

ДОСЛІДЖЕННЯ МАНЕВРІВ ҐРУНТООБРОБНОГО АГРЕГАТУ В ФУНКЦІЇ ЧАСУ

Гецович Євгеній Мойсейович

доктор технічних наук, професор
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-4868-1573
e-mail: getchovich-e@ukr.net

Трактори виконуючи роботи на сільськогосподарських угіддях і транспортні операції рухаються по прямолінійній або криволінійній траєкторіях, кривизна якої весь час змінюється. В статті були отримані рівняння для траєкторії нелінійного руху ґрунтообробного агрегату у функції кута повороту корпусу, а також рівняння руху по колу. Використовуючи ці рівняння можна дослідити будь-який розворот та його складові, кожну ділянку. Забезпечення отримання повної інформації про точне розташування агрегату відносно заданої траєкторії за весь час зміни необхідно для повної автоматизації управління роботою машино-тракторних агрегатів та машин без допомоги водія.

Ключові слова: ґрунтообробний агрегат, поворот, траєкторія, рівняння траєкторії.

Вступ. Криволінійний рух суттєво відрізняється від прямолінійного руху. Дослідження умов криволінійного руху машин має важливе практичне значення. Як правило, кінематичні і динамічні умови роботи значно ускладнюються, що потребує вивчення багатьох додаткових факторів, які впливають на керованість, стійкість і надійність руху машини.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.1.9>

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання криволінійного руху машин розглядалося в роботах В.І. Поддубного, В.Я. Аніловича, Ю.Т. Водолажченка, С.М. Григорьєва, І.Є. Кавчинського та ін. В науковій статті (Поддубний, 2005) викладені результати математичного моделювання руху транспортного засобу при виконанні певних технічних операцій з метою встановлення оптимальних конструктивних параметрів. В статтях (Позін, 2005, Смірнов, 1981) через визначення руху миттєвого центра швидкості вивчається кінематика довільно розташованої опори. Відомі також спроби аналізу силової взаємодії колеса або гусениці з ґрунтом під час повороту (Трояновська, 2007., 2008). Велика кількість наукових робіт присвячена криволінійному руху машин, але це явище вивчене ще в недостатній мірі.

Багато робіт світових вчених присвячені дослідженню траєкторій повороту агрегатів, при виконанні польових робіт, або довільного транспортного засобу. В роботі Мінчжан Сонг (Song et., 2013) надана спроба оптимізувати шлях точки і демонстрація створення запланованого шляху для автономних тракторів-косарок для поворотів. Був запропонований алгоритм на основі схем роботи експериментального планування шляху для автономної косарки-трактора. Дані польових випробувань показали деякий збіг координат точок повороту.

В статті Аль-Хайят (Al-khayyat, 2018) викладена спроба отримання траєкторії криволінійного руху з оптимізацією частинок рою (PSO), використовуючи змінену траєкторію LSPB для створення наскрізних точок на траєкторії. Швидкості були отримані PSO, щоб змусити траєкторію LSPB проходити точно через зазначені точки шляху. PSO добре працює для перевірених випадків. В результаті моделювання була показана взаємодія зміненої траєкторії LSPB з PSO. Цей метод можна використовувати для оперативного пла-

нування шляху, і він дуже простий для застосування.

Метою даної статті є отримання математичних рівнянь для траєкторії нелінійного руху ґрунтообробного агрегату при виконанні технологічних операцій.

Методи дослідження.

У процесі дослідження використані методи емпіричного дослідження: загальнонаукові та спеціальні наукові методи: абстрагування (виділення основних параметрів теоретичного дослідження отримання рівнянь криволінійного руху у функції повороту остова корпусу ґрунтообробного агрегату). Розрахунок та моделювання теоретичних траєкторій центра ваги криволінійного руху машини проводилися за допомогою програми Microsoft Excel. Для статистичної оцінки визначали середньквдратичне відхилення.

Виклад основного матеріалу.

В роботі (Мельнік, 2017) отримані рівняння в параметричній формі для траєкторії неусталеного руху чотириколісної машини з передніми керованими колесами у функції кута повороту корпусу машини φ , які описують вхід в поворот і вихід з повороту лівого і правого напрямків.

При постійній швидкості u елементарна дуга: $dS = R d\varphi = u dt$, де R - радіус кривизни траєкторії. Після інтегрування цього рівняння і визначення постійної з урахуванням (2) отримуємо:

$$t = \frac{\ell}{vk} \ln \left| \frac{\alpha_o + k\varphi}{\alpha_o} \right| \text{ або } \varphi = \frac{\alpha_o}{k} \left(e^{\frac{kvt}{\ell}} - 1 \right). \quad (1)$$

Рівняння (Мельнік, 2017) мають можливість визначати траєкторії нелінійного руху незалежно від швидкості u . Але практичне відтворення траєкторій ускладнюється в зв'язку з непростим законом зміни кута повороту остова ґрунтообробного агрегату в польових умовах. За цих причин рівняння, що наведені вище записати через аргумент t , скориставшись залежністю (2):

$$x = \ell \left[-\frac{\chi_o^2(1+k)^2}{4k^3} \left(e^{\frac{kvt}{\ell}} - 1 \right) + \frac{\gamma_o^2(1-k)^2}{2k^3} \left(e^{\frac{kvt}{\ell}} - 1 \right) - \frac{\chi_o^2 - 2k^2}{2k^2\ell} \right];$$

$$y = \ell \left[\frac{\chi_o(1+k)}{k^2} \left(e^{\frac{kvt}{\ell}} - 1 \right) - \frac{\gamma_o}{k} \cdot \frac{v}{\ell} \right]. \quad (2)$$

Рівняння (2) дають можливість досліджувати розв'язки агрегатів у функції часу і отримувати траєкторію нелінійного руху у відповідності до повороту керма або керованих коліс.

Для перерахування координат окремої ділянки x_2y_2 в загальну систему координат $xу$ були використані формули для спряження окремих ділянок:

$$x = vt \left[\left(1 - \frac{1}{2} \alpha_0^2 \right) - \frac{1}{2} \alpha_0 \left(k + \alpha_0 \frac{v}{\ell} \right) t - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} k^2 + \alpha_0 k \frac{v}{\ell} + \frac{1}{3} \alpha_0^2 \frac{v^2}{\ell^2} \right) t^2 - \frac{1}{8} k \frac{v}{\ell} \left(k + \alpha_0 \frac{v}{\ell} \right) t^3 - \frac{1}{40} k^2 \frac{v^2}{\ell^2} t^4 \right]; \quad (4)$$

$$y = vt \left[\alpha_0 + \frac{1}{2} \left(k + \alpha_0 \frac{v}{\ell} \right) t + \frac{1}{6} k \frac{v}{\ell} t^2 \right].$$

Згідно з наведеним вище виразом для елементарної дуги траєкторії будуть:

$$\varphi = \frac{v}{\ell} \left(\alpha_0 t + \frac{1}{2} k t^2 \right); \quad t = -\frac{\alpha_0}{k} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_0}{k} \right)^2 + \frac{2\ell}{vk} \varphi}. \quad (6)$$

При побудові траєкторій розворотів ґрунтообробних агрегатів, наприклад, під час розвороту на полі, необхідно забезпечувати наперед задані курсові координати центрів кривизни. В цьому випадку координати треба підставити у рівняння (2) і перерахувати поточні координати довільної системи координат в загальну систему координат $xу$. В результаті отримуємо:

$$a_1 k^2 + b_1 k + c_1 = 0;$$

$$a_2 \hat{e}^2 + b_2 \hat{e} + \hat{n}_2 = 0, \quad (7)$$

де $\hat{a}_1 = -m \cos \theta_i$;

$b_1 = -n \sin \theta_i - p \cos \theta_i$;

$c_1 = x_{oi} - x_{\hat{e}} + q \cos \theta_i - r \sin \theta_i$;

$a_2 = -m \sin \theta_i$;

$b_2 = n \cos \theta_i - p \sin \theta_i$;

$c_2 = y_{oi} - y_k - q \sin \theta_i + r \cos \theta_i$;

$$x = x_o + x_2 \cos \psi - y_2 \sin \psi;$$

$$y = y_o + y_2 \cos \psi + x_2 \sin \psi, \quad (3)$$

де x_o, y_o – координати кінцевої точки траєкторії входу в поворот; ψ – кут повороту осей системи координат x_2y_2 відносно системи координат $xу$.

В роботі (Татьянченко, 2017) отримані нові рівняння для траєкторії неусталеного руху чотирьохколісної машини:

При знаходженні коренів рівнянь (7) слід помітити, що на ділянці входу в лівий поворот коефіцієнт k додатний, а на ділянці виходу з лівого повороту - від'ємний. Перше рівняння системи (7) дає коефіцієнт k_x , який задовольняє рівнянню абсциси x при всіх реальних значеннях параметра t , а з другого рівняння отримуємо коефіцієнт k_y для ординати y . Далі, треба знайти час t , при якому має місце рівність $k_x = k_y = k$.

Для випадку: $\ell=0,93$ м; $v=1$ м/с: вхід в лівий поворот $\gamma_0=2^\circ$, $\varphi_0=0^\circ$, $\gamma_k=17^\circ$, $k=0,5$: розрахунки дають: $k=0,0396151$ с⁻¹; $t=3,954352$ с. Результати розрахунків наведені в таблиці 2. Метод розрахунку k і t використовується у випадках, коли треба вийти в кінці траєкторії на курсові координати.

В таблицях 1, 2 наведені розрахункові координати точок траєкторії входу в лівий поворот і виходу з повороту.

Таблиця 1 – Розрахунки за рівняннями (2).

№ з/п	Вхід: $\alpha_0=2^\circ, \alpha_k=17^\circ, k=0,5$			Вихід: $\alpha_0=17^\circ, \alpha_k=2^\circ, k=-0,5$				
	t, c	$x=x_1$	$y=y_1$	t, c	x_2	y_2	x	y
1	0	0	0	0	0	0	3,7098	1,1823
2	1,5083	1,5009	0,1381	0,2958	0,2808	0,0944	3,9058	1,4044
3	2,8981	2,8322	0,5278	1,0824	1,0082	0,3986	4,3838	2,0315
4	3,3327	3,2142	0,7409	1,6504	1,5186	0,6544	4,6980	2,5081
5	3,9805	3,7097	1,1823	3,9805	3,5287	1,8742	5,8295	4,5692

Таблиця 2 – Розрахунки за рівняннями (4).

№ з/п	Вхід: $\alpha_0=2^\circ, \alpha_k=10,97^\circ, k=0,0396151$ с ⁻¹			Вихід: $\alpha_0=10,97^\circ, \alpha_k=4,55^\circ, k=-0,02815$ с ⁻¹				
	t, c	$x=x_1$	$y=y_1$	t, c	x_2	y_2	x	y
1	0	0	0	0	0	0	3,7274	1,1797
2	1,5083	1,4986	0,1647	0,2958	0,2888	0,0643	3,9536	1,3704
3	2,89815	2,8236	0,5978	1,0824	1,0396	0,3052	4,5077	1,9315
4	3,3327	3,2111	0,8073	1,6504	1,5648	0,5358	4,8664	2,3791
5	3,9541	3,7274	1,1797	4,0059	3,5132	1,8722	6,0634	4,5119

На рисунку 1 показана інтерпретація пошуку коефіцієнтів k і часу t , які відповідають виходу на обумовлені координати в кінці кожного маневру. Слід відмітити, що графічний пошук не може забезпечити відповідну точність пошуку цих параметрів, тому для вирішення задачі отримання курсових координат в кінці ділянки треба застосувати формули (7). Метод послідовних наближень дає результат з будь-якою точністю.

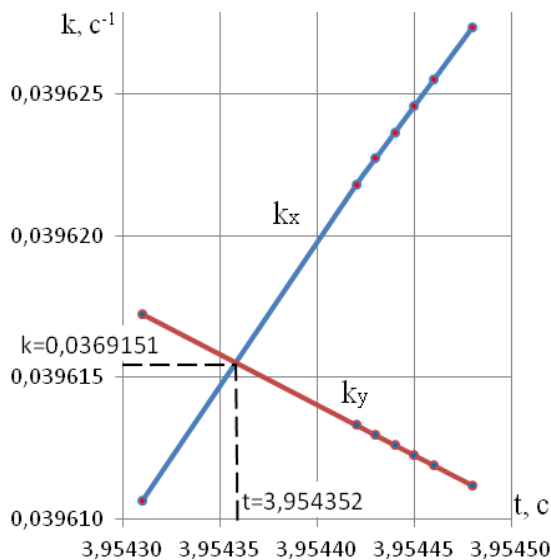


Рисунок 1 – Інтерпретація пошуку k і t на ділянці входу в лівий поворот.

Як видно, рівняння (6) придатні для визначення всіх можливих маневрів колісної машини і при будь-яких значеннях вихідних параметрів.

На рис. 2 побудовані дві траєкторії при $\gamma_0=15^\circ$ і $k=0$. Траєкторія 1 розрахована за рівняннями (8), отриманими в роботі (Поддубний, 2005) спеціально для руху по колу ґрунтообробного агрегату:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\ell}{\alpha_1} [\sin(\alpha_0 + \varphi) - \sin \alpha_0], \\ \phi &= -\frac{\ell}{\alpha_1} [\cos(\alpha_0 + \varphi) - \cos \alpha_0]. \end{aligned} \quad (8)$$

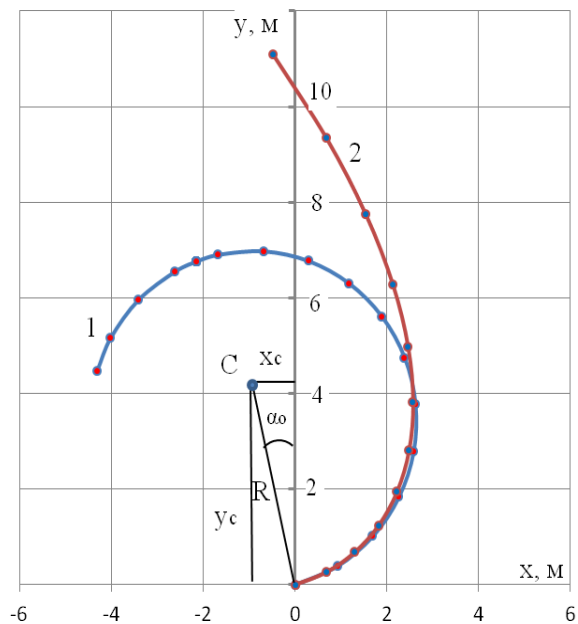


Рисунок 2 - Траєкторії руху по колу.

Це ідеальне коло радіусом $R=3,55$ м. Траєкторія 2 на рис. 2 побудована за рівняннями (4). Вона з достатньою точністю співпадає з кривою 1.

Висновок.

Кожна з наведених форм рівнянь траєкторії нелінійного руху ґрунтообробного агрегату удосконалює попередню форму, яка має свої особливості. Рівняння (4) дають можливість описати нелінійний рух в польових умовах - в функції часу. А рівняння (6) найпростіші у використанні і теж дозволяють виразити всі параметри руху в функції часу. Але є необхідність в поліпшенні отриманих рівнянь, щоб спростити використання на практиці, наприклад, для розворотів машино-тракторних агрегатів на полі або автоматично програмування.

Список використаної літератури:

1. Поддубный В. И. Математическая модель движения колесного трактора / В. И. Поддубный // Ползуновский альманах. – 2005. – №3. – С.73-76.
2. Позин Б. М. Кинематические соотношения при взаимодействии движителя с грунтом при повороте / Б. М. Позин, И. П. Трояновская // Вестник ЮурГУ. Серия «Машиностроение». – Челябинск: изд-во ЮурГУ, 2005. – Вып. 7. – №14 (54). – С. 93-96.
3. Смирнов Г. А. Теория движения колесных машин / Г. А. Смирнов. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
4. Трояновская И. П. Развитие и анализ взглядов на силовое взаимодействие колеса с грунтом при повороте машины / И. П. Трояновская // Сб. научных трудов «Механика и процессы управления», Труды XXXVIII Уральского семинара. Т.1 / УрО РАН. – Екатеринбург, 2008. – С.230-237.
5. Трояновская И. П. Силовое взаимодействие гусеничного движителя с грунтом на повороте / И. П. Трояновская // Тракторы и с/х машины. – 2007. – №12. – С.19-20.
6. Song MZ. Development of Path Planning Algorithm for an Autonomous Mower Tractor [Електронний ресурс] / MZ. Song, SW. Kang, SO. Chung та ін.] // 4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post Harvest Industry August 27-30. Espoo, Finland. P.P. 154-158. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015349764/pdf?md5=daeb89814f591143eb706a359c377261&pid=1-s2.0-S1474667015349764-main.pdf>
7. Al-khayy S.Z.S. Creating Through Points in Linear Function with Parabolic Blends Path by Optimization Method [Електронний ресурс] / S.Z.S. Al-khayy // Al-Khwarizmi Engineering Journal, Vol. 14, No. 1, March., P.P. 77-89. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aid=141135>.
8. Мельник В. І. Аналітичний спосіб дослідження криволінійного руху чотирьохколійної машини (Analytical method of examining the curvilinear motion of a four-wheeled vehicle). В. І. Мельник, М. Я. Довжик, Б. Я. Татяненко, О. О. Соларьов, Ю.

В. Сиренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. Прикладна механіка. *Bun.* 3, № 7 (87), (2017). С. 59-65.

9. Татьяначенко Б. Я. Результаты аналитических исследований траектории криволинейного движения четырехколесных машин. // Б. Я. Татьяначенко, Ю. В. Сиренко // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Международной научно-практической конференции (Минск, 22–24 ноября 2017 года) / редкол.: В. П. Чеботарев [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2017. – 324 - 327 с.

References:

1. Poddubnyj, V. I.: (2005). Matematicheskaja model' dvizhenija kolesnogo traktora. [Mathematical model of the movement of a wheeled tractor]. *Polzunovskij al'manah*, 3, 73-76. [in Russia].

2. Pozin, B. M.: (2005). Kinematicheskie sootnoshenija pri vzaimodejstvii dvizhitelja s gruntom pri povorote. [Kinematic relations for the interaction of the propeller with the ground when turning]. *Vestnik JuurGU. Serija «Mashinostroenie»*. Cheljabinsk, 7, 14 (54), 93-96. [in Russia].

3. Smirnov, G. A.: (1981). Teorija dvizhenija kolesnyh mashin [The theory of motion of wheeled vehicles] – M.: Mashinostroenie. [in Russia].

4. Trojanovskaja, I. P.: (2008). Razvitie i analiz vzgljadov na silovoe vzaimodejstvie koleasa s gruntom pri povorote mashiny. [Development and analysis of views on the force interaction of the wheel with the ground when turning the machine] *Sb. nauchnyh trudov «Mehanika i processy upravlenija», Trudy HHHVIII Ural'skogo seminar./ UrO RAN*, 1, (pp.230-237). Ekaterinburg. [in Russia]. doi: <https://doi.org/10.14529/engin170301>

5. Trojanovskaja, I. P.: (2007). Silovoe vzaimodejstvie gusenichnogo dvizhitelja s gruntom na povorote [Force interaction of the tracked mover with the ground when cornering]. *Traktory i s/h mashiny*, 12, 19-20. [in Russia].

6. Song, MZ., Kang, SW., Chung, SO., Kim, KD., Chae, YS., Lee, DH., Kim, YJ., Yu, SH. & Lee, KH. (2013, August 27-30). Development of Path Planning Algorithm for an Autonomous Mower Tractor [4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture] Horticulture and Post Harvest Industry. (pp.154-158). Espoo [in Finland]. doi: <https://doi.org/10.7744/cnijas.2015.42.1.063>.

7. Al-khayyt, SZS. (2018, March). Creating Through Points in Linear Function with Parabolic Blends Path by Optimization Method. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 14, 1, 77-89. doi: <https://doi.org/10.22153/kej.2018.10.005>.

8. Melnik, V., Dovzhyk, M., Tatyanchenko, B., Solarov, O. & Sirenko Yu. (2017). Analytical method of examining the curvilinear motion of a four-wheeled vehicle. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 3, 7 (87), 59-65. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101335>.

9. Tat'janchenko, B. Ja. & Sirenko, Ju. V.: (2017, November 22–24) Rezul'taty analiticheskikh issledovanij traektorii krivolinejnogo dvizhenija chetyrehkolesnyh mashin. [The results of analytical studies of the trajectory of curvilinear motion of four-wheeled vehicles] *Tehnicheskoe obespechenie innovacionnyh tehnologij v sel'skom hozjajstve: sbornik nauchnyh statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*. (pp. 324 - 327). Minsk: BGATU. [in Belarus]

Evgen Getsovich, Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Study of the maneuvers of the tillage unit in the function of time

Tractors performing work on agricultural land and transport operations move in a straight or curved trajectory, the curvature of which is constantly changing. Drawing up the equations of curvilinear motion is one of the main tasks of modeling the rotation. Fundamentally different assumptions underlying the description of the force interaction of the wheel and caterpillar propulsion with the soil, led to the formation of different methodological approaches in the study of curvilinear motion of machines. Many scientists have tried to obtain mathematical equations of curvilinear motion by different methods: analytical, graph-analytical and graphical. What were the methods of approximation, exact mathematical models, but which are very difficult to apply in practice. The necessity of studying the trajectories of unsteady motion is substantiated in the article.

The equations for the trajectory of nonlinear motion of the tillage unit as a function of the angle of rotation of the body, as well as the equation of motion in a circle were obtained in the article. Using these equations, you can investigate any reversal and its components, each section.

Ensuring complete information on the exact location of the unit relative to the specified trajectory for the entire period of change is necessary for full automation of the control of the operation of machine-tractor units and machines without the help of a driver.

The results of the article can be used in the future to plan the reversals of the AIT, which should be made the most rational and economical, when performing agricultural work; to reduce unproductive power consumption and avoid damage to land in reversible areas, or to compile AIT automatic control software.

Key words: tillage unit, rotation, trajectory, trajectory equation.

Дата надходження до редакції: 07.02.2020