УДК 631.3-52

ЩОДО ПИТАННЯ ТОЧНОСТІСЛІДКУВАННЯ ПРИ АВТОВОДІННІ АГРЕГАТУ З НАВІСНИМ ЗНАРЯДДЯМ

Поляшенко С.О., к.т.н., доц., Єсіпов О.В., к.т.н. доц., Манойло В.М., к.т.н. доц.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

Отримані диференціальні рівняння руху сільськогосподарської машини з робочими органами навісного знаряддя в автоматичному режимі слідкування. Визначена і проаналізована похибка слідкування агрегатом рядків, яка враховує мінімальні втрати рослин, при вибраному алгоритмі роботи з урахуванням параметрів агрегату.

Вступ. Головний показник якості роботи МТА – величина пошкодження рослин робочими органами. Причинами пошкодження рослин є поперечні зміщення робочих органів, які залежать від стійкості руху ширококолійного агрозасобу, яка є результатом впливу багатьох факторів: нерівномірності опору ґрунту, типу рушія і його моменту опору повороту, швидкості руху, діючих сил та ін. Через те, що їх ширина колії в декілька разів перевищує колісну базу, то курсове кутове і поперечне відхилення призводить до суттєвих зміщень робочих органів, особливо крайніх, що впливає на пошкодження рослин у рядку. Також причиною пошкодження рослин є певна розбіжність траєкторії сформованої постійної технологічної колії і робочих органів ширококолійних агрозасобів в площині поля.

Метою досліджень є побудова математичної моделі поперечних зміщень робочих органів МТА, яка дозволить обґрунтувати деякі його конструктивні і кінематичні параметри, а також величину захисної зони, виходячи за умов відсутності пошкодження рослин.

Для дослідження досить представляти, що агрегат знаходиться в нерухомій системі координат XOY (рис. 1), де A і B - точки перетину задньої і передньої осей трактора з його поздовжньою віссю AB; S - точка перетину осі робочих органів навісного знаряддя з віссю SB; відрізок PC - копіюючий пристрій автомата водіння, може повертатися щодо точки C. При цьому кінець копіюючого пристрою P постійно знаходиться на рядку $y = f(x)$.

Таким чином, вхідним є кут φ. Тоді завдання автомата водіння агрегату полягає у формуванні кута повороту керованих коліс $\alpha(t)$ по $\varphi(t)$ таким чином, щоб відхилення робочих органів від рядка було якомога менше.

Рядок являє собою досить гладку і плавну криву [1]. Наприклад, рядок буряків можна уявити, як суму великих, середніх і малих гармонік [2] виду

$$y = B\cos(Ax + \xi). \qquad (1)$$

Малі гармоніки амплітудою до 0,06 м і частотою від $\frac{2\pi}{12}$ до $\frac{2\pi}{4}$ згладжуються автоматом. Частота великих і середніх гармонік відповідно від $\frac{2\pi}{250}$ до $\frac{2\pi}{100}$ і від $\frac{2\pi}{30}$ до $\frac{2\pi}{17}$, а амплітуда не перевищує відповідно 1,0 і 0,1 м [1]. Реальний рух агрегату вздовж такого рядка носить плавний характер, при цьому кути α, φ, γ є малими величинами [2] і ними можна знехтувати.

Рівняння руху агрегату отримаємо при наступних припущеннях кінематичного характеру:

– для коліс не характерні бічне ковзання і уведення, так що швидкість $\vec{V}_A$ спрямована по осі агрегату AB, а швидкість $\vec{V}_B$ - під кутом α до цієї осі;

– модуль швидкості точки A постійний і дорівнює V.

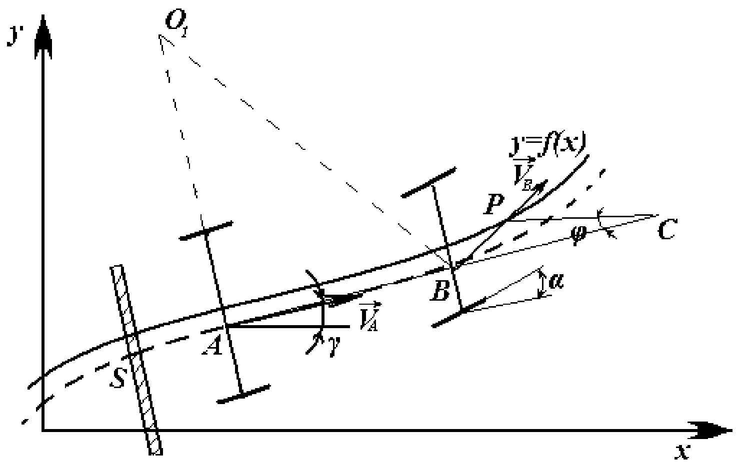

Рис. 1 –Схема руху агрегату з навісним знаряддям

Виходячи зі сказаного можна вважати, що в автоматі водіння реалізований алгоритм виду

$$\alpha = -k\varphi \text{ при } k > 0, \tag{2}$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

Отримуємо перші два рівняння руху агрегату:

$$\begin{cases} \dot{x}_A = V, \\ y_A = V_\gamma. \end{cases} \tag{3}$$

За визначенням кривизни траєкторії точки A маємо

$$\frac{d\gamma}{ds} = \frac{1}{R},$$

де R – радіус кривизни;

$$ds = Vt.$$

Визначаючи R з трикутника AOB і підставляючи R і ds в останнє рівняння, отримуємо ще одне рівняння руху

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{L_B}\alpha \,, \tag{4}$$

де L_B – відстань між точками A і B.

Координати необхідних точок S і P встановлюються таким чином:

$$x_s = x_A - L_s\,; \; y_s = y_A - L_s\gamma\,; \tag{5}$$

$$x_\rho = x_A + L\,; \; y_\rho = y_A + L_c\gamma - l\varphi\,, \tag{6}$$

де L_s – відстань між точками A і S;

L_c – відстань між точками A і C;

l – довжина відрізка PC;

$$L = L_c - l$$

Для зручності подальших досліджень перейдемо від диференціальних рівнянь (3) і (4) до диференціальних рівнянь 2-го порядку

$$\ddot{y}_A = \frac{V^2}{L_B}\alpha\,.$$

Виразивши φ через координату y_A і функцію рядка $f(x)$ з урахуванням алгоритму (2), після інтегрування першого рівняння системи (3) маємо

$$x_\rho(t) = Vt + L\,. \tag{7}$$

Так як точка P знаходиться на рядку, то

$$y_\rho = f(x_\rho)\,. \tag{8}$$

Тоді з виразів (6) з урахуванням формули (7) отримуємо

$$\varphi = \frac{1}{l}y_A + \frac{L}{l}\gamma - \frac{1}{l}f(Vt + L)\,.$$

Знаходячи з рівняння (3)

$$\gamma = \frac{\dot{y}_A}{V}\,, \tag{9}$$

підставляємо цей вираз в отримане рівняння

$$\varphi = \frac{1}{l}y_A + \frac{L}{Vl}\dot{y}_A - \frac{1}{l}f(Vt + L)\,. \tag{10}$$

З урахуванням формул (2) і (9) отримуємо наступне диференціальне рівняння замкнутої системи:

$$\ddot{y}_A + \frac{VkL}{lL_B}\dot{y}_A + \frac{V^2k}{lL_B}y_A = \frac{V^2k}{lL_B}f(Vt+L). \qquad (11)$$

Необхідно оцінити похибку слідкування

$$\delta(t) = y_s(t) - f(x_s(t)). \qquad (12)$$

З урахуванням рівнянь (3) і (5)

$$x_s = Vt - L_s. \qquad (13)$$

Запишемо y_s через y_A та $\dot{y}_A$:

$$y_s = y_A - \frac{L_s}{V}\dot{y}_A. \qquad (14)$$

Тоді похибка слідкування $\delta(t)$ з урахуванням останніх формул приймає такий вигляд:

$$\delta(t) = y_A(t) - \frac{L_s}{V}\dot{y}_A - f(Vt+L_s), \qquad (15)$$

де $y_A(t)$ визначається з рівняння (11).

$$y_A(t) = c_1 l^{\lambda_1 t} + c_2^{\lambda_2 t} + \tilde{y}_A(t), \qquad (16)$$

де c_1, c_2 – довільні сталі;
λ_1, λ_2 – корінь відповідного характеристичного рівняння.

$$\lambda^2 + \frac{VkL}{lL_B}\lambda + \frac{V^2k}{lL_B} = 0. \qquad (17)$$

Звідси

$$\lambda_{1,2} = \frac{VkL}{2lL_B}\left(-1 \pm \sqrt{1 - \frac{4lL_B}{kL^2}}\right). \qquad (18)$$

Неважко бачити, що коріння λ_1 і λ_2 речові і негативні. Тому експоненціального виду складові в рішенні рівняння (16) швидко згасають, і при знаходженні похибки слідкування (15) будемо замінювати загальне $y_A(t)$ на приватне рішення $\tilde{y}_A(t)$.

Для оцінки $\delta(t)$ розширимо клас модельних кривих, використовуючи крім гармоніки (1) параболу

$$y = Ax^2. \qquad (19)$$

Тоді диференціальне рівняння (11) приймає наступний вигляд:

$$\ddot{y}_A + \frac{VkL}{lL_B}\dot{y}_A + \frac{V^2}{lL_B}y_A = \frac{V^2k}{lL_B}A(Vt+L)^2. \qquad (20)$$

Приватне рішення такого рівняння:

$$\tilde{y}_A(t) = Mt^2 + Nt + R, \qquad (21)$$

де M і N – сталі коефіцієнти.

Після підстановки отримуємо

$$2M+\frac{VkL}{lL_B}(2Mt+N)+\frac{V^2k}{lL_B}(Mt^2+Nt+R)=\frac{V^2k}{lL_B}A(Vt+L)^2.$$

Прирівнявши коефіцієнти при однакових ступенях t, виводимо систему з невідомими M, N, R:

$$\begin{cases}2M+\frac{VkL}{lL_B}N+\frac{V^2k}{lL_B}R=\frac{V^2k}{lL_B}AL^2,\\ 2ML+VN=2AV^2L,\\ M=AV^2.\end{cases} \tag{22}$$

Звідси

$$M=AV^2,\ N=0,\ R=AL^2-2A\frac{lL_B}{k}. \tag{23}$$

тоді

$$\delta(t)=AV^2t^2+AL^2-2A\frac{lL_B}{k}-\frac{L_s}{V}2AV^2t-A(Vt-L_s)^2,$$

звідки після нескладних перетворень маємо

$$\delta(t)=A\left(L^2-L_s^2-\frac{2lL_B}{k}\right). \tag{24}$$

З отриманого виразу видно, що в разі

$$k=\frac{2lL_B}{L^2-L_B^2}, \tag{25}$$

похибка слідкування за формулою (19) дорівнює нулю.

Тепер використовуємо в якості відслідковуємої кривої гармоніки (1). Диференціальне рівняння (11) приймає вигляд

$$\ddot{y}_A+\frac{VkL}{lL_B}\dot{y}_A+\frac{V^2k}{lL_B}y_A=\frac{V^2k}{lL_B}\cos(AVt+AL+\xi). \tag{26}$$

Приватне рішення такого рівняння:

$$\tilde{y}_A(t)=N\cos(AVt+AL+\xi)+M\sin(AVt+AL+\xi). \tag{27}$$

Для знаходження коефіцієнтів M і N отримаємо співвідношення у вигляді

$$\alpha\cos(AVt+AL+\xi)+b\sin(AVt+AL+\xi)=0, \tag{28}$$

де

$$\alpha=-NA^2+M\frac{kL}{lL_B}A+\frac{k}{lL_B}N-\frac{k}{lL_B}B; \tag{29}$$

$$b = -MA^2 - N\frac{kL}{lL_B}A + \frac{k}{lL_B}M\ . \qquad (30)$$

Так як рівняння (28) справедливо при всіх t, з нього випливає, що, $\alpha = b = 0$. Отримуємо систему рівнянь з невідомими M , N :

$$\begin{cases} N\left(1 - \dfrac{A^2 lL_B}{k}\right) + MLA = B, \\ -NLA + M\left(1 - \dfrac{A^2 lL_B}{k}\right) = 0. \end{cases} \qquad (31)$$

Визначник цієї системи відмінний від нуля:

$$\Delta = \left(1 - \frac{A^2 lL_B}{k}\right)^2 + L^2A^2\ . \qquad (32)$$

Тому система має єдине рішення:

$$N = B\frac{\dfrac{1 - A^2 lL_B}{k}}{\Delta},\ \ M = B\frac{LA}{\Delta}. \qquad (33)$$

Знаходимо похибку слідкування:

$$\delta(t) = B\left[\left(\frac{\dfrac{1 - A^2 lL_B}{k} - LL_sA^2}{\Delta}\right)\cos(AVt + AL + \xi) + \right.$$
$$\left. + \left(\frac{\dfrac{A(L+L_s) - A^2 lL_B L_s}{k}}{\Delta}\right)\sin(AVt + AL + \xi) - \cos(AVt - AL_s + \xi)\right]. \qquad (34)$$

Уявимо

$$cos(\,AVt - AL_s + \xi\,) = cos(\,AVt + AL + \xi\,)cos(\,A(\,L + L_s\,)) +$$
$$+ sin(\,AVt + AL + \xi\,)sin(\,A(\,L + L_s\,)).$$

Після підстановки отримуємо

$$\delta(t) = \frac{B}{\Delta}\left\{\left[1 - \frac{A^2 lL_B}{k} - LL_sA^2 - \Delta\cos(A(L+L_s))\right]\cos(AVt + AL + \xi) + \right.$$
$$\left. + \left[A\left(L + L_s - \frac{A^2 L_B L_s}{k}\right) - \Delta\sin(A(L+L_s))\right]\sin(AVt + AL + \xi)\right\} \qquad (35)$$

Обчислимо наближено вираз в першій квадратній дужки рівняння (35). З урахуванням формули (32)

$$1 - \frac{AlL_B}{k} - LL_sA^2 - \Delta\,cos(\,A(\,L + L_s\,)) = 1 - \frac{A^2 lL_B}{k} - LL_sA^2 -$$
$$-\left(1 + A^2\left(L^2 - \frac{2lL_B}{k}\right) + A^4\left(\frac{lL_B}{k}\right)^2\right)\left(1 - \frac{A^2(\,L + L_s\,)^2}{2!} + 0(\,A^4\,)\right)$$

де $D(A^4)$ – мала величина порядку A^4.

Після нескладних перетворень одержуємо

$$1-\frac{A^2 lL_B}{k}-LL_s A^2-\Delta\cos(A(L+L_s))=A^2\left[\frac{lL_B}{k}+\frac{L_s^2-L^2}{2}\right]+0(A^4). \qquad (36)$$

Обчислимо вираз у другій квадратній дужки рівняння (35). З урахуванням формули (32)

$$A\left(L+L_s-\frac{A^2 lL_B L_s}{k}\right)-\Delta\sin(A(L+L_s))=A\left(L+L_s-\frac{A^2 lL_B L_s}{k}\right)-$$
$$-\left(1+A^2\left(L^2-\frac{2lL_B}{k}\right)+A^4\left(\frac{lL_B}{k}\right)^2\right)(A(L+L_s))-\frac{A3(L+L_s)^3}{3!}+0(A^5).$$

Перетворюючи вираз, одержуємо

$$\begin{aligned}&1-\frac{A^2 lL_B}{k}-LL_s A^2-\Delta\sin(A(L+L_s))=\\&=A^3\left[-\frac{lL_B L_s}{k}-(L+L_s)\left(L^2-\frac{2lL_B}{k}\right)+\frac{(L+L_s)^3}{6}\right]+0(A^5)\end{aligned} \qquad (37)$$

Тоді

$$\begin{aligned}\delta(t)&=\frac{BA^2}{\Delta}\left[\frac{lL_B}{k}+\frac{L_s^2-L^2}{2}+0(A^2)\right]\cos(AVt+AL+\xi)+\\&+A\left[-\frac{lL_B L_s}{k}-(L+L_s)\left(L^2-\frac{2lL_B}{k}\right)+\frac{(L+L_s)^3}{6}+0(A^2)\right]\cdot\\&\cdot\sin(AVt+AL+\xi)\end{aligned} \qquad (38)$$

Обчислити амплітудне значення похибки $\delta(t)$

$$\varepsilon=\frac{BA^2}{\Delta}\sqrt{\left[\frac{lL_B}{k}+\frac{L_s^2-L^2}{2}+0(A^2)\right]+A^2\left[-\frac{lL_B L_s}{k}-(L+L_s)\left(L^2-\frac{2lL_B}{k}\right)+\frac{(L+L_s)^3}{6}+0(A^2)\right]} \qquad (39)$$

Неважко бачити, що при виборі k відповідно за формулою (25) похибка стає малою величиною:

$$\varepsilon=\frac{BA^3(L+L_s^2)(L-2L_s(1+0(A^2))}{\Delta}.$$

Відкидаючи малі величини порядку A^5, з урахуванням формули (32) отримуємо

$$\varepsilon=\frac{BA^3(L+L_s)^2(L-2L_s)}{6}. \qquad (40)$$

Припускаючи малий кут γ, можна вважати, що похибка слідкування агрегатом рядків практично така ж, що і похибка слідкування точкою S кривої $y=f(x)$.

Так, помилка слідкування при виборі коефіцієнта k після закінчення деякого часу не перевищує малої величини ε.

Список використаних джерел

1. Кузьминов В.Г., Лепа А.С., Кашурко А.С. Состояние и перспективы развития автоматизации вождения тракторов и сельскохозяйственных машин. – Киев: УкрНИИНТИ, 1974. – С. 289–355.
2. Давиденко П.П. Влияние задней и передней навесных машин на тягово-сцепные свойства и управляемость свекловодческого трактора. Обоснование параметров их соединения: автореф. дис…. канд. техн. наук.- М., 1985.
3. Есипов А.В., Поляшенко С.А. Точность движения МТА при междурядной обработке посевов сахарной свеклы// Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства //Зб. наук. пр. Вип. 15 - Харків, ХДТУСГ. – 2002.
4. Кашурко А.С., Синяков В.А. Точность слежения при автовож-дении агрегата с навесным орудием / Сб. науч. тр. / УкрНИИСХОМ.-М.; ВИСХОМ,1988. -93с.
5. Поляшенко С.А., Есипов А.В. Взаимодействие копирующего устройства тракторного агрегата с почвой и усилителем автоматиче-ского управления// Тракторная энергетика в растениеводстве // Сб. науч. тр. Вып.6 - Харьков, ХГТУСХ, 2003.
6. Поляшенко С.А., Есипов А.В. Устойчивость движения копирующего устройства машинно-тракторного агрегата с системой автоматического управления//Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства //Зб. наук. пр. Вип. 29 - Харків, ХДТУСГ. – 2004.
7. Поляшенко С.О., Антипенко А.М., Калінін Є.І., Поляшенко В.С. Прямолінійність руху комбінованого сільськогосподарського агрегату // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства //Зб. наук. пр. Вип. 41 - Харків, ХДТУСГ – 2005.

Аннотация

К ВОПРОСУ ТОЧНОСТИ СЛЕЖЕНИЯ ПРИ АВТОВОЖДЕНИИ АГРЕГАТА С НАВЕСНЫМ ОРУДИЕМ

Поляшенко С.А., Есипов А.В., Манойло В.М.

Полученыдифференциальные уравнения движения сельскохозяйственной машины с рабочими органами навесного орудия в автоматическом режиме слежения. Определена и проанализирована ошибка слежения агрегатом рядков, которая учитывает минимальные потери растений, при выбранном алгоритме работы с учетом параметрова грегата.

Abstract

ON THE ISSUE OF TRACKING ACCURACY WHEN THE VEHICLE IS DRIVEN BY A UNIT WITH A MOUNTED IMPLEMENT

S. Polyashenko, A. Iesipov, V. Manoylo

The differential equations of the movement of the agricultural machine with the working bodies of the mounted implement are obtained in the automatic tracking mode. The tracking error by the aggregate of rows was determined and analyzed, which takes into account the minimal loss of plants, with the selected operation algorithm taking into account the parameters of the aggregate.