



УДК 631.316

КІНЕМАТИКА РОТАЦІЙНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ З СИЛОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН ДЛЯ ПЕРЕДПОСІВНОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

Вершков О.О., к.т.н.,

Коломієць С. М., к.т.н.,

Антонова Г.В., інж.

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел.: (0619) 42-24-36, e-mail: kdm_63@mail.ru

Анотація – у статті зроблено аналіз досліджень з кінематики робочих органів ґрунтообробних машин для передпосівного обробітку ґрунту та надані залежності для оптимізації параметрів робочих органів з урахуванням особливостей їхньої кінематики, що забезпечить зростання ефективності машин.

Ключові слова – аналіз, ротаційний робочий орган, кут повороту ротора, середня швидкість руху, схема, ґрунтова стружка, рівняння руху, функція, інтеграл, параметр, кінематика, графік.

Постановка проблеми. В Україні парк ґрунтообробних машин для передпосівного обробітку ґрунту застарілий як фізично, так і морально. Через це не забезпечується необхідна якість обробітку ґрунту і, у кінцевому підсумку, врожайність сільськогосподарських культур. Потрібна модернізація існуючих машин та створення нових зразків на базі наукового обґрунтування параметрів робочих органів з урахуванням особливостей кінематики. Тому, дослідження кінематики робочих органів ґрунтообробних машин для передпосівного обробітку ґрунту є актуальним.

Аналіз останніх досліджень. З аналізу останніх досліджень [2, 3, 5] можна зробити висновок, що необхідно продовжувати дослідження кінематики робочих органів ґрунтообробних машин для передпосівного обробітку ґрунту.

Формулювання цілей статті. Метою публікації є отримання залежності для обґрунтування параметрів робочих органів ґрунтообробних машин для передпосівного обробітку ґрунту з урахуванням особливостей їхньої кінематики, що сприятиме підвищенню ефективності машин.

Основна частина. На прикладі машин з вертикальною віссю обертання розглянемо кінематику і елементи технологічного процесу ротаційного робочого органа з силовим зв'язком.

Для ротаційних робочих органів характерною є одночасна участь у двох рухах: переносний, разом з машиною, що має поступальну швидкість V_n , і відносний, при обертанні навколо осі ротора з коловою швидкістю V_0 . Отже, вектор миттєвої швидкості V точки робочого органа можна представити як суму двох векторів

$$\bar{V} = \bar{V}_n + \bar{V}_0. \quad (1)$$

Оскільки вектори знаходяться у площині обертання, тому модуль абсолютної швидкості дорівнює

$$V_p = \sqrt{V_n^2 + 2V_n \cdot V_0 \cdot \cos(\bar{V}_n \cdot \bar{V}_0) + V_0^2}. \quad (2)$$

Виберемо осі координат у площині обертання робочого органа наступним чином: початок координат сумістимо з віссю ротора, вісь X спрямуємо у напрямку поступального руху машин, а вісь Y спрямуємо так, щоб напрямок обертання її додатного кінця до осі X співпадав з напрямком обертання ротора. При цьому рівняння руху кінцевих точок робочого органа мають вигляд

$$\begin{cases} X = V_n t + R \sin \varphi \\ Y = R \cos \varphi \end{cases}, \quad (3)$$

де R – радіус ротора;

φ – поточний кут повороту ротора.

Траєкторія руху являє собою плоску криву – подовжену циклоїду, тому що

$$\frac{V_0}{V_n} = \lambda > 1. \quad (4)$$

Модуль абсолютної швидкості складає

$$V_p = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{V_n^2 + 2V_n \cdot V_0 \cos \varphi + V_0^2}. \quad (5)$$

Обрана система характеризується тим, що

$$\cos(\bar{V}_n \bar{V}_0) = \cos \varphi = \cos \omega t. \quad (6)$$

З урахуванням виразів (4) і (6) рівняння (5) прийме вигляд

$$V_p = V_n \sqrt{1 + 2\lambda \cos \omega t + \lambda^2}. \quad (7)$$

Отже, модуль абсолютної швидкості є змінною величиною, що залежить від кута повороту ротора. На рис. 1 представлена схема до вивода рівняння руху робочого органа, ділянка траєкторії AB' являє собою зону відрізання ґрунтової стружки.

На рис. 2 представлено графік зміни абсолютної швидкості для вертикального розташування роторів.

Як видно з графіка, у вертикального робочого органа зона різання перевищує половину оберту ротора, а швидкість V_p за цикл різання проходить через максимум і мінімум.

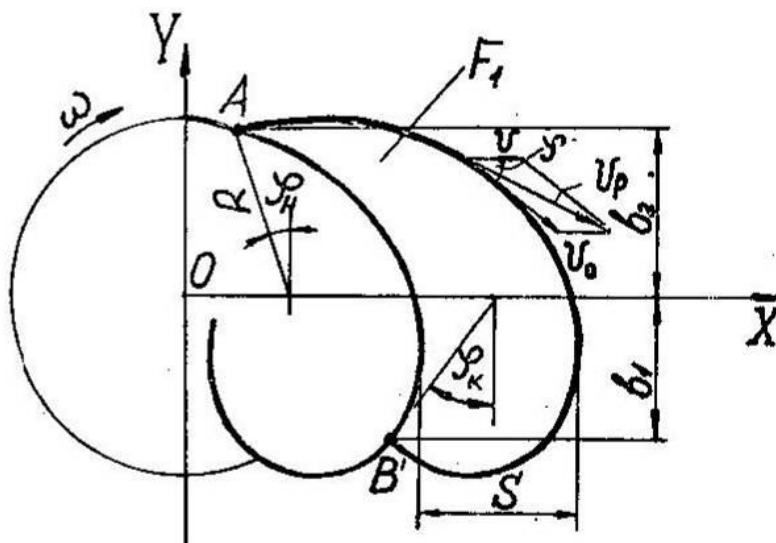


Рис. 1. Схема до рівняння руху вертикального ротаційного робочого органа.

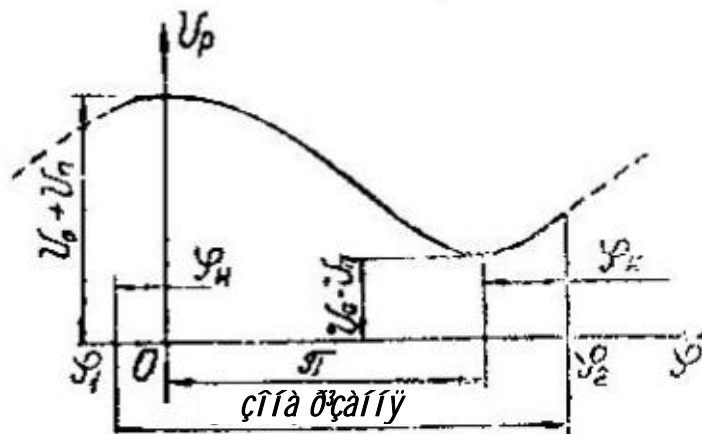


Рис. 2. Залежність швидкості різання V_p робочого органа фрези від кута повороту ротора φ (вертикальна вісь обертання).

В теорії ротаційних ґрунтообробних машин для визначення технологічних характеристик і конструктивних параметрів використовується поняття середньої швидкості різання. Узв'язку з тим, що величина швидкості різання змінна у функції кута повороту робочого органа, визначимо середнє значення швидкості різання. За визначенням середнього значення функції [1] маємо

$$V_p = V_n \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{\lambda^2 + 1 + 2\lambda \cos \varphi} d\varphi, \quad (8)$$

де φ_1 і φ_2 – поточні кути повороту ротора, що визначають початок і кінець процесу.

Головна відмінність машин з вертикальною віссю обертання від горизонтальних фрез полягає у тому, що величина кута повороту ро-

тора, яка відповідає циклу різання, не залежить від технологічного параметра – глибини обробітку і може бути представлена сумою трьох кутів (рис. 1).

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_n + \varphi_k + \pi, \tag{9}$$

де φ_n – кут між перпендикуляром до напрямку руху і початковим положенням кінця робочого органа;

φ_k – кут між перпендикуляром до напрямку руху і кінцевим положенням кінця робочого органа.

$$\varphi_n = \frac{\pi}{Z(\lambda + 1)}; \quad \varphi_k = \frac{\pi}{Z(\lambda - 1)}, \tag{10}$$

де Z – кількість робочих органів на роторі.

Після підстановки значень φ_1 і φ_2 у рівняння (8) маємо

$$V_p = V_n \frac{\int_0^{\varphi_n} \sqrt{\lambda^2 + 1 + 2\lambda \cos \varphi} d\varphi + \int_0^{\pi} \sqrt{\lambda^2 + 1 + 2\lambda \cos \varphi} d\varphi}{\varphi_n + \pi + \varphi_k} + \frac{\int_0^{\varphi_k} \sqrt{\lambda^2 + 1 + 2\lambda \cos \varphi} d\varphi}{\varphi_n + \pi + \varphi_k}. \tag{11}$$

Так як інтеграли у формулі (11) не можна виразити через елементарні функції [3], перетворимо її у формулу, що містить еліптичний інтеграл другого роду

$$V_p = 2V_n (\lambda + 1) \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2Z(\lambda+1)}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi}{\frac{\pi}{Z(\lambda + 1)} + \pi + \frac{\pi}{Z(\lambda - 1)}} + \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2Z(\lambda-1)}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi}{\frac{\pi}{Z(\lambda + 1)} + \pi + \frac{\pi}{Z(\lambda - 1)}}, \tag{12}$$

де $k \neq \frac{2\sqrt{\lambda}}{1 + \lambda}$.

Цей інтеграл обраховується за допомогою таблиць [4].

Щоб уникнути визначення інтегралів за таблицями запропонована наступна формула для визначення середньої швидкості різання ротаційних робочих органів [3]

$$V_p = V_n \sqrt{1 + \lambda^2}. \tag{13}$$

Далі наведемо вивід більш точної формули для визначення середньої швидкості різання, заснований на розкладі підінтегрального виразу формули (12) у біноміальний ряд.

Як зазначалось раніше, для ротаційних машин $\lambda > 1$, отже додержується нерівність, що забезпечує сходимість ряду

$$|K^2 \sin^2 \varphi| < 1.$$

Загальна формула розкладу підінтегрального виразу формули (12), з урахуванням перших трьох членів, має вид

$$\sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi} = 1 - \frac{1}{2} K^2 \sin^2 \varphi - \frac{1}{8} K^4 \sin^4 \varphi. \quad (14)$$

Отже

$$\int \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi} d\varphi = \int d\varphi - \frac{1}{2} K^2 \int \sin^2 \varphi d\varphi - \frac{1}{8} K^4 \int \sin^4 \varphi d\varphi.$$

Використовуючи таблиці інтегралів [4], маємо

$$\int \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi} d\varphi = \varphi - \frac{1}{2} K^2 \left(\frac{1}{2} \varphi - \frac{1}{4} \sin 2\varphi \right) - \frac{1}{8} K^4 \left(\frac{3}{8} \varphi - \frac{\sin 2\varphi}{4} + \frac{\sin 4\varphi}{32} \right). \quad (15)$$

Розрахунки, виконані за формулою (15), показують, що при $\lambda \geq 3$ похибка не перевищує 1%. Для практичних розрахунків достатньо обмежитися двома членами розкладу, похибка при цьому не перевищує 2%.

$$\int \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \varphi} d\varphi = \varphi - \frac{1}{4} K^2 \varphi = \varphi \left[1 - \frac{\lambda}{(\lambda + 1)^2} \right]. \quad (16)$$

Після підстановки виразу (16) у формулу (12) і перетворень

$$V_p = V_n (\lambda + 1) \left[1 - \frac{\lambda}{(\lambda + 1)^2} \right].$$

Остаточно

$$V_p = \lambda V_n \left[1 + \frac{\lambda}{\lambda(\lambda + 1)} \right]. \quad (17)$$

Отримана формула (17) дозволяє найбільш точно визначити швидкість різання вертикально-роторних робочих органів.

Ширина захвату ротора B. Згідно рис. 1 та з урахуванням огріху, можна представити виразом

$$B = b_1 + b_2 = R \cos \varphi_n + R \cos \varphi_k. \quad (18)$$

Після перетворень рівняння (18) отримуємо

$$B = 2R \cos \frac{\pi}{Z(\lambda^2 - 1)} \cdot \cos \frac{\pi \lambda}{Z(\lambda^2 - 1)}. \quad (19)$$

Довжина шляху різання стружки. Для вертикально-роторних робочих органів довжина шляху різання являє собою довжину відрізка циклоїди між точками перетину двох сусідніх траєкторій на початку і в кінці різання.

Довжина шляху різання ножом визначається за виразом [5]

$$L = R \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{\lambda^2 + 1 + 2\lambda \cos \varphi} d\varphi. \quad (20)$$

Інтеграл у формулі (20) не можна виразити через елементарні функції; якщо ж розкласти підінтегральну функцію у ряд Тейлора, то при підстановці границь, характерних для вертикально-роторних ма-

шин, указаний ряд розходиться, що унеможливорює отримання наближеного значення інтеграла.

У роботі [3] наведена наступна формула для визначення довжини шляху різання вертикальним ножом

$$L = \frac{4R}{\lambda} \left[2 \sin^2 \left(\frac{180^\circ + \alpha}{4} \right) - 1 \right] + \left(R - \frac{R}{\lambda} \right) \cdot 0.95\lambda, \quad (21)$$

де $\alpha = \varphi_2 - \varphi_1$.

Простіше визначити довжину шляху різання за такою формулою

$$L = V_p \cdot t, \quad (22)$$

де $t = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\omega}$ - час циклу різання.

Підставимо у формулу (22) значення середньої швидкості різання (17) та після перетворень маємо

$$L = \pi R \left[1 + \frac{1}{\lambda(\lambda + 1)} \right] \cdot \left[1 + \frac{2\lambda}{Z(\lambda^2 - 1)} \right]. \quad (23)$$

Розрахунки показали, що запропонована формула (23) дозволяє найбільш точно визначити довжину шляху різання робочого органа вертикально-роторної машини.

Товщина стружки. Робочі органи вертикально-фрезерних машин відрізають ґрунтову стружку у горизонтальній площині. Вимірювання товщини стружки по нормалі до зовнішньої циклоїди (рис. 3, відрізок 2) дає негативний результат.

На рис. 3 товщина стружки при положенні ножа у т.Д ($x_2; y_2$) представлена відрізком СД. При координатах т.С ($x_1; y_1$) і куті повороту ножа φ_2 товщину стружки можна визначити з наступної залежності

$$CD = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (24)$$

Для визначення координат точки С складемо систему рівнянь

$$\begin{cases} X_1 = \frac{R}{\lambda} \varphi_1 + R \cos \varphi_1 \\ X_2 = \frac{2\pi R}{\lambda Z} + \frac{R}{\lambda} \varphi_2 + R \cos \varphi_2 \\ Y_1 = R \sin \varphi_1 \\ Y_2 = R \sin \varphi_2 \\ \operatorname{tg} \theta = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\lambda \sin \varphi_1 - 1}{\lambda \cos \varphi_1} \end{cases}, \quad (25)$$

де θ – кут нахилу нормалі до осі абсцис.

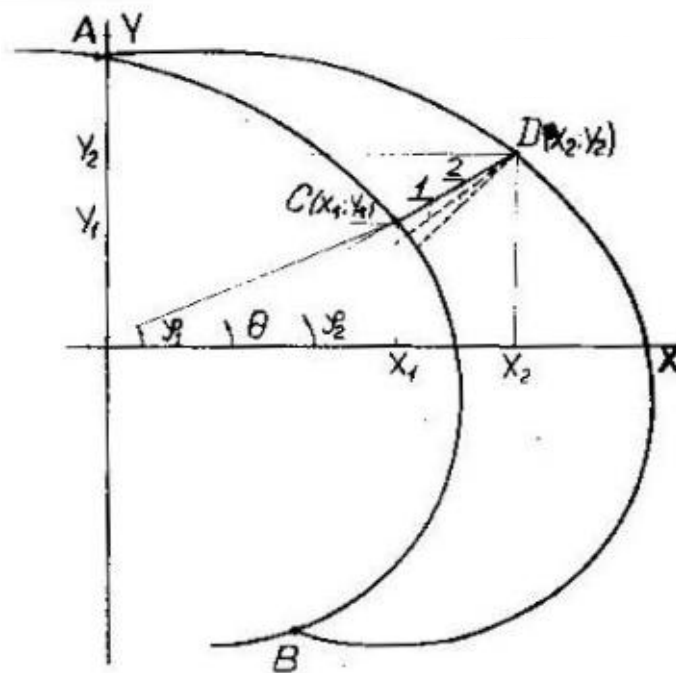


Рис. 3. Схема до визначення товщини стружки δ , яка відрізається вертикальним фрезерним ножом.

Отже

$$\frac{\lambda \sin \varphi_1 - 1}{\lambda \cos \varphi_1} = \frac{\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1}{\frac{2\pi}{\lambda Z} + \frac{1}{\lambda} \varphi_2 + \cos \varphi_2 - \frac{1}{\lambda} \varphi_1 - \cos \varphi_1}. \quad (26)$$

Для визначення миттєвого значення товщини стружки треба по рівнянню (26) визначити кут φ , потім по рівнянням (25) – координати точок С і Д, а шукану товщину стружки δ – по рівнянню (24).

Але рівняння (26) є трансцендентним, тому простіше визначити δ графічним способом.

Для цього будують залежності $\delta = f(\varphi)$ та $\varphi = f(\lambda)$.

Досить часто у розрахунках використовують середню товщину стружки $\delta_{\text{сеп}}$

$$\delta_{\text{сеп}} = \frac{F}{L'}, \quad (27)$$

де F – площа стружки;

L' – довжина ділянки внутрішньої циклоїди АСВ (рис. 3).

Площа стружки F складає

$$F = F_1 + F_2, \quad (28)$$

де F_1 – площа стружки в межах ширини захвату В (рис. 1);

$$F_1 = B \cdot S, \quad (29)$$

S – зміщення робочого органа;

F_2 – площа стружки в межах В [6]

$$F_2 = \frac{2}{3}(2R - B)S. \quad (30)$$

Після перетворень, з урахуванням (19), маємо

$$F = \frac{2}{3}SR \left[2 + \cos \frac{\pi}{Z(\lambda^2 - 1)} \cdot \cos \frac{\pi\lambda}{Z(\lambda^2 - 1)} \right] \quad (31)$$

або

$$F = K'_2 \cdot S \cdot D, \quad (32)$$

де $D = 2R$ – діаметр ротора.

У залежності $K'_2 = f(\lambda)$ впливає, що при $\lambda > 6..7$ величиною K'_2 можна знехтувати.

Довжина відрізка L' також, як і L , визначається за таблицями еліптичних інтегралів другого роду або за наближеною формулою, отриманою при розкладі підінтегральної функції у біноміальний ряд

$$L' = R \left\{ \pi \left[1 - \frac{2\lambda}{Z(\lambda^2 - 1)} \right] \left[1 + \frac{1}{\lambda(\lambda + 1)} \right] + \frac{2}{\lambda + 1} \cos \frac{\pi\alpha}{Z(\lambda^2 - 1)} \sin \frac{\pi}{Z(\lambda^2 - 1)} \right\}. \quad (33)$$

Отже

$$\delta_{сеп} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2 + \cos \frac{\pi\alpha}{Z(\lambda^2 - 1)} \cdot \cos \frac{\pi}{Z(\lambda^2 - 1)}}{\pi \left[1 - \frac{2\lambda}{Z(\lambda^2 - 1)} \right] \left[1 + \frac{1}{\lambda(\lambda + 1)} \right] + \frac{2}{\lambda + 1} \cdot \cos \frac{\pi\lambda}{Z(\lambda^2 - 1)} \cdot \sin \frac{\pi}{Z(\lambda^2 - 1)}} S = K_1 S. \quad (34)$$

Для зручності визначення K_1 будують графік $K_1 = f(\lambda)$.

Об'єм стружки $V_{стр}$ визначають за формулою

$$V_{стр} = F \cdot H = K'_2 \cdot S \cdot D \cdot H, \quad (35)$$

де H – глибина обробітку.

Висновки. Наведені залежності забезпечать якісні визначення силових параметрів та обґрунтування деяких параметрів як вертикально-роторних машин, так і машин, що мають горизонтальну вісь обертання, що з урахуванням особливостей кінематики машин підвищить їх ефективність.

Література

- 1 *Бронштейн И.П.* Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ / *И.П. Бронштейн, К.А. Семендяев.* - М.: ГИТЛ, 1957. - 608 с.
- 2 *Канев Н.Ф.* Механика почвообрабатывающей фрезы / *Н.Ф. Канев.* - М.: ВНИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства, 1957. - 217 с.

3 Любимов Ф.С. Обоснование параметров рабочих органов пропашного фрезерного культиватора – глубокорыхлителя: автореф. дис. канд. техн. наук / Ф.С. Любимов. - М., 1971. - 33 с.

4 Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений.- 4-е изд. / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. - М.: Физматгиз, 1963.- 110 с.

5 Ротационные почвообрабатывающие машины / Е.П. Яцук, И.М. Панов, Д.Н. Ефимов и др. –М.: Машиностроение, 1971.- 256 с.

6 Марченко О.С. Кинематика и элементы процесса фрезерования почвы вертикально-ротационными рабочими органами / О.С. Марченко, В.В. Бычков // Науч.-техн.бюл.ВИМ.-1980.-вып.43.- С. 9-15.

КИНЕМАТИКА РОТАЦИОННЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ С СИЛОВОЙ СВЯЗЬЮ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ДЛЯ ПРЕПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

А.А.Вершков, С.М.Коломиец, Г.В.Антонова

Аннотация - в статье сделан анализ исследований кинематики рабочих органов почвообрабатывающих машин для предпосевной обработки почвы и приведены зависимости для оптимизации параметров рабочих органов с учетом особенностей их кинематики, что обеспечит повышение эффективности машин.

KINEMATIK OF ROTARY WORKINGS ORGANS WITH POWER CONNECTION OF MACHINES FOR TREATMENT OF SOIL FOR PRESEED TREATMENT OF SOIL

O. Vershkov, S. Kolomiyets, G. Antonova

Summary

In the article the analysis of researches of kinematics of workings organs of machines for treatment of soil is done for preseed treatment of soil and dependences are resulted for optimization of parameters of workings organs, taking into account the features of their kinematics, that will provide the increase of efficiency of machines.