

УДК 631.352.2

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ПРИВОДНОГО МЕХАНІЗМУ КОСАРКИ

Бабій А.В., к.т.н., доцент; Бабій М.В., здобувач

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя)

В роботі проведено математичне моделювання енергозберігаючого кривошипно-шатунного приводного механізму косарки сегментно-пальцевої. Представлено математичні залежності для додаткового пристрою, що забезпечує мінімальне енергоспоживання косаркою на будь-яких режимах її роботи.

Постановка проблеми. Забезпечення високої ефективності роботи сільськогосподарської техніки лежить в площині підвищення її продуктивності при високій надійності та мінімальному енергоспоживанні. Всі ці проблеми є достатньо актуальними та потребують свого вирішення. Не винятком є і машини для скошування трав. Тут підвищення продуктивності часто тягне за собою збільшення швидкості руху різального апарату. А це, в свою чергу, викликає збільшення інерційних сил рухомих мас різального апарату та його приводу. Тому виникає необхідність розробки нових ефективних конструкцій таких апаратів та математичних моделей, які описують їх роботу.

Аналіз досліджень і публікацій. Розробка нових конструкцій різальних апаратів, питання їх продуктивності та енергоспоживання лежать в основі багатьох досліджень. Дана проблематика розвинута в працях відомих вчених: Алферова С.А., Босого Е.С., Василенка П.М., Геронімуса Я.Л., Горячкіна В.П., Желіговського В.А., Карпенка В.Д., Листопада Г.Е. [1-4] та ін.

Аналізуючи літературні джерела, можна знайти різні математичні моделі, якими описують роботу різального апарату, зокрема, з кривошипно-шатунним приводним механізмом. Одним з основних недоліків таких апаратів є їхня динамічна незрівноваженість, зменшення ефекту якої досягається використанням різного роду додаткових елементів. Серед таких елементів є пружини, що сприймають кінетичну енергію рухомих мас механізму, перетворюють її в потенціальну енергію деформації, акумулюють та назад віддають в систему. Недоліком розглянутих моделей є нездатність змінювати параметри додаткових пружних елементів, виходячи з навантаження на різальний апарат, а їх розрахунок ведеться з умови повного перетворення наявної кінетичної енергії механізму в потенціальну енергію деформації пружних елементів.

Мета досліджень. Розробити математичну модель енергозберігаючого приводного механізму косарки, що містить додатковий пристрій з регульованими параметрами, які встановлюються відповідно до умов роботи і

забезпечують мінімальне енергоспоживання машиною.

Результати досліджень. Принцип роботи приводного механізму косарки з регульованими параметрами є викладений в роботах [5–7]. Тут представимо його розрахункову схему для побудови динамічної моделі, рис. 1.

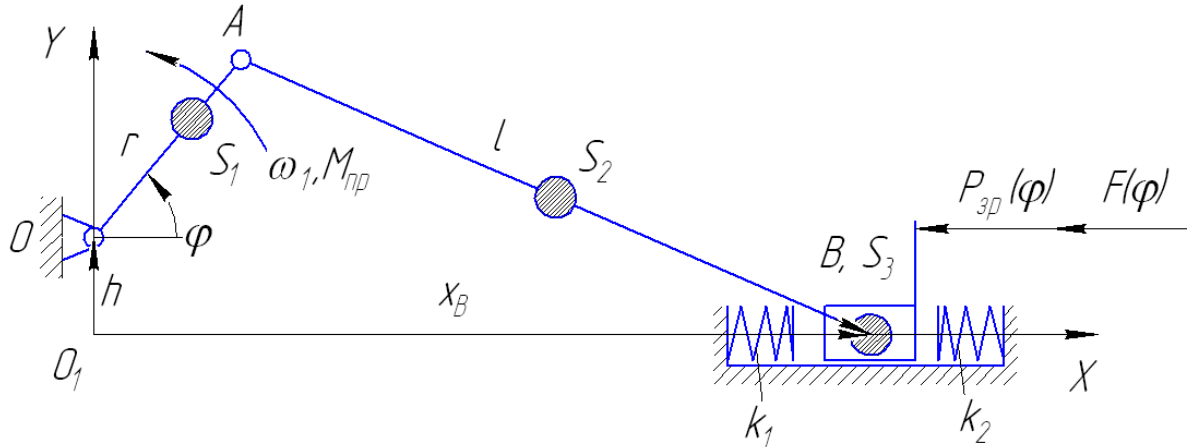


Рисунок 1 – Розрахункова схема енергозберігаючого приводного механізму косарки

Для побудови динамічної моделі запишемо рівняння Лагранжа другого роду:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = Q, \quad (1)$$

де T – кінетична енергія системи;
 Π – потенціальна енергія системи;
 Q – узагальнена сила;
 t – час;
 φ – узагальнена координата;
 $\dot{\varphi}$ – узагальнена швидкість.

Відомо, що кінетична енергія механізму залежить від величини приведенного моменту інерції всього механізму $J_{S_{np}}(\varphi)$ [1, 5].

$$T = J_{S_{np}}(\varphi) \frac{\dot{\varphi}^2}{2}. \quad (2)$$

де $\dot{\varphi}$ – кутова швидкість кривошипа (виступає узагальненою швидкістю), що є похідною кута його повороту φ по часу t , тобто:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (3)$$

Тоді частинна похідна кінетичної енергії по кутовій швидкості кривошипа в загальному вигляді буде становити:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = J_{S_{np}}(\varphi) \dot{\varphi}. \quad (4)$$

Відповідно частинна похідна кінетичної енергії по узагальненій координаті:

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = \frac{\partial J_{S_{np}}(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{\varphi^2}{2}. \quad (5)$$

Тоді повна похідна по часу від частинної похідної по кутовій швидкості набуде вигляду:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \varphi} = J_{S_{np}}(\varphi) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{\partial J_{S_{np}}(\varphi)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} \varphi = J_{S_{np}}(\varphi) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{\partial J_{S_{np}}(\varphi)}{\partial \varphi} \varphi^2. \quad (6)$$

Таким чином, на цьому етапі віднайдені всі складові, що відносяться до кінетичної енергії розглядуваного механізму.

Потенціальна енергія, яка існує в механізмі, відображає роботу пружних елементів з регульованими параметрами. Її представимо як суму потенціальних енергій окремих елементів

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2, \quad (7)$$

де Π_1 – потенціальна енергія деформації першого пружного елемента з жорсткістю k_1 ;

Π_2 – потенціальна енергія деформації другого пружного елемента з жорсткістю k_2 .

Виходячи з цього, потенціальна енергія системи буде становити

$$\Pi = \frac{k_1(X_1(x))^2}{2} + \frac{k_2(X_2(x))^2}{2}, \quad (8)$$

де $X_1(x)$, $X_2(x)$ – функції переміщення, відповідно, першого і другого пружних елементів;

x – узагальнена координата, яка виражає кут повороту кривошипа φ , або ж розрахунок можна вести за переміщенням ножа S .

Функції переміщення $X_1(x)$, $X_2(x)$ запишемо наступним чином.

$$X_1(x) = \frac{a_{10}}{2} + \sum_n (a_{1n} \cdot \cos(n \cdot x) + b_{1n} \cdot \sin(n \cdot x)), \quad (9)$$

де

$$a_{10} = \frac{1}{\varphi_S} \int_0^{\theta_1} (\theta_1 - x) dx + \int_{\theta_4}^{\varphi_{2S}} (x - \theta_4) dx,$$

$$a_{1n} = \frac{1}{\varphi_S} \int_0^{\theta_1} (\theta_1 - x) \cdot \cos(n \cdot x) dx + \int_{\theta_4}^{\varphi_{2S}} (x - \theta_4) \cdot \cos(n \cdot x) dx,$$

$$b_{1n} = \frac{1}{\varphi_S} \int_0^{\theta_1} (\theta_1 - x) \cdot \sin(n \cdot x) dx + \int_{\theta_4}^{\varphi_{2S}} (x - \theta_4) \cdot \sin(n \cdot x) dx.$$

Тут використано наступні позначення:

θ_1, θ_3 – кути повороту кривошипа, що позначають кінець дії пружних елементів; θ_2, θ_4 – кути повороту кривошипа, що позначають початок дії пружних елементів; φ_s – кут повороту кривошипа, що відповідає максимальному відхиленню ножа (кінець робочого ходу); φ_{2s} – кут повороту кривошипа, що відповідає максимальному відхиленню ножа при зворотному ході. Кути φ_s і φ_{2s} для аксіального кривошипно-шатунного механізму дорівнюють, відповідно π та 2π .

Підставивши межі інтегрування та спростивши, матимемо:

$$a_{10} = \frac{1}{\varphi_s} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \theta_1^2 + \frac{1}{2} \cdot \varphi_{2s}^2 - \theta_4 \cdot \varphi_{2s} + \frac{1}{2} \cdot \theta_4^2 \right); \quad (10)$$

$$a_{1n} = \frac{1}{\varphi_s} \left(\frac{-\cos(\theta_1 n) + 1 + \cos(\varphi_{2s} n) + \varphi_{2s} n \sin(\varphi_{2s} n) - \theta_4 \sin(\varphi_{2s} n) n - \cos(\theta_4 n)}{n^2} \right); \quad (11)$$

$$b_{1n} = \frac{1}{\varphi_s} \left[\frac{-(\sin(\theta_1 n) - \theta_1 - \sin(\varphi_{2s} n) + \varphi_{2s} n \cos(\varphi_{2s} n) - \theta_4 \cos(\varphi_{2s} n) n + \sin(\theta_4 n))}{n^2} \right]. \quad (12)$$

Для функції $X_2(x)$:

$$X_2(x) = \frac{a_{20}}{2} + \sum_n (a_{2n} \cos(nx) + b_{2n} \sin(nx)), \quad (13)$$

тут

$$a_{20} = \frac{1}{\varphi_s} \int_{\theta_2}^{\varphi_s} (\theta_2 - x) dx + \int_{\varphi_s}^{\theta_3} (x - \theta_3) dx;$$

$$a_{2n} = \frac{1}{\varphi_s} \int_{\theta_2}^{\varphi_s} (\theta_2 - x) \cdot \cos(n \cdot x) dx + \int_{\varphi_s}^{\theta_3} (x - \theta_3) \cdot \cos(n \cdot x) dx;$$

$$b_{2n} = \frac{1}{\varphi_s} \int_{\theta_2}^{\varphi_s} (\theta_2 - x) \cdot \sin(n \cdot x) dx + \int_{\varphi_s}^{\theta_3} (x - \theta_3) \cdot \sin(n \cdot x) dx.$$

Після підстановки меж інтегрування:

$$a_{20} = \frac{1}{\varphi_s} \cdot \left(\theta_2 \cdot \varphi_s - \varphi_s^2 - \frac{1}{2} \cdot \theta_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \theta_3^2 + \theta_3 \cdot \varphi_s \right); \quad (14)$$

$$a_{2n} = \frac{1}{\varphi_s} \frac{(\theta_2 \sin(\varphi_s n) n - 2 \cos(\varphi_s n) - 2 \varphi_s n \sin(\varphi_s n) + \cos(\theta_2 n) + \cos(\theta_3 n) + \theta_3 \sin(\varphi_s n) n)}{n^2}; \quad (15)$$

$$b_{2n} = \frac{1}{\varphi_s} \left[\frac{-(\theta_2 \cos(\varphi_s n) n + 2 \sin(\varphi_s n) - 2 \varphi_s n \cos(\varphi_s n) - \sin(\theta_2 n) - \sin(\theta_3 n) + \theta_3 \cos(\varphi_s n) n)}{n^2} \right]. \quad (16)$$

Таким чином, представлені залежності дозволять виразити потенціальну енергію, що існує в приводному механізмі косарки.

Наступним етапом дослідження є визначення узагальненої сили Q .

Вираз узагальненої сили запишемо наступним чином:

$$Q = \frac{1}{\varphi} (P_{зр}(\varphi) \mathcal{G}_{S_3} + F(\varphi) \mathcal{G}_{S_3} - G_1 \mathcal{G}_{S_1Y} - G_2 \mathcal{G}_{S_2Y} - G_3 \mathcal{G}_{S_3Y} + M_{np} \varphi), \quad (17)$$

де $P_{зр}(\varphi)$ – сила опору зрізу;

$F(\varphi)$ – сила тертя;

G_1, G_2, G_3 – сили ваги кривошипа, шатуна і ножа;

M_{np} – момент приводу, що підведений до кривошипа;

\mathcal{G}_{S_3} – швидкість ножа коси (центра мас ножа) вздовж осі x , визначається

$$\mathcal{G}_B = \mathcal{G}_{S_3} = -\omega_1 r \frac{\sin(\varphi - \varphi_1)}{\cos \varphi_1}, \quad (18)$$

де ω_1 – кутова швидкість кривошипа; r – радіус кривошипа;

$$\varphi_1 = \arcsin\left(-\frac{h + r \sin \varphi}{l}\right), \quad (19)$$

h – величина дезаксіалу; l – довжина кривошипа;

\mathcal{G}_{S_2Y} – швидкість центра мас шатуна вздовж осі y

$$\mathcal{G}_{S_2Y} = \mathcal{G}_A \sin \alpha_A + \mathcal{G}_{S_2A} \sin \alpha_{S_2A}, \quad (20)$$

де \mathcal{G}_A – лінійна швидкість т. А кривошипа, $\mathcal{G}_A = \omega_1 r$;

\mathcal{G}_{S_2A} – відносна швидкість центра мас S_2 відносно т. А (рис. 1)

$$\mathcal{G}_{S_2A} = |\omega_2| l_{AS_2}, \quad (21)$$

$$\omega_2 = -\frac{\omega_1 r \cos \varphi}{l \cos \varphi_1}; \quad (22)$$

де α_A, α_{S_2A} – направляючі кути векторів швидкостей \mathcal{G}_A та \mathcal{G}_{S_2A} ;

\mathcal{G}_{S_3Y} – швидкість центра мас ножа вздовж осі y , $\mathcal{G}_{S_3Y} = 0$;

\mathcal{G}_{S_1Y} – швидкість центра мас кривошипа вздовж осі y

$$\mathcal{G}_{S_1Y} = \varphi l_{OS_1} \sin \varphi, \quad (23)$$

тут l_{OS_1} – відстань до центру мас S_1 .

Підставляємо записані вирази в рівняння Лагранжа другого роду (1)

$$\begin{aligned} J_{S_{np}}(\varphi) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{J'_{S_{np}}(\varphi)}{2} \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \Pi'(\varphi) = \\ = \frac{1}{\varphi} (P_{зр}(\varphi) \mathcal{G}_{S_3} + F(\varphi) \mathcal{G}_{S_3} - G_1 \mathcal{G}_{S_1Y} - G_2 \mathcal{G}_{S_2Y} + M_{np} \varphi) \end{aligned} \quad (24)$$

Перепишемо рівняння (24) в наступному вигляді:

$$J_{S_{np}}(\varphi) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -\frac{J'_{S_{np}}(\varphi)}{2} \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - \frac{\partial \left(\frac{k_1(X_1(x))^2}{2} + \frac{k_2(X_2(x))^2}{2} \right)}{\partial \varphi} + \quad (25)$$

$$+ \frac{g_{S_3}}{\varphi} (P_{sp}(\varphi) + F(\varphi)) - G_1 \frac{g_{S_1 Y}}{\varphi} - G_2 \frac{g_{S_2 Y}}{\varphi} + M_{np}$$

Отримане рівняння (25) є рівнянням руху змодельованого приводного механізму. Його аналіз показує, що всі величини, які в нього входять є описаними та визначеними, крім параметрів пружних елементів, які введені в систему. Вважаючи, що до вала кривошипа підводиться потужність з постійною кутовою швидкістю $\frac{d\varphi}{dt} = const$, ставимо умову мінімального споживання потужності на привод різального апарату та визначаємо значення регульованих параметрів пружних елементів. До таких параметрів входить визначення зазорів між контактуючою частиною спинки ножа та пружними елементами, а також жорсткості самих пружних елементів.

Висновки. На основі розроблених конструктивних рішень проведено математичне моделювання процесу роботи енергозберігаючого приводного механізму косарки сегментно-пальцевої. Отримана динамічна модель дозволяє забезпечити необхідний діапазон зміни значень регульованих параметрів введених в систему пружних елементів. А також її використання дозволяє напрацювати ряд значень регульованих параметрів пружних елементів щоб забезпечити мінімальне енергоспоживання приводу косарки в конкретних умовах її роботи.

Список літератури

1. Алферов С. А. Динамика зерноуборочного комбайна [Текст] / С. А. Алферов. – М.: «Машиностроение», 1973. – 256 с.
2. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин [Текст] / Е. С. Босой, О. В. Верняев, И. И. Смирнов, Е. Г. Султан-Шах – М.: Машиностроение, 1980. – 565 с.
3. Карпенко В. Д. Скоростная уборка зерновых [Текст] / В. Д. Карпенко и др. – М.: Россельхозиздат, 1976, – 40 с.
4. Листопад Г. Е. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины [Текст] / Г. Е. Листопад, А. Н. Семенов, Т. К. Демидов и др. – М.: Колос, 1976. – 751 с.
5. Бабій А. В. Обґрунтування конструктивних особливостей енергозберігаючого приводного механізму косарки [Текст] / А. В. Бабій, Т. І. Рибак, М. В. Бабій // Вісник Харківського національного технічного

університету сільського господарства. Випуск 134 “Технічний сервіс машин для рослинництва”. – Харків, 2013. – С. 116–122.

6. Пат. 61217 Україна, МПК (2011.01) A01D 34/00. Приводний механізм косарки сегментно-пальцевої / *Бабій А. В.*; заявник та власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № U201015889; заявл. 29.12.2010; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13.

7. Пат. 86536 Україна, МПК A01D 34/30 (2006.01). Привідний механізм косарки / *Бабій А.В., Рибак Т.І., Бабій М.В.*; заявник та власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № U 201303244; заявл. 18.03.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.

Аннотация

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ПРИВОДНОГО МЕХАНИЗМА КОСИЛКИ

Бабий А.В., Бабий М.В.

В работе проведено математическое моделирование энергосберегающего кривошипно-шатунного приводного механизма косилки сегментно-пальцевой. Представлены математические зависимости для дополнительного устройства, которое обеспечивает минимальное энергопотребление косилкой на любых режимах ее работы.

Abstract

DYNAMIC MODEL OF ENERGY-SAVING DRIVE MECHANISM OF MOWER

A. Babiy, M. Babiy

Mathematical modeling of energy-saving crank-rod driving mechanism of segment-finger mower is presented in this paper. Mathematical formulas are presented for additional device which provides the lowest power consumption of mower on any mode of operation.