

УДК 631.3.076

МИТРОПАН Д.М., к.т.н., проф., НТУ «ХП»
СЕРГІЄНКО М.Є., к.т.н., доц., НТУ «ХП»
ЦИБУЛЬКО В.В., студ., НТУ «ХП»
СИСОЄВ О.В., КП «ХКБМ»

КІНЕМАТИКА ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОГО ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА ПРИ НЕСТАЛОМУ ПОВОРОТІ

Виконан анализ кинематики поворота шарнирно-сочлененного трактора при неустановившемся повороте. Разработаны рекомендации по эксплуатации этих машин.

Вступ. Шарнірно-зчленовані трактори знайшли широке застосування в сільському господарстві й на транспорті. Гусеничні варіанти таких машин виконані у вигляді двох візків, з'єднаних одним або двома шарнірами із проміжною ланкою, використовуються як на тягових, так і на транспортних машинах високої прохідності й спеціального призначення [1, 2 та ін.].

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Дослідженню повороту 4-х гусеничних, колісних машин присвячений ряд робіт [3, 4 та ін.]. На ХТЗ розроблена конструкція 4-х гусеничного трактора на базі модифікації колісного трактора Т-150К, у якому кожне колесо замінене окремою гусеницею. Конструкція ходової системи виконана таким чином, що дозволяє здійснити її переобладнання з колісного ходу на гусеничний у будь-якому господарстві й навіть у польових мовах. Визначення радіусів повороту шарнірно-зчленованих тракторів при використанні різних рушіїв важливо й актуально. Ці питання в літературі не освітлені.

Мета й постановка завдання. Із зміною колісного ходу на гусеничний виникає питання кінематики повороту гусеничної модифікації трактора, що впливає на параметри руху, навантаження трактора, якість виконання сільськогосподарських робіт, тому і розглянуто це питання.

Аналіз кінематики повороту шарнірно-зчленованого гусеничного трактора при несталому повороті. Плоско-паралельне переміщення трактора при несталому повороті є в любий нескінченно малий проміжок часу синтез двох переміщень – відносного та переносного. Переносний рух на повороті в будь-який нескінченно малий проміжок часу розглядається як рух обох секцій трактора навколо одного миттєвого центру повороту при постійному значенні кута складання рами. Залежність між переносними швидкостями мостів трактора можна виразити:

$$V_{n2} = V_{n1} \cdot \frac{R_{n2}}{R_{n1}},$$

де V_{n1} і V_{n2} – переносні швидкості переднього та заднього мостів.

Відносний рух в даний нескінченно малий проміжок часу дорівнює рухам секцій однієї відносно до другої за рахунок скорочення відстані між центрами мостів. При вході в поворот трактора з двома ведучими мостами у відносному переміщенні

передній міст буде рухатись назад, а задній – вперед. При наявності в ходовій системі циркуляції потужності, один міст буде гальмівним. Якщо гальмівним буде передній міст, то у процесі відносного руху він буде розвантажуватись, а якщо задній – ходова система буде навантажуватись ще більше.

Для визначення відносного переміщення переднього та заднього мостів трактора необхідно знати радіуси кочення й кути повороту їх коліс. Радіус колеса гусениці в веденому режимі дорівнює:

$$R_k = \frac{t_\Gamma \cdot z_k}{2\pi},$$

де t_Γ – крок ланки гусениці;

z_k – число ланок, що укладаються на колесі.

Кроки ланок гусениць забігаючої та відстаючої сторін можуть бути різними, тому при наявності диференціалів, радіус ведучих коліс гусениць моста замінюють приведеним радіусом кочення колеса R_{Π} моста кожної секції трактора. Аналогічно шарнірно-зчленованого колісного трактора [5], він дорівнює:

$$R_n = \frac{t_{\Gamma 1} \cdot t_{\Gamma 2} \cdot z_k}{(t_{\Gamma 1} + t_{\Gamma 2}) \cdot \pi},$$

де $t_{\Gamma 1}, t_{\Gamma 2}$ – кроки ланок гусениць правої й лівої сторін.

Кроки ланок гусениці залежать від зношування шарнірів гусениці й точності їхнього виготовлення.

Приведений радіус кочення ведучого колеса моста гусеничного трактора, як і для колісної моделі [5], визначається:

$$R_{K\Gamma} = R_{\Pi} + \lambda_{\Pi\Gamma} \cdot P_{зм}, \quad (12)$$

де $\lambda_{\Pi\Gamma}$ – коефіцієнт пропорційності тангенціальних сил на ведучому колесі моста.

Коефіцієнт пропорційності тангенціальних сил λ є відношення зміни приведенного радіуса кочення ведучого колеса моста Δr_k гусеничного трактора до зміни сил тяги на гусеницях моста $\Delta P_{зм}$:

$$\lambda = \frac{\Delta r_k}{\Delta P_{зм}}.$$

Зміну радіуса кочення ведучого колеса можна виразити через буксування гусениць моста і приведений радіус кочення веденого колеса R_k моста:

$$\Delta r_k = \Delta \delta \cdot R_k.$$

Тоді

$$\lambda = \frac{\Delta \delta \cdot R_k}{\Delta P_{зм}} = R_k \cdot \frac{d\delta}{dP_{зм}}.$$

З аналізу тягових характеристик гусеничних тракторів [6] витікає, що залежність буксування до 5% від сили тяги на гаку лінійна й залежить від ваги трактора, стану й параметрів рушія та опорної поверхні. При 3% буксуванні трактора сила тяги гусениці становить приблизно половину ваги, що приходить на гусеницю трактора. Приймаємо вагу, що приходить на передній міст шарнірно-зчленованого трактора – 55 кН, а на задній – 35 кН. При цьому на агрофоні – стерня пшениці для кожної гусениці переднього моста $\lambda_1 = 4,123 \cdot 10^{-4}$ мм/Н, а заднього – $\lambda_2 = 0,648 \cdot 10^{-4}$ мм/Н. При рівності радіусів ведучих коліс у веденому режимі приведений коефіцієнт пропорційності тангенціальних сил гусениць моста дорівнює [5]:

$$\begin{aligned} \text{переднього} - & \lambda_{n1} = \lambda_1 / 2; \\ \text{заднього} - & \lambda_{n2} = \lambda_2 / 2. \end{aligned}$$

При відносному русі секцій трактора відбувається закрутка валопроводів трансмісії, збільшуються сили зчеплення на гусеницях, тому приведені радіуси кочення мостів змінюються й переміщення центру моста буде відбуватися при змінному радіусі кочення $R_{кр}$ (див. рис. 1)

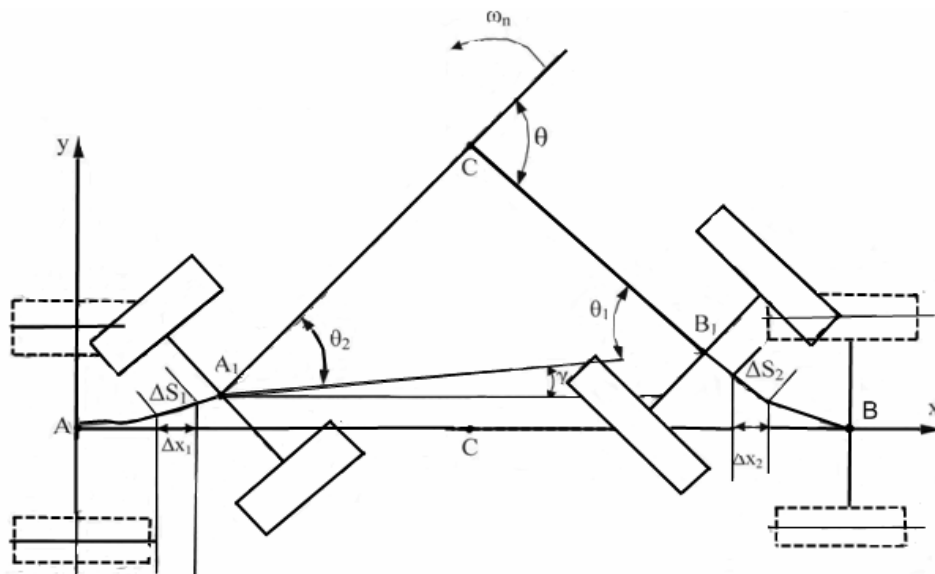


Рисунок 1 – Схема відносного руху секцій шарнірно-зчленованого трактора

Використовуючи приведені радіуси кочення коліс мостів, елементарне відносне переміщення моста визначається по формулі [7] довжини дуги перемінного радіуса полярних координатах.

Перетворивши й відкинувши величини нижчого порядку, одержимо:

$$\left. \begin{aligned} dS_1 &= \sqrt{\lambda_{n1}^2 + R_{кр1}^2 \cdot C_1^2 \cdot R_{d1}^2} \cdot dP_{зм1} = A_1 \cdot dP_{n1}; \\ dS_2 &= \sqrt{\lambda_{n2}^2 + R_{кр2}^2 \cdot C_2^2 \cdot R_{d2}^2} \cdot dP_{зм2} = A_2 \cdot dP_{n2}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

де C_1, C_2 – піддатливість приводів переднього та заднього мостів;
 $R_{крг1}, R_{крг2}$ – приведені радіуси кочення ведених коліс переднього й заднього мостів;
 $\lambda_{п1}, \lambda_{п2}$ – коефіцієнти пропорційності тангенціальних сил на ведучих колесах мостів;
 R_{d1}, R_{d2} – середні динамічні радіуси приведених ведучих коліс переднього і заднього ведучих мостів;
 $P_{п1}, P_{п2}$ – сумарні дотичні сили на ведучих колесах переднього й заднього мостів, викликаних відносним рухом секцій.

Відповідно до схеми відносного руху секцій трактора (рис.1) можна записати:

$$\left. \begin{aligned} dX_1 &= A_1 \cos(\theta_1 - \gamma) dP_{п1}; \\ dX_2 &= -A_2 \cos(\theta_2 + \gamma) dP_{п2}; \\ X_2 &= X_1 + \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \theta \cdot \cos \gamma}; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

де θ_1, θ_2 – кути між повздовжніми площинами симетрії передньої й задньої секцій і вертикальною площиною, проведеної через центри мостів;

θ – кут між поздовжніми осями передньої й задньої секцій трактора (кут зламу рами);

X_1, X_2 – проекції переміщення центрів переднього й заднього мостів за рахунок відносного руху секцій;

l_1, l_2 – відстань від осі вертикального шарніра рами до осей переднього й заднього мостів;

γ – кут між лінією A_1B_1 , що з'єднує центри мостів у процесі їхнього відносного переміщення і її початковим положенням лінії AB .

Кут $\gamma < 1,5^\circ$, тому його не враховуємо.

Із умов тягового балансу сил при відносному русі можна записати:

$$P_{п1} = \frac{P_{п2} \cdot \cos \theta_1}{\cos \theta_2},$$

де відношення
$$\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} = \frac{l_1 \cdot \sin \theta + l_2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{l_2 \cdot \sin \theta + l_1 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}.$$

При $\frac{l_1}{l_2} = 0,35 \dots 0,75$ та $\theta = 0 \dots 0,698$ рад відношення $\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} = 0,95 \dots 1,05$, тому можна прийняти $P_{п1} = P_{п2}$.

Використовуючи перше та друге рівняння системи (3) отримаємо:

$$\left| \frac{dX_1}{A_1} \right| = \left| \frac{-dX_2}{A_2} \right|. \quad (15)$$

Диференціюючи третє рівняння системи (3), отримаємо:

$$dX_1 = dX_2 - \frac{l_1 \cdot l_2 \cdot \sin \theta}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta}} \cdot d\theta. \quad (16)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (4) та (5), знаходимо:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{A_1}{A_1 + A_2} \cdot \left(L - \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta} \right); \\ X_2 &= \frac{A_1 L + A_2 \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta}}{A_1 + A_2}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Швидкості відносного руху мостів можна визначити (рис.1):

$$V_{вд1} = \frac{dX_1}{dt \cos \theta_1};$$

$$V_{вд2} = \frac{dX_2}{dt \cos \theta_2}.$$

де

$$\cos \theta_1 = \frac{l_1 \sin \theta + l_2 \sin \theta \cos \theta}{\sin \theta \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta}};$$

$$\cos \theta_2 = \frac{l_2 \sin \theta + l_1 \sin \theta \cos \theta}{\sin \theta \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta}}.$$

Тому

$$V_{вд1} = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \cdot \frac{\dot{\theta} l_1 l_2 \sin^2 \theta}{l_1 \sin \theta + l_2 \sin \theta \cos \theta};$$

$$V_{вд2} = \frac{-A_2}{A_1 + A_2} \cdot \frac{\dot{\theta} l_1 l_2 \sin^2 \theta}{l_2 \sin \theta + l_1 \sin \theta \cos \theta}. \quad (18)$$

Напрямки швидкостей переносного V_n і відносного $V_{вд}$ руху заднього моста складаються, а переднього – віднімаються, тому сумарні швидкості переднього V_1 і заднього V_2 мостів дорівнюють:

$$V_1 = V_{n1} - \frac{A_1}{A_1 + A_2} \cdot \frac{\dot{\theta} l_1 l_2 \sin^2 \theta}{l_1 \sin \theta + l_2 \sin \theta \cos \theta};$$

$$V_2 = V_{n2} \frac{R_{n2}}{R_{n1}} + \frac{A_2}{A_1 + A_2} \cdot \frac{\dot{\theta} l_1 l_2 \sin^2 \theta}{l_2 \sin \theta + l_1 \sin \theta \cos \theta}. \quad (19)$$

Кутові швидкості секцій переносного і відносного руху аналогічно лінійним швидкостям – складаються. Переносні кутові швидкості передньої та задньої секцій дорівнюють:

$$\omega_n = \frac{V_{n1}}{R_{n1}} = \frac{V_{n2}}{R_{n2}}. \quad (20)$$

З рис. 1 видно, що відносні кутові швидкості відповідно передньої і задньої секцій трактора дорівнюють:

$$\omega_{\phi 01} = \frac{d(\theta_1 - \gamma)}{dt};$$

$$\omega_{\phi 02} = \frac{d(\theta_2 + \gamma)}{dt}.$$

$$\theta_1 = \arctg \frac{l_2 \sin \theta}{l_1 + l_2 \cos \theta};$$

$$\theta_2 = \arctg \frac{l_1 \sin \theta}{l_2 + l_1 \cos \theta}.$$

де

Тому що γ мала величина, то

$$\omega_{\phi 01} = \frac{l_2(l_1 \cos \theta + l_2)}{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta} \cdot \dot{\theta};$$

$$\omega_{\phi 02} = \frac{l_1(l_2 \cos \theta + l_1)}{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta} \cdot \dot{\theta}. \quad (21)$$

Сумарні кутові швидкості відповідно переднього ω_1 і заднього ω_2 мостів трактора дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= \frac{V_{n1}}{R_{n1}} + \frac{l_2(l_1 \cos \theta + l_2)}{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta} \cdot \dot{\theta}; \\ \omega_2 &= \frac{V_{n2}}{R_{n2}} - \frac{l_1(l_2 \cos \theta + l_1)}{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta} \cdot \dot{\theta}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Радіуси несталого повороту центрів переднього і заднього мостів шарнірно-зчленованого трактора із усіма ведучими гусеницями визначається залежностями:

$$R_{m1} = \frac{V_1}{\omega_1} = \frac{V_{n1} \mp \frac{A_1}{A_1 + A_2} \cdot \frac{l_1 l_2 \sin^2 \theta}{l_1 \sin \theta + l_2 \sin \theta \cos \theta} \cdot \dot{\theta}}{\frac{V_{n1} \pm \frac{l_2(l_1 \cos \theta + l_2)}{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta} \cdot \dot{\theta}}{R_{n1}}}. \quad (23)$$

$$R_{m2} = \frac{V_2}{\omega_2} = \frac{\frac{V_{n1} \cdot R_{n2} \pm \frac{A_2}{A_1 + A_2} \cdot \frac{l_1 l_2 \sin^2 \theta}{l_2 \sin \theta + l_1 \sin \theta \cos \theta} \cdot \dot{\theta}}{R_{n1}}}{\frac{V_{n1} \mp \frac{l_1(l_2 \cos \theta + l_1)}{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta} \cdot \dot{\theta}}{R_{n1}}}. \quad (24)$$

В залежностях (12) та (13) (\pm) і (\mp) при вході в поворот трактора потрібно брати верхні знаки, а при виході з повороту – нижні знаки. Переносні радіуси повороту центрів мостів визначають по залежностям:

$$R_{n1} = \frac{l_2 + l_1 \cos \theta}{\sin \theta};$$

$$R_{n2} = \frac{l_1 + l_2 \cos \theta}{\sin \theta}.$$

Тому можна записати:

$$R_{mn1} = \frac{V_1}{\omega_1} = \frac{V_{n1} \mp \frac{A_1}{A_1 + A_2} \cdot \frac{l_1 l_2 \sin^2 \theta}{l_1 \sin \theta + l_2 \sin \theta \cos \theta} \cdot \dot{\theta}}{\frac{V_{n1} \sin \theta}{l_2 + l_1 \cos \theta} \pm \frac{l_2(l_1 \cos \theta + l_2)}{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta} \cdot \dot{\theta}}. \quad (25)$$

$$R_{mn2} = \frac{V_2}{\omega_2} = \frac{\frac{V_{n1} \cdot (l_1 + l_2 \cos \theta)}{l_2 + l_1 \cos \theta} \pm \frac{A_2}{A_1 + A_2} \cdot \frac{l_1 l_2 \sin^2 \theta}{l_2 \sin \theta + l_1 \sin \theta \cos \theta} \cdot \dot{\theta}}{\frac{V_{n1} \sin \theta}{l_1 + l_2 \cos \theta} \mp \frac{l_1(l_2 \cos \theta - l_1)}{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta} \cdot \dot{\theta}}. \quad (26)$$

Формули (14) і (15) дійсні й для колісного шарнірно-зчленованого трактора без врахування бокового увода шин на повороті.

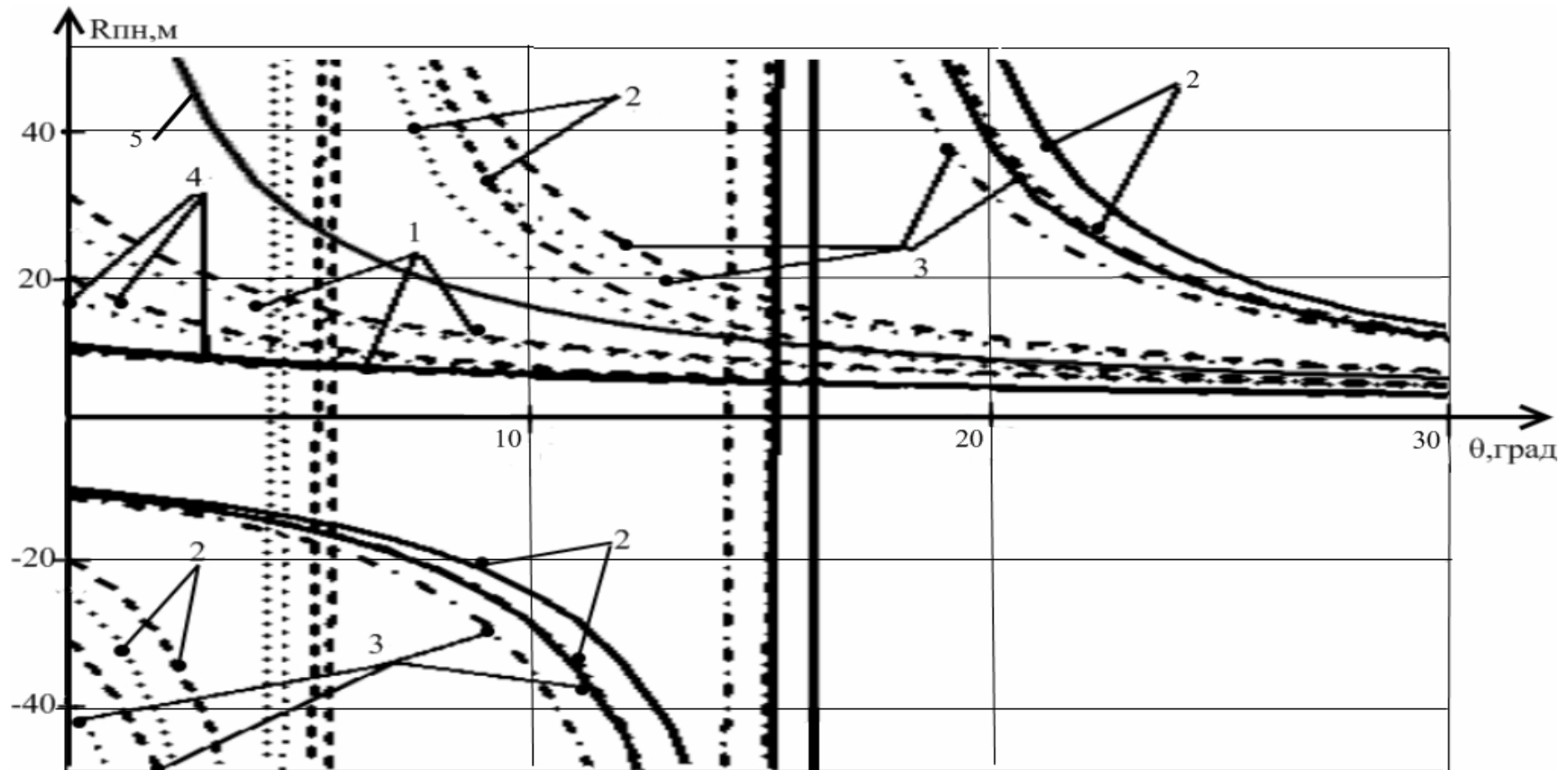
По формулам (14) та (15) побудовані графічні залежності (рис. 2 та 3) радіусів повороту центрів мостів колісних і гусеничних шарнірно-зчленованих тракторів при несталому і сталому поворотах в залежності від лінійної і кутової швидкостей складання рами трактора. Аналіз рівнянь (14) та (15), а також рисунків 2 та 3 показує, що:

а) Радіуси повороту секцій гусеничного і колісного шарнірно-зчленованих тракторів при несталих поворотах близькі. Різниця їх складає не більше 3...5%.

б) При вході в поворот радіус повороту центра переднього моста зменшується значно більше, ніж при сталому повороті. Так в процесі несталого повороту при $\theta = 10^\circ$, кутовій швидкості складання рами трактора $\dot{\theta} = 0,5 \text{ c}^{-1}$ та лінійній швидкості центра мас трактора 10,8 км/год радіус повороту передньої секції при сталому повороті складає 16,4 м, а при несталому – 7 м. Із збільшенням кута складання рами до $\theta = 20^\circ$ радіуси дорівнюють 8,1 м та 4,83 м (рис. 3). Це пояснюється тим, що при несталому повороті кутові швидкості повороту секцій сталого і несталого поворотів складаються. Вони ростуть швидше, ніж лінійна швидкість трактора. Різниця між радіусами повороту передньої секції при сталому і несталому поворотах зменшується зі збільшенням швидкості трактора і збільшується при підвищенні кутової швидкості складання рами.

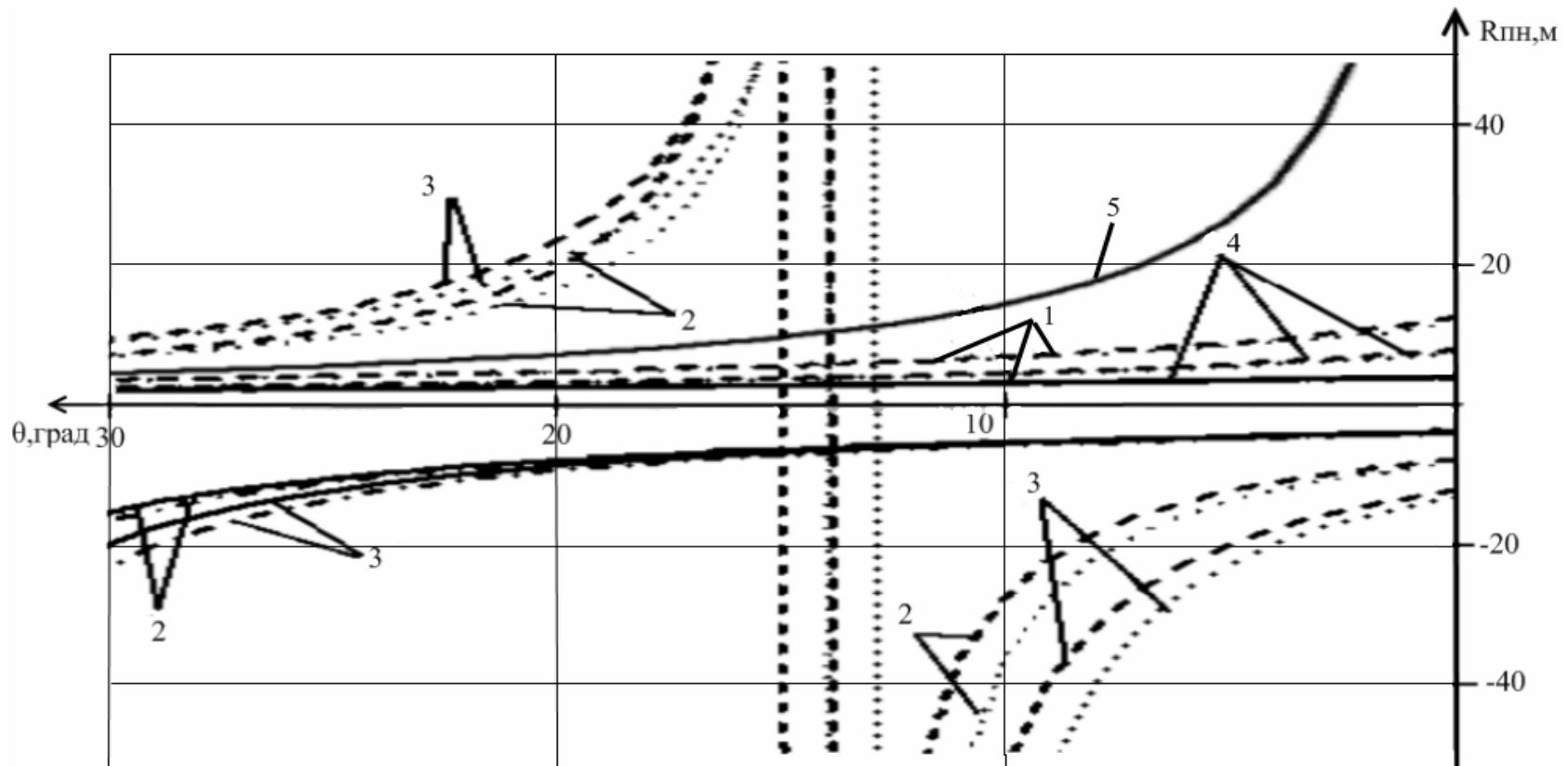
Радіус повороту заднього моста при вході в поворот буде з малого радіуса збільшуватись до нескінченності й зі зміною знака буде різко зменшуватись.

При виході із повороту радіус повороту центра моста задньої секції буде з малого значення плавно збільшуватись. Він буде значно меншим, ніж при сталому повороті. Так при швидкості трактора 10,8 км/год, $\theta = 20^\circ$ та $\dot{\theta} = 0,5 \text{ c}^{-1}$ дорівнює 3,16 м, а при $\dot{\theta} = 0,2 \text{ c}^{-1}$ відповідно 4,31 м, при сталому – 8,15 м (рис. 4).



- Гусеничний трактор при $V= 1\text{м/с}$ та $\dot{\theta} = 0,2 \text{ рад/с}$;
- - - Гусеничний трактор при $V= 3\text{м/с}$ та $\dot{\theta} = 0,2 \text{ рад/с}$;
- · - · - Колісний трактор при $V= 1\text{м/с}$ та $\dot{\theta} = 0,2 \text{ рад/с}$;
- · · · · Колісний трактор при $V= 3\text{м/с}$ та $\dot{\theta} = 0,2 \text{ рад/с}$.

Рисунок 2 – Зміна радіусів повороту центрів мостів: при вході в правий поворот переднього моста (1) та заднього (2), при виході з правого повороту переднього моста (3) та заднього (4), при сталому повороті (5)



- - Гусеничний трактор при $V = 1 м/с$ та $\dot{\theta} = 0,5 рад/с$;
- - Гусеничний трактор при $V = 3 м/с$ та $\dot{\theta} = 0,5 рад/с$;
- · - · - · - Колісний трактор при $V = 1 м/с$ та $\dot{\theta} = 0,5 рад/с$;
- · · · · - Колісний трактор при $V = 3 м/с$ та $\dot{\theta} = 0,5 рад/с$.

Рисунок 3 – Зміна радіусів повороту центрів мостів: при вході в лівий поворот переднього моста (1) та заднього (2), при виході з лівого повороту переднього моста (3) та заднього (4), при сталому повороті (5)

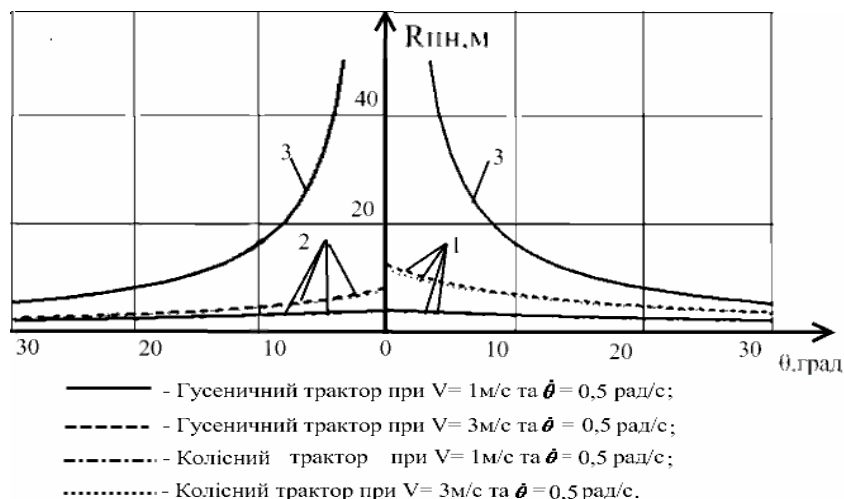


Рисунок 4 – Зміна радіусів повороту центрів мостів: при вході в поворот переднього моста (1), при виході з повороту заднього моста (2), при сталому повороті (3)

Радіус повороту переднього моста при виході із повороту спочатку різко збільшується до нескінченності й потім зі зміною знака буде різко зменшуватись.

Зменшення радіуса повороту при вході в поворот передньої секції і при виході з повороту задньої секції більше, ніж при сталому повороті призводить до зменшення бокової стійкості трактора на повороті.

Висновки

1. Отримані математичні залежності визначення радіусів повороту секцій шарнірно-зчленованого гусеничного трактора при несталому повороті дозволяють досліджувати кінематику руху трактора.

2. Порівняння радіусів поворотів секцій шарнірно-зчленованого трактора з гусеничними, колісними рушієм при несталих поворотах показали що їх значення близькі. Різниця складає не більше 5%.

3. При вході в поворот радіус повороту центра мас переднього моста, а при виході з повороту радіус повороту центра мас заднього моста менше, ніж при сталому повороті в 1,5...2 рази, що зменшує поперечну стійкість трактора при несталому повороті.

4. Для тракторів виконаних на базі модифікації Т-150К рекомендується виконувати несталий поворот гусеничного і колісного шарнірно-зчленованих тракторів при швидкостях $V \leq 3,6\text{ км/год}$ та при $\dot{\theta} \leq 0,2\text{ с}^{-1}$.

Список літератури: 1. Селиванов *И.И.* Автомобили и транспортные гусеничные машины высокой проходимости. – М.: Наука, 1967. – 270 с. 2. Фаробин *Я.Е.* Теория поворота транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 173 с. 3. Медведев *Н.Г.* Особенности поворота гусеничной машины с четырех обводным двигателем // Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2001. – №1, 2. – С. 314–319. 4. Митропан *Д.М.* Распределение тягового усилия между ведущими мостами шарнирно-сочлененного трактора 4К4 при неустановившемся повороте // Тракторы и сельхозмашины. – 1972. – №3. – С. 19–21. 5. Самородов *В.Б.*, Митропан *Д.М.* та інші. Порівняльний аналіз колісних і гусеничних шарнірно-зчленованих тракторів при несталому повороті // Вестник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – №58. – С. 46-56. 6. Колобов *Г.Г.*, Парфенов *А.П.* Тяговые характеристики тракторов. – М.: Машиностроение, 1972. – 157 с. 7. Смирнов *В.И.* Курс высшей математики. – М.: Физмат, 1956. – Т. 2. 8. Митропан *Д.М.* Переходной режим при повороте шарнирно-сочлененного тягача // Сб.: «Автомобильный транспорт». – К.: Техніка, 1972. – Вип. 9. – С.127–130.