ґрунтообробного агрегату у складі одноосьового енергетичного засобу і знаряддя за типом копача у вертикальній площині представимо його еквівалентною йому динамічною моделлю (рис. 1).

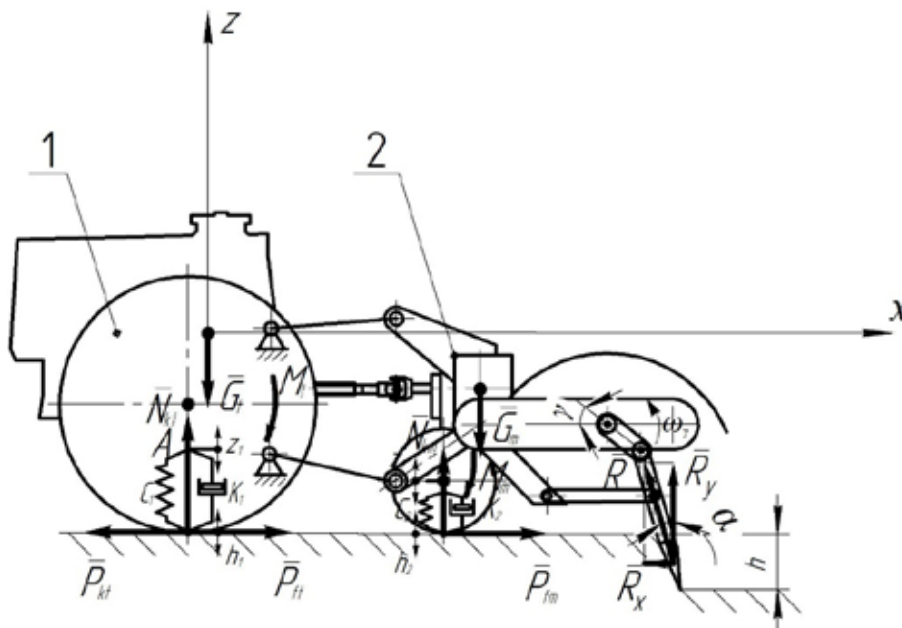


Рис. 1. Еквівалентна динамічна модель одноосьового ґрунтообробного агрегату з копачем у поздовжньо-вертикальній площині

При моделюванні динаміки вертикальних коливань одноосьового агрегату, що складається з енергетичного засобу та сільськогосподарського знаряддя за типом копача (рис. 1), для спрощення математичної моделі та збереження основних властивостей системи можна висунути низку припущень:

- враховуємо лише вертикальні коливання агрегату, нехтуючи можливими кутовими коливаннями технологічної частини. Це дозволяє спростити аналіз руху агрегату та сконцентрувати увагу на основних вертикальних механізмах, які визначають динаміку;

- припускаємо, що коливання тягового опору сільськогосподарського знаряддя не впливають на швидкість поступального руху агрегату, тому вона розглядається постійною. Це дозволяє спростити модель, виключаючи зміни швидкості внаслідок змінного опору при роботі копача;

- нерівності профілю агрофону можна розглядати як випадкову стаціонарну функцію, що дозволяє моделювати ці впливи на динаміку агрегату як випадкові збурення з певними статистичними властивостями, що спрощує аналіз руху агрегату через більш спрощену форму опису цих змін;

- для спрощення моделі можна припустити, що агрегат рухається по рівній поверхні, без нахилу в поздовжньо-поперечній площині. Це дозволяє уникнути складних розрахунків, пов'язаних з кутами нахилу та моментами сили, які вони можуть викликати;

- сили опору в шинах опорних коліс агрегату приймаються пропорційними швидкості його вертикальних коливань. Це припущення дозволяє моделям опору залишатися простими та підлягати лінійним рівнянням, що спрощує математичне моделювання динаміки агрегату;

- характеристики пружних елементів, таких як амортизатори або пружини, можна вважати лінійними, що дозволяє зберегти постійні значення жорсткості та демпфування в межах коливань, спрощуючи моделювання і забезпечуючи адекватне наближення для малих деформацій елементів.

Розглянемо рівняння та закони, які створюють основу для побудови математичної моделі руху вказаного агрегату в вертикальній площині і дозволяють детально вивчити динаміку коливань, вплив збурювальних факторів та інших механізмів, що визначають стабільність руху агрегату під час його роботи.

Вплив динаміки копача на енергетичний засіб можна врахувати за допомогою моделювання взаємодії цих двох компонентів як єдиної динамічної системи. Для цього використовуються рівняння Лагранжа, з урахуванням взаємопов'язаних ступенів свободи та сил, що виникають у системі [7]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial E}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i, \quad (1)$$

де T і E – кінетична та потенціальна енергії системи;

D – дисипативна функція розсіювання енергії системи;

q_i – узагальнені координати системи;

Q_i – узагальнені сили, які діють на систему.

Для опису коливань агрегату в вертикальній площині необхідно врахувати сили пружності та демпфування. Це можна описати рівнянням коливань, що враховує лінійні пружні елементи:

$$M \cdot \ddot{z} + k \cdot \dot{z} + c \cdot z = F_3, \quad (2)$$

де M – маса агрегату;

k – коефіцієнт демпфування;
 c – жорсткість пружних елементів;
 z – лінійне переміщення в вертикальній площині;
 F_z – зовнішнє збурення.

Алгоритм моделювання динаміки коливань агрегату у поздовжньо-вертикальній площині наступний.

1. Визначення узагальнених координат системи:

q_1 – лінійне переміщення енергетичного засобу;

q_2 – лінійне переміщення копача (робочого органу).

2. Визначення кінетичної енергії (T) системи, що враховує:

- рух енергетичного засобу:

$$T_t = \frac{1}{2} m_e \cdot \dot{q}_1^2, \quad (3)$$

де m_e – маса енергетичного засобу;

- рух копача:

$$T_m = \frac{1}{2} m_k \cdot (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2, \quad (3)$$

де m_k – маса копача.

3. Визначення потенціальної енергії E , що включає:

- деформацію ґрунту, викликану копачем (опір ґрунту):

$$U_{гр} = f(q_2), \quad (4)$$

де $f(q_2)$ – функція, що описує силу опору залежно від положення копача;

- гравітаційну складову:

$$U_g = m_k \cdot g \cdot h(q_2), \quad (5)$$

де $h(q_2)$ – висота центру мас копача.

4. Узагальнені сили Q_1 і Q_2 , які відповідають лінійним переміщенням узагальнених координат q_1 (переміщення енергетичного засобу) і q_2 (переміщення копача), визначаються як проекція всіх зовнішніх сил, які діють на систему, на напрямки відповідних узагальнених координат.

5. Врахування коливань і вібрацій. Динаміка копача може генерувати коливання, які передаються на енергетичний засіб через реактивні сили і нерівномірність дії робочих органів. Для врахування цих коливань додають демпфуючі сили ($k\dot{q}_i$) і жорсткісні складові (cq_i), що описуються рівняннями гармонійних коливань.

Отримані вирази дозволяють моделювати наступні процеси:

- розподіл реактивних сил між копачем і енергетичним засобом;

- вплив вібрацій і нерівностей ґрунту на стійкість руху агрегату;

- залежність роботи копача від швидкості й зусиль енергетичного засобу.

Таке моделювання дозволяє знайти оптимальні параметри системи (наприклад, масу копача, кут нахилу, демпфуючі елементи) для забезпечення плавного руху ґрунтообробного агрегату.

Висновки.

1. Моделювання динаміки агрегату у складі одноосьового енергетичного засобу та ґрунтообробного знаряддя з робочими органами реактивного типу має деякі не вирішені наукові проблеми, до яких слід віднести: складність точного опису впливу вертикальних коливань на загальну стабільність руху агрегату, а також взаємодію між енергетичним засобом і робочими органами, що працюють на ґрунт, з урахуванням специфіки їхнього реактивного типу.

2. Використання рівняння Лагранжа для опису руху розглянутої динамічної системи передбачає додаткове врахування параметрів агрегату у складі одноосьового енергетичного засобу та ґрунтообробного знаряддя, таких як: жорсткість і маса робочих органів, параметри вібрацій і вертикальних коливань, а також сили взаємодії між ґрунтом і робочими органами під час обробітку.

3. Розв'язання диференційованих рівнянь Лагранжа можливе методом чисельного інтегрування, що дозволить отримати закономірності впливу параметрів агрегату на плавність його руху, а також визначити оптимальні умови для зменшення інтенсивності вертикальних коливань і покращення ефективності роботи ґрунтообробного агрегату.

Список використаних джерел

1. Bulgakov V., Ivanovs S., Kuvachov V. Experimental investigations in vertical vibration damping of agricultural aggregate of block-modular type. *Proceeding 20th International Scientific Conference engineering for rural development*. 2021. P.635–642.

2. Kiurchev S., Nurek T., Kuvachov V. Scientific bases of increase movement smoothness of the machine-tractor units on base of modular power means. Monography: Warszawa. 2021. 136 p.

3. Кувачов В.П. Дослідження плавності руху модульного енергетичного засобу класу 1,4-3 при в'язкому демпфіруванні вертикальних коливань. *Вісник ХНТУСГ*. 2007. №60. С. 82–87.

4. Кувачов В.П., Кюрчев В.М. Теоретичне моделювання руху модульних енергетичних засобів класу 1,4-3 у поздовжньо-вертикальній площині. *Праці ТДАТУ*. 2008. №8(2). С. 14–26.

5. Bulgakov V., Olt J., Kuvachov V. Research into Dynamics of Motion Performed by Modular Power Unit as Part of Ploughing Tractor-Implement Unit. *Proceedings of the 32nd DAAAM International Symposium*. 2021. P. 0576–0585.

6. Bulgakov V., Olt J., Kuvachov V. Theory of smoothness of movement of multiple-axle agricultural combined tractor-implement units. *Proceedings of the 31st International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation"*. 2020. P. 0056–0065.

7. Bulgakov V., Ivanovs S., Volskyi V. Simulation of the Flat-parallel Movement of a Bridge Agricultural Unit with an Articulated Frame. *Rural sustainability research*. 2020. №44(339). P. 8–14.