

Антощенко Р.В.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка
E-mail: roman.tiaxntusg@gmail.com

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ
ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОГО
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО АГРЕГАТА
ЗІ ЗМІННОЮ МАСОЮ БУНКЕРУ

УДК 621.01:531.01

В роботі неведено теоретичні дослідження динаміки та енергоефективності комбінованого сільськогосподарського агрегата з лінійною зміною масою бункеру. Розраховано динамічні показники функціонування агрегату з визначенням впливу на його енергетичні показники. Досліджено математичну модель багатоелементного сільськогосподарського агрегату, що враховує зміну маси бункеру. Визначено витрату енергії елементами агрегату при зміні маси бункеру.

Ключові слова: сільськогосподарський агрегат, рух, енергетичні витрати, математична модель.

Вступ

Освоєння енергозберігаючих технологій виробництва продукції рослинництва є одним з пріоритетних напрямів розвитку машино-технологічної сфери АПК. При цьому першочерговими за актуальністю задачами є розробка методів енергетичної оцінки технологій та зниження енерговитрат МТА [1-3]. Комбіновані сільськогосподарські агрегати представляють собою багатоелементні машини, способи з'єднання яких пропонуються заводом виробником. Динаміка багатоелементних агрегатів потребує поглиблених досліджень для визначення оптимальних та менш витратних режимів роботи. Але різноманіття структур комбінованих агрегатів збільшує витрати часу на їх дослідження.

Таким чином, дослідження динаміки та енергоефективності комбінованих сільськогосподарських агрегатів, що дозволяє встановити вплив схеми агрегування, кінематичних, силових параметрів і енергетичних витрат при проектуванні нових та експлуатації існуючих агрегатів й розробити рекомендації з їх мінімізації, є актуальною та перспективною науково-прикладною проблемою для механізації сільськогосподарського виробництва України.

Аналіз публікацій

Математичні моделі, що досліджують динаміку багатоелементних агрегатів, що створені за допомогою рівнянь Лагранжу II-го роду, являються цілісними, тобто при зміні структури або внутрішніх зв'язків машини, необхідно перебудовувати модель спочатку, що призводить до підвищення витрат праці та часу на дослідження [4, 5]. Якщо кількість елементів машини більше двох та відстань від їх задніх осей до точки причепу більше нуля. Не існує рішення для рівнянь Лагранжу II-го роду в такому випадку [6].

Найчастіше під час дослідження динаміки машин їх остови та елементи розглядають, як тверді тіла. Рівняння динаміки твердого тіла, вільного від зв'язків, з локальною системою координат в центрі мас мас вид [7]:

$$\begin{cases} m_i \mathbf{a}_i^{(0)} = \mathbf{f}_i^{(0)}, \\ \mathbf{J}_i^{(i)} \boldsymbol{\varepsilon}_i^{(i)} + \mathbf{W}_i^{(i)} \mathbf{J}_i^{(i)} \boldsymbol{\omega}_i^{(i)} = \mathbf{L}_i^{(i)}, \end{cases} \quad (1)$$

де m – маса тіла; \mathbf{a} – прискорення; \mathbf{f} – вектор результуючої сили (доданок активних та реактивних сил); \mathbf{J} – тензор інерції; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор кутових прискорень; \mathbf{W} – кососиметрична матриця проєкцій кутових швидкостей; \mathbf{L} – вектор результуючого моменту (доданок активних та реактивних моментів відносно центру мас),

верхній індекс в скобках позначає систему координат, в якій задані точки та вектори.

Рівняння (1) записано в глобальній системі координат (СК) (верхній індекс, що позначає систему координат векторів, нульовий), а друге в локальній СК тіла, так як тензор інерції в глобальній СК залежить від положення тіла.

Динаміка сільськогосподарських агрегатів з елементами, що змінюють масу під час виконання технологічних операцій, накладають обмеження на використання рівнянь динаміки (1) для їх дослідження [8]. Однак, система (1) дозволяє формувати рівняння для одноелементних машин [9].

Методи дослідження для тіл з лінійно змінною масою вказують на відповідну лінійну залежність вихідних параметрів [8, 10, 11]. Рівняння динаміки для сільськогосподарських агрегатів зі змінною масою машин наведені у роботі Артоболевського І. І. [12], що врахував відмінності сільськогосподарських агрегатів та узагальнив праці Мещерського І. В.

Мета роботи

Метою роботи є теоретичне дослідження динаміки та енергоефективності комбінованого сільськогосподарського агрегата зі змінною масою бункеру для підвищення ефективності використання.

Основна частина

Теоретичні дослідження просторового руху багатоелементного сільськогосподарського агрегату потребують складання динамічної моделі. Для цього розглянемо просторову динамічну модель комбінованого ґрунтообробно-посівного машинно-тракторного агрегату із схемою агрегування «трактор – бункер – сівалка» (рис. 1) та використаємо наступні позначення: n – верхній індекс, що приймає значення Т, Б, С вказує приналежність змінної елемента агрегату, відповідно трактору, бункеру, сівалці; $XOYZ$ – глобальна (нерухлива) система координат; xou_z^n – зв'язана система координат; $t. o^n$ – центр мас; $t. O$ – центр глобальної (нерухливої) системи координат; α, β, γ^n – кути повороту елемента навколо відповідних осей x, y, z ; m^n – маса елемента агрегату; J_x^n, J_y^n, J_z^n – приведені моменти інерції елемента агрегату до відповідної вісі; \bar{v} – швидкість руху агрегату; D_{hf}^n, D_{hr}^n – передня та задня точки навіски (приєднання технологічного обладнання); $Pk_{ij}^n, Mk_{ij}^n, Nk_{ij}^n$ – дотична сила тяги, момент та нормальна реакція на відповідному колесі агрегату; mk^n, Jk_{ij}^n – маса та приведений момент інерції коліс елементів агрегату; Cu_{ij}^n, ku_{ij}^n – приведена жорсткість та податливість шин елементів агрегату.

Математична модель динаміки просторового руху багатоелементного комбінованого машинно-тракторного агрегату формується методологією [13].

Динамічна модель багатоелементного комбінованого сільськогосподарського агрегату (рис. 1) має вісім узагальнених координат, тобто вісім ступенів свободи. Вектор узагальнених координат має вид:

$$\dot{\mathbf{q}} = [X^T, Y^T, Z^T, \beta^T, \alpha^B, \beta^B, \alpha^C, \beta^C]^T, \quad (2)$$

де X^T, Y^T, Z^T – повздовжня, поперечна та вертикальна координата центра мас трактора; β^T – кут повороту центра мас трактора навколо поперечної осі (вісь y); α^B – кут повороту центра мас бункеру навколо повздовжньої осі (вісь x); β^B – кут

повороту центру мас бункеру навколо поперечної осі (вісь y); α^C – кут повороту центру мас бункеру навколо повдовжньої осі (вісь x); β^C – кут повороту центру мас бункеру навколо поперечної осі (вісь y).

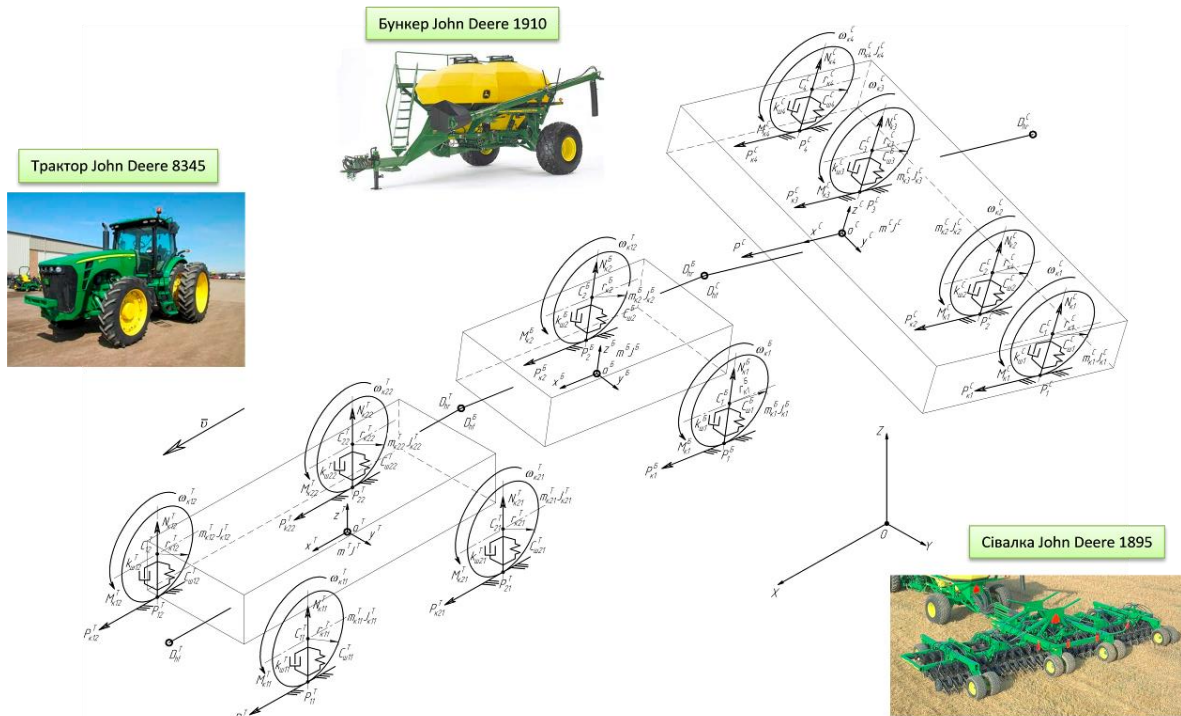


Рис. 1 – Динамічна модель

В якості незалежних координат із залежними варіаціями обрані.

$$\dot{\mathbf{v}} = [\alpha^T, \gamma^T, \varphi_{11}^T, \varphi_{12}^T, \varphi_{21}^T, \varphi_{22}^T, \gamma^B, \varphi_{11}^B, \varphi_{12}^B, \gamma^C, \varphi_1^C, \varphi_2^C, \varphi_3^C, \varphi_4^C]^T, \quad (3)$$

де α^T, γ^T – кути повороту центру мас трактора навколо повдовжньої (вісь x) та вертикальної осей (ось z); $\varphi_{11}^T, \varphi_{12}^T, \varphi_{21}^T, \varphi_{22}^T$ – кути повороту коліс трактора (переднього лівого, переднього правого, заднього лівого, заднього правого) навколо осі обертання; γ^B – кут повороту центру мас бункеру навколо вертикальної осі (вісь z); $\varphi_{11}^B, \varphi_{12}^B$ – кути повороту коліс бункеру (лівого та правого) навколо осі обертання; γ^C – кут повороту центру мас сівалки навколо вертикальної осі (вісь z); $\varphi_1^C, \varphi_2^C, \varphi_3^C, \varphi_4^C$ – кути повороту відповідних коліс сівалки навколо осі обертання.

Теоретично дослідимо математичну модель динаміки комбінованого ґрунтообробно-посівного багатоелементного машинно-тракторного агрегату на прикладі трактора John Deere 8345R, бункера для посівного матеріалу та добрив John Deere 1910 та сівалки прямої сівби John Deere 1895.

Комбінований ґрунтообробно-посівний агрегат на прикладі трактора John Deere 8345R, бункера для посівного матеріалу John Deere 1910 та сівалки прямої сівби John Deere 1895 має бункер маса в якому змінюється лінійно за часом. Враховуючи норму висіву сівалкою 200 кг/га маса бункеру змінюється лінійно від $m_B|_{t=0} = 11436\text{кг}$ до $m_B|_{t=4000} = 3165\text{кг}$ за $T = 4000\text{с}$. Залежність маси бункера від часу наведено на рис. 2.

Математична модель динаміки багатоелементного сільськогосподарського агрегату зі схемою агрегування «трактор – бункер – сівалка» в формі Коші має вид:

$$\begin{cases} \dot{X}^T = f_1(\mathbf{G}, \mathbf{g}, \mathbf{M}, \mathbf{F}, m_B(t)); \\ \dot{Y}^T = f_2(\mathbf{G}, \mathbf{g}, \mathbf{M}, \mathbf{F}, m_B(t)); \\ \dot{Z}^T = f_3(\mathbf{G}, \mathbf{g}, \mathbf{M}, \mathbf{F}, m_B(t)); \\ \dot{\beta}^T = f_4(\mathbf{G}, \mathbf{g}, \mathbf{M}, \mathbf{F}, m_B(t)); \\ \dot{\alpha}^B = f_5(\mathbf{G}, \mathbf{g}, \mathbf{M}, \mathbf{F}, m_B(t)); \\ \dot{\beta}^B = f_6(\mathbf{G}, \mathbf{g}, \mathbf{M}, \mathbf{F}, m_B(t)); \\ \dot{\alpha}^C = f_7(\mathbf{G}, \mathbf{g}, \mathbf{M}, \mathbf{F}, m_B(t)); \\ \dot{\beta}^C = f_8(\mathbf{G}, \mathbf{g}, \mathbf{M}, \mathbf{F}, m_B(t)), \end{cases} \begin{cases} \dot{\alpha}^T = \frac{a^T \dot{X}^T + b^T \dot{Y}^T + c^T \dot{Z}^T - \beta^T (d^T \cos \gamma^T + \sin \gamma^T)}{\cos \gamma^T - d^T \sin \gamma^T}; \\ \dot{\gamma}^T = \alpha^T \beta^T + v B_x^T \frac{\operatorname{tg} \gamma^T}{l^T}; \quad \dot{\phi}_{11}^T = \frac{v C_{11xy}^T}{Z_{C_{11}}^T}; \quad \dot{\phi}_{12}^T = \frac{v C_{12xy}^T}{Z_{C_{21}}^T}; \\ \dot{\phi}_{21}^T = \frac{v C_{21xy}^T}{Z_{C_{21}}^T}; \quad \dot{\phi}_{22}^T = \frac{v C_{22xy}^T}{Z_{C_{22}}^T}; \quad \dot{\gamma}^B = \frac{v y A^B}{l_1^B - h f_x^B} + \alpha^B \beta^B; \\ \dot{\phi}_1^B = \frac{v C_{1x}^B}{Z_{C_1}^B}; \quad \dot{\phi}_2^B = \frac{v C_{2x}^B}{Z_{C_1}^B}; \quad \dot{\gamma}^C = \frac{v y A^C}{l_1^C - h f_x^C} + \alpha^C \beta^C; \\ \dot{\phi}_1^C = \frac{v C_{1x}^C}{Z_{C_1}^C}; \quad \dot{\phi}_2^C = \frac{v C_{2x}^C}{Z_{C_2}^C}; \quad \dot{\phi}_3^C = \frac{v C_{3x}^C}{Z_{C_3}^C}; \quad \dot{\phi}_4^C = \frac{v C_{4x}^C}{Z_{C_4}^C}. \end{cases} \quad (4)$$

де f_i – функції від векторів-матриць $\mathbf{G}, \mathbf{g}, \mathbf{M}, \mathbf{F}$; $m_B(t)$ – маса бункера, що змінюється за часом; $i = 1, \dots, 8$ – номер узагальненої координати.

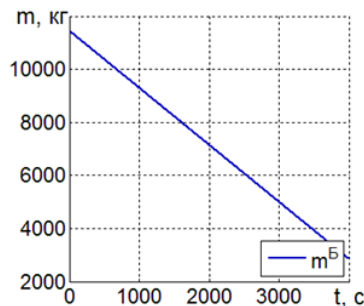


Рис. 2 – Залежність маси бункера від часу

В математичній моделі комбінованого ґрунтообробно-посівного агрегату (2)–(4) на кожному кроці інтегрування рівнянь у формі Коші підставляється відповідна до часу маса. Результати розрахунку математичної моделі наведено на рис. 3-6.

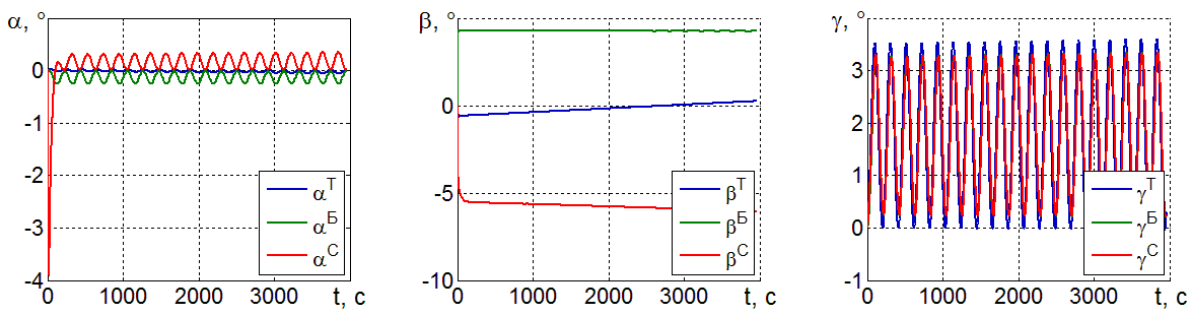


Рис. 3 – Залежності кутів повороту елементів агрегату від часу

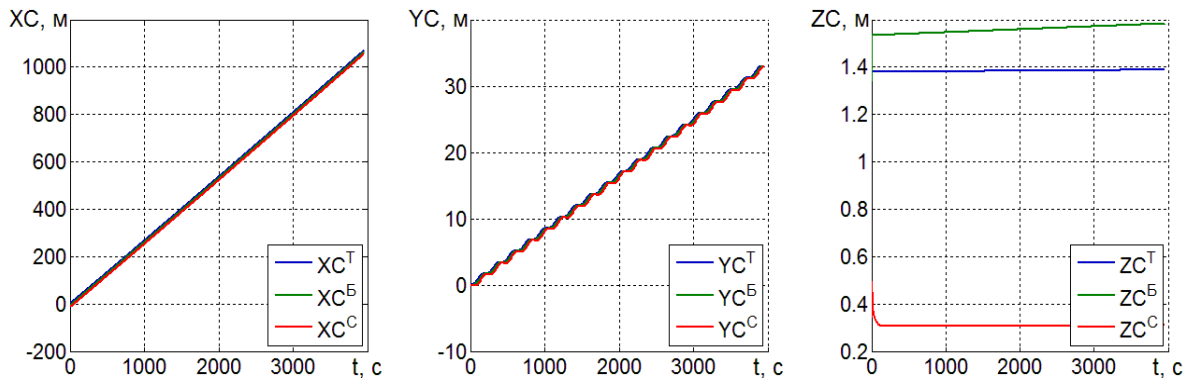


Рис. 4 – Залежності координат центрів мас елементів агрегату від часу

Амплітуда та розмах коливань кутів повороту елементів агрегату α^T , α^B , α^C навколо вісі x залишаються постійними для трактора, бункера та сівалки (рис. 3). Розмахи коливань кутів повороту (навколо вісі z) бункера $\Delta\gamma^B$ та сівалки $\Delta\gamma^C$ збільшуються на $0,25^\circ$. Кут повороту трактора β^T збільшується від -1° до 1° , що приводить до перерозподілу навантаження на передню та задню осі трактора.

При зниженні маси бункера його центр зв'язаної системи координат підвищується від 1,51 м до 1,58 м (рис. 4). Також підвищується і центр зв'язаної системи координат трактора від 1,372 м до 1,382 м. Це відбувається за рахунок пружності пневматичних шин трактора та бункера. Центр зв'язаної системи координат сівалки залишається на сталому рівні 0,3 м.

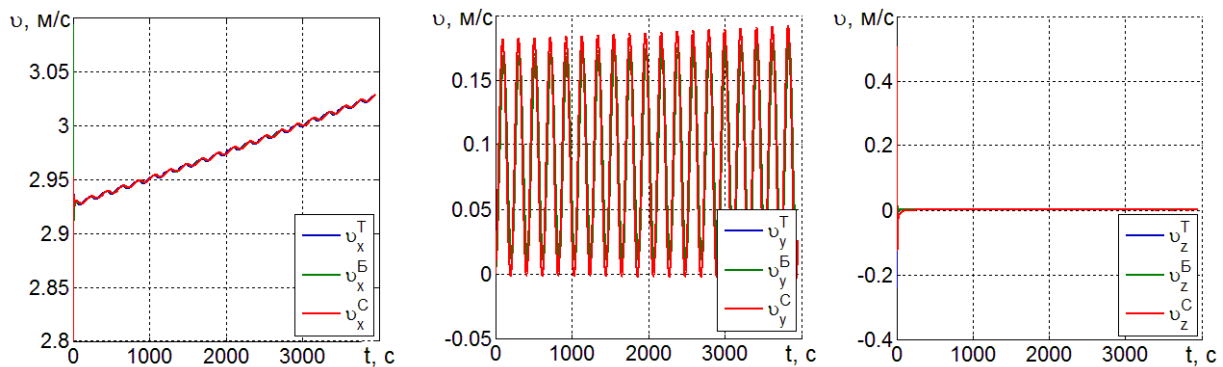


Рис. 5 – Залежності швидкостей центрів мас елементів агрегату від часу

Розраховано, що швидкість центрів мас елементів агрегату (рис. 5) по вісі x підвищується лінійно на $0,1$ м/с, що не призводить до погіршення агрегротехнічних вимог. Швидкості центрів мас елементів агрегату по вісі y збільшуються на $0,05$ м/с, що також не впливає на агротехнічні вимоги. Швидкості центрів мас по вісі z залишаються постійними.

Зниження маси бункера приводить до зниження тягового опору агрегату (зниження опору руху), що приводить до збільшення поступальної швидкості руху. Зниження тягового опору приводить до зниження навантаження на двигун внутрішнього згоряння і внаслідок до збільшення його швидкості обертання (й збільшенні швидкості руху агрегату в цілому).

Розрахуємо енергетичні витрати елементами агрегату та наведемо на рис. 6.

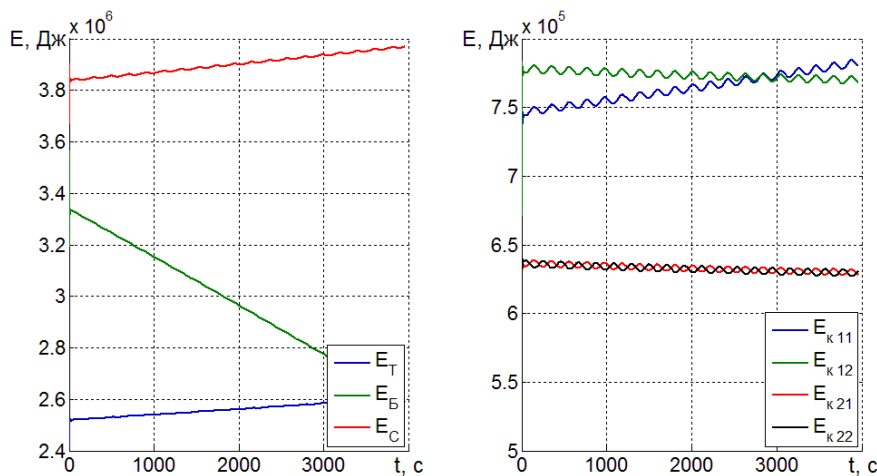


Рис. 6 – Залежності енергетичних витрат елементів агрегату від часу

Енергетичні витрати сівалкою та трактором збільшуються з $3,84$ МДж до

3,96 МДж (сівалкою) й з 2,51 МДж до 2,6 МДж (трактором) лінійно при зменшенні маси бункера (рис. 6). Енергетичні витрати бункером зменшуються з 3,33 МДж до 2,59 МДж тому, що знижується його маса та відповідно тяговий опір. Енергетичні витрати задніми колесами трактора знижуються з 6,37 МДж до 6,28 МДж тому, що кут повороту трактора навколо вісі $y - \beta^T$ збільшується. Енергетичні витрати переднім лівим колесом підвищується з 7,44 МДж до 7,81 МДж, а правим знижується з 7,8 МДж до 7,67 МДж.

Математична модель динаміки та енергетики комбінованого ґрунтообробно-посівного агрегату дозволила дослідити енергетичні витрати та встановити вплив зміни маси бункера на динаміку та енергетику агрегату.

Висновки

1. Лінійна зміна маси бункера приводить до відповідної лінійної зміни динамічних показників агрегату та енергетичних витрат його елементами.

2. Розраховано, що швидкість центрів мас елементів агрегату по вісі x підвищується лінійно на 0,1 м/с, що не призводить до погіршення агрегротехнічних вимог. Швидкості центрів мас елементів агрегату по вісі y збільшуються на 0,05 м/с, що також не впливає на агротехнічні вимоги. Швидкості центрів мас по вісі z залишаються постійними.

3. Зниження маси бункера приводить до зниження тягового опору агрегату (зниження опору руху), що приводить до збільшення поступальної швидкості руху. Зниження тягового опору приводить до зниження навантаження на двигун внутрішнього згоряння і внаслідок до збільшення його швидкості обертання (й збільшенні швидкості руху агрегату в цілому).

4. Енергетичні витрати сівалкою та трактором збільшуються з 3,84 МДж до 3,96 МДж (сівалкою) й з 2,51 МДж до 2,6 МДж (трактором) лінійно при зменшенні маси бункера. Енергетичні витрати бункером зменшуються з 3,33 МДж до 2,59 МДж тому, що знижується його маса та відповідно тяговий опір. Енергетичні витрати задніми колесами трактора знижуються з 6,37 МДж до 6,28 МДж тому, що кут повороту трактора навколо вісі $y - \beta^T$ збільшується. Енергетичні витрати переднім лівим колесом підвищується з 7,44 МДж до 7,81 МДж, а правим знижується з 7,8 МДж до 7,67 МДж.

Література

1. Погорелый Л. В. Повышение эксплуатационно-технологической эффективности сельскохозяйственной техники / Л. В. Погорелый. К.: Техника, – 1990. – 176 с.
2. Пастухов В. І. Обґрунтування оптимальних комплексів машин для механізації польових робіт: дис. докт. техн. наук: 05.05.11 / В. І. Пастухов; ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Х., 2006. – 374 с.
3. Козаченко О. В. Ресурсозбереження в сільськогосподарських агрегатах при виконанні технологічних операцій у рослинництві: дис... докт. техн. наук: 05.05.11 / О. В. Козаченко; Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків, 2006. – 317 с.
4. Антощенко, Р. В. К исследованию нелинейной математической модели движения многоэлементных мобильных машин [Текст] / Р. В. Антощенко // MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Vol. 16, №7 – 2014. – Lublin. – С. 77-83.
5. Антощенко Р.В. К построению уравнений динамики многоэлементного машинно-тракторного агрегата [Текст] / Р.В. Антощенко, Л.Н. Тищенко, Ю.М. Андреев //

Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця, 2015. – №3(79) – С. 69-79.

6. A. De Luca. Modelling and control of nonholonomic mechanical systems [Text] / A. De Luca, G. Oriolo // Kinematics and Dynamics of Multi-Body Systems (J. Angeles, A. Kecskemethy Eds.). Springer-Verlag. – 1995. – P. 301-305.
7. Гетманский В.В. Высокопроизводительные методы расчета дискретных моделей связанных систем тел [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / В. В. Гетманский. – Волгоград, 2013. – 18 с.
8. Антощенко Р.В. Теоретичні дослідження руху ґрунтообробно-посівного агрегату при диференціації маси технологічної ємності [Текст] / Р.В. Антощенко // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ. – Х.: ХНТУСГ, 2013. – Вип. 135. – С. 158-162.
9. Антощенко, Р.В. Теоретические исследования динамической модели колесного трактора класса 30КН [Текст] / Р.В. Антощенко // MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Vol. 15, №7 – 2013. – Lublin. – С. 171-176.
10. Ольшанский, В. П. ВБК-метод в расчётах колебаний механизмов с переменной массой звеньев / В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. - Кіровоград: КНТУ, 2013. - Вип. 43, ч. 1. - С. 108-113.
11. Ольшанський В. П. Нестационарные колебания механической системы линейно-переменной массы с комбинированным трением / В. П. Ольшанский // Вісник ХНТУСГ: Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва. – 2014. – Х.: ХНТУСГ. – Вип. – С. 324–333.
12. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин: Учебник для втузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.
13. Andreev, Y. Dynamics of multielement agricultural aggregates taking into account nonholonomic constraints and spatial motion / Y. Andreev, R. Antoshchenkov // Nonlinear Dynamics – 2016: Proceedings of 5th International Conference (September 27-30, 2016) / National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute” at al. – Kharkov, 2016. – pp. 48-56.

Summary

Antoshchenkov R. Theoretical study of dynamics and energy efficiency of a combined agricultural unit with the variable mass of bunker

The theoretical studies of the dynamics and energy efficiency of the combined agricultural aggregate with a linear change in the mass of the hopper are not presented in the work. The dynamic performance indicators of the unit are calculated with the determination of the effect on its energy indicators. A mathematical model of a multi-element agricultural aggregate is considered, which takes into account the change in the mass of the hopper. The energy consumption by the elements of the unit is determined when the hopper mass changes.

Key words: agricultural aggregate, movement, energy costs, mathematical model.

References

1. Pogorelyj L. V. Povyshenie jekspluatacionno-tehnologicheskoy jeffektivnosti sel'skoho zjajstvennoj tehniki / L. V. Pogorelyj. K.: Tehnika, – 1990. – 176 s.

2. Pastuxov V. I. Obgruntuvannya optimal'nykh kompleksiv mashyn dlya mexanizatsiyi pol'ovoyx robot: dys. dokt. texn. nauk: 05.05.11 / V. I. Pastuxov; XNTUSH im. P. Vasylenka. – X., 2006. – 374 s.
3. Kozachenko O. V. Resursozberezhennya v sil's'kohospodars'kyx ahrehatax pry vykonnanni texnologichnyx operacij u roslynnnyctvi: dys... dokt. texn. nauk: 05.05.11 / O. V. Kozachenko; Xarkivs'kyj nacional'nyj texnichnyj universytet sil's'kohospodarstva im. Petra Vasylenka. – Xarkiv, 2006. – 317 s.
4. Antoshhenkov, R. V. K yssledovanyyu nelynejnoj matematycheskoj modely dvyzhenyya mnogoelementnyx mobil'nyx mashyn [Tekst] / R. V. Antoshhenkov // MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Vol. 16, №7 – 2014. – Lublin. – S. 77-83.
5. Antoshhenkov R.V. K postroenyuu uravnenyj dynamyky mnogoelementnoho mashynno-traktornoho ahrehata [Tekst] / R.V. Antoshhenkov, L.N. Tyshhenko, Yu.M. Andreev // Vibratsiyi v texnici ta texnolohiyax. – Vinnytsya, 2015. – №3(79) – S. 69-79.
6. A. De Luca. Modelling and control of nonholonomic mechanical systems [Text] / A. De Luca, G. Oriolo // Kinematics and Dynamics of Multi-Body Systems (J. Angeles, A. Kecskemethy Eds.). Springer-Verlag. – 1995. – P. 301-305.
7. Hetmanskij V.V. Visokoproizvoditel'nie metodi rascheta diskretnix modelej svyazannix system tel [Tekst]: avtoref. dys. ... kand. texn. nauk: 05.13.18 / V. V. He-tmanskij. – Volhohrad, 2013. – 18 s.
8. Antoshhenkov R.V. Teoretychni doslidzhennya ruxu gruntoobrobno-posivnoho ahrehatu pry dyferenciaciyi masy texnologichnoyi yemnosti [Tekst] / R.V. Antoshhenkov // Mexanizatsiya sil's'kohospodars'koho vyrobnyctva: Visnyk XNTUSH. – X.: XNTUSH, 2013. – Vyp. 135. – S. 158-162.
9. Antoshhenkov, R.V. Teoretycheskye yssledovannya dynamycheskoj modely kolesnoho traktora klassa 30KN [Tekst] / R.V. Antoshhenkov // MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Vol. 15, №7 – 2013. – Lublin. – S. 171-176.
10. Ol'shanskyj, V. P. VBK-metod v raschëtax kolebanyj mexanyzmov s peremЕННОj mas-soj zven'ev / V. P. Ol'shanskyj, S. V. Ol'shanskyj // Konstruyuvannya, vyrobnyctvo ta ekspluatatsiya sil's'kohospodars'kyx mashyn: zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-texn. zb. Kirovohrad: KNTU, 2013. - Vyp. 43, ch. 1. - S. 108-113.
11. Ol'shans'kyj V. P. Nestatsyonarnnye kolebannya mexanycheskoj systemy lynejno-peremЕННОj massy s kombynyrovannym trenyem / V. P. Ol'shanskyj // Visnyk XNTUSH: Problemy nadijnosti mashyn ta zasobiv mexanizatsiyi sil's'kohospodars'ko-ho vyrobnyctva. – 2014. – X.: XNTUSH. – Vyp. – S. 324–333.
12. Artobolevskij Y. Y. Teoryya mexanyzmov y mashyn: Uchebnyk dlya vtuzov. 4-e yzd., pererab. y dop. – M.: Nauka. Hl. red. fiz.-mat. lyt., 1988. – 640 s.
13. Andreev, Y. Dynamics of multielement agricultural aggregates taking into account nonholonomic constraints and spatial motion / Y. Andreev, R. Antoshchenkov // Nonlinear Dynamics – 2016: Proceedings of 5th International Conference (September 27-30, 2016) / National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute” at al. – Kharkov, 2016. – pp. 48-56.