

Кувачов В.П.

Таврійський державний агро-
технологічний університет
E-mail: kuvachoff@mail.ru

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТАТИЧНОЇ ТА ДИНАМІЧНОЇ
ПОВОРОТКОСТІ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО
ШИРОКОКОЛІЙНОГО АГРОЗАСОБУ

УДК 631.37

Представлено результати дослідження повороткості спеціалізованих ширококолієних агрозасобів для колійної системи землеробства. Отримані рівняння руху ширококолієного агрозасобу на повороті дозволяють оцінити вплив його конструктивних, кінематичних і силових параметрів на критерії статичної та динамічної повороткості.

Ключові слова: колійне землеробство, ширококолієний агрозасіб, повороткість, кінематичні параметри.

Постановка проблеми

Особливістю використання спеціалізованих ширококолієних агрозасобів для колійної системи землеробства [1,2] є поділ поля на агротехнічну та інженерну зони [3]. Розворот ширококолієних агрозасобів на поворотній смузі може здійснюватися різними способами. Кожен спосіб повороту впливає на кінематику його криволінійного руху. При цьому бажано, щоб непродуктивні витрати енергії на поворот і площа під інженерну зону були якомога меншими.

З позиції мінімізації непродуктивних втрат поля під інженерну зону необхідно мати можливість здійснювати розворот ширококолієного агрозасобу таким чином, щоб рушії одного з його бортів залишалися в межах тієї ж транспортно-технологічної доріжки, на якій вони знаходяться, а рушії з іншого борту переміщали його шасі на наступну робочу позицію [4].

Властивість мобільного засобу здійснювати повороти із заданою кривизною траєкторії називають повороткістю. Поворотність характеризується кінематичними та силовими параметрами. Правильний вибір останніх з позиції необхідної повороткості забезпечить рух ширококолієного агрозасобу в оптимальному режимі і зменшить непродуктивні втрати енергії і площі поля при здійсненні ним поворотів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Керування поворотом сучасних моделей спеціалізованих ширококолієних агрозасобів, обладнаних колісним рушієм, адаптовано до ручного або автоматичного режиму і будується за кінематичним або силовим принципом здійснення повороту [1-6].

Теорія статичної та динамічної повороткості колісного транспортного засобу достатньо вивчена [7,8]. Питанням повороткості сільськогосподарських машинно-тракторних агрегатів присвячено велику кількість наукових досліджень [9,10]. Разом з тим, отримані залежності практично не можуть бути використані для аналізу повороткості спеціалізованого ширококолієного агрозасобу. Причина полягає у принциповій різниці його компоувальної схеми та принципів функціонування у координатно-транспортній системі руху, в якій машини можуть рухатися лише у двох взаємно-перпендикулярних напрямках [5,6]. Тим більше непридатними для подальшого аналізу є результати, отримані вченими при вивченні динаміки повороту традиційних машинно-тракторних агрегатів.

Формулювання цілей статті

Метою досліджень є обґрунтування кінематичних і силових параметрів руху спеціалізованого ширококолієного агрозасобу на повороті шляхом розробки теоретичних основ його статичної та динамічної повороткості.

Методи досліджень

Теоретичні дослідження, синтез конструктивних схем і параметрів спеціалізованого ширококолісного агрозасобу здійснювався шляхом моделювання на ПК умов його функціонування. В основу методів дослідження покладені методи теоретичної механіки, теорії трактора та експлуатації сільськогосподарських агрегатів, з використанням пакету Mathcad.

Основна частина

Розглянемо дві схеми повороту спеціалізованого ширококолісного агрозасобу (рис. 1) кінематичні параметри якого залежать від конструктивно-технологічних параметрів (колісної бази, ширини колії, максимальних кутів повороту керованих коліс, швидкості їх обертання, швидкості руху, характеристик шин тощо). Згідно першої схеми, яка отримала найбільше поширення серед сучасних зразків ширококолісних агрозасобів, поворот здійснюється рухом всіх керованих коліс агрозасобу навколо центру повороту, розміщеного в центрі симетрії його шасі (рис. 1а). Відповідно до другої схеми, запропонованої нами, розворот агрозасобу здійснюється поворотом платформи шасі керованими колесами з одного його борту навколо центру повороту, розміщеного в центрі міжколісного простору з іншого борту (тут колеса при повороті можуть залишатися в межах своєї транспортно-технологічної доріжки) (рис. 1б).

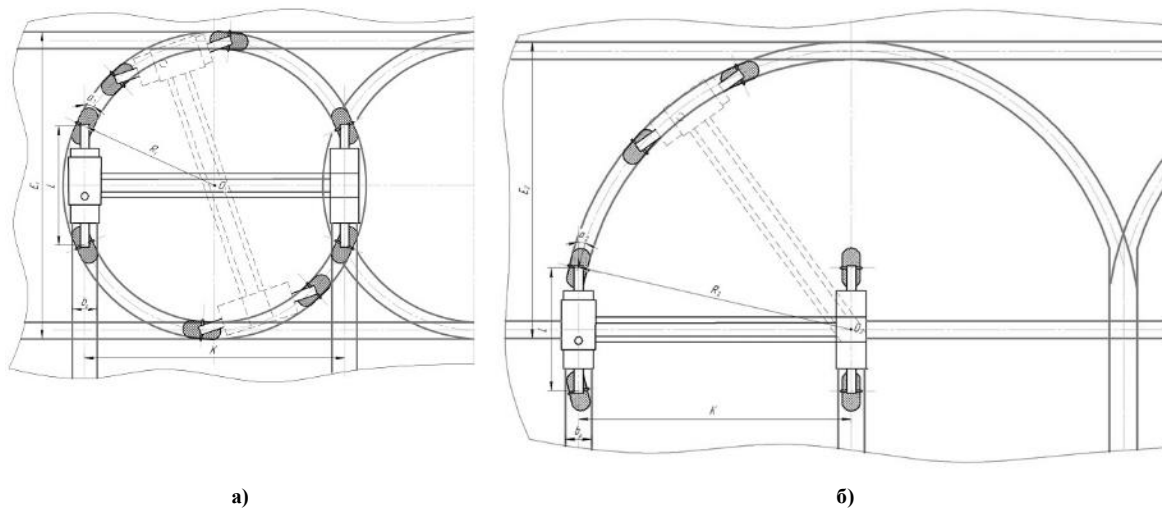


Рис.1 - Схеми розвороту спеціалізованого ширококолісного агрозасобу навколо центру повороту, розташованого в центрі симетрії шасі (а) і в центрі міжколісного простору одного з бортів (б)

Технічно реалізувати запропоновану нами схему повороту ширококолісного агрозасобу (рис. 1 б) можна як мінімум двома способами: кінематичним поворотом платформи керованими колесами з одного борту за допомогою шарнірного поворотного механізму, розташованого в центрі міжколісного простору з іншого боку; кінематично-силовим розворотом шляхом вивішування одного його борту з допомогою підйомних механізмів.

Проаналізуємо вплив основних конструктивних параметрів спеціалізованого ширококолісного агрозасобу на кінематичні характеристики повороту двох розглянутих схем (рис. 1). Зрозуміло, що величина бажаної ширини поворотної смуги повинна дорівнювати ширині ходової системи агрозасобу:

$$E = K + b_p, \quad (1)$$

де K – ширина колії ширококолісного агрозасобу;
 b_p – ширина транспортної технологічної доріжки.

Основні конструктивні параметри ширококоліїного агрозасобу представимо узагальненим характеристичним параметром μ , чисельно рівним відношенню його колісної бази L до ширини колії K , що, як правило, не перевищує 1:

$$\mu = \frac{L}{K} \leq 1. \quad (2)$$

Відповідно до традиційної схеми повороту ширококоліїного агрозасобу (рис. 1а) зв'язок кінематичних показників повороту (кута повороту коліс α_1 ; радіуса повороту R_1 і ширини поворотної смуги E_1) з конструктивним параметром μ , можна представити наступними залежностями:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,5\sqrt{K^2 + L^2} = 0,5K\sqrt{1 + \mu^2}, \\ E_1 &= 2R_1 + b_p = \sqrt{K^2 + L^2} + b_p = K\sqrt{1 + \mu^2} + b_p, \\ \alpha_1 &= \arctg\left(\frac{L}{K}\right) = \arctg(\mu). \end{aligned} \quad (3)$$

Згідно запропонованої нами другої схеми повороту (рис. 1б) аналогічно знаходимо:

$$\begin{aligned} R_2 &= 0,5\sqrt{4K^2 + L^2} = 0,5K\sqrt{4 + \mu^2}, \\ E_2 &= R_2 + b_p = 0,5\sqrt{4K^2 + L^2} + b_p = 0,5K\sqrt{4 + \mu^2} + b_p, \\ \alpha_2 &= \arctg\left(\frac{L}{2K}\right) = \arctg\left(\frac{\mu}{2}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

За допомогою пакету Mathcad оцінимо вплив характеристичного параметра μ ширококоліїного агрозасобу на ступінь зміни дійсної ширини поворотної смуги відносно бажаної (рис. 2) і величину кута повороту керованих коліс (рис. 3) для двох розглянутих схем повороту.

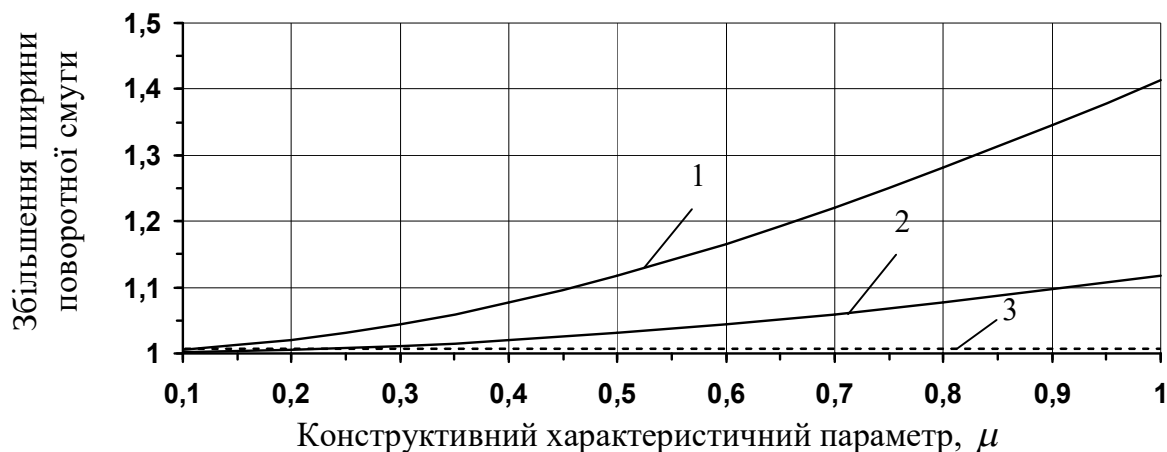


Рис.2 –Збільшення ширини поворотної смуги в залежності від конструктивного характеристичного параметра μ для різних схем повороту ширококоліїного агрозасобу:

1 – схема на рис.1а; 2 – схема на рис. 1б; 3 – бажана характеристика

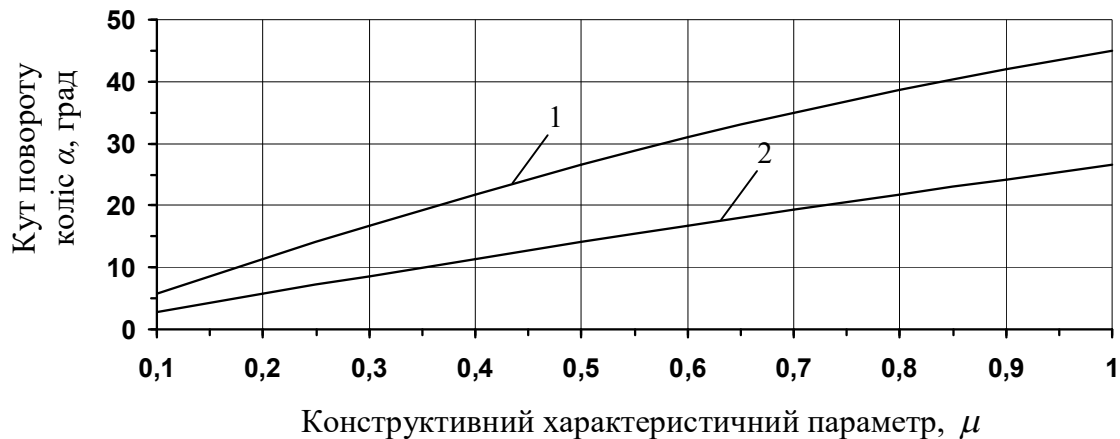


Рис.3 – Залежність кута повороту керування коліс ширококолієного агрозасобу від конструктивного характеристичного параметра μ для різних схем повороту: 1 – схема на рис. 1а; 2 – схема на рис. 1б

З аналізу рис. 2 випливає, що при збільшенні характеристичного параметра μ ширококолієного агрозасобу збільшується ширина поворотної смуги. Але ступінь і інтенсивність такого впливу для розглянутих схем повороту різна. Так, із збільшенням μ до 1 ширина поворотної смуги для найбільш поширеною першої схеми повороту (рис. 1а) на 30% більша, ніж для запропонованої нами іншої схеми (рис. 1б). І якщо величина μ сучасних моделей ширококолієних агрозасобів не перевищує $\mu < 0,5$, то збільшення ширини поворотної смуги за схемою на рис. 1б не перевищує 3% від бажаної. Такий результат знаходиться в межах допустимого стійкого руху спеціалізованого агрозасобу. У той час як організація повороту за розповсюдженою схемою на рис. 1а вимагає в такому випадку збільшення ширини поворотної смуги до 12%, що не є бажаним з позиції оптимального землекористування. Тому, з цієї точки зору, організація повороту спеціалізованого ширококолієного агрозасобу за запропонованою нами схемою на рис. 1б є більш доцільною.

Аналогічним є і характер залежності кута повороту керування коліс α ширококолієного агрозасобу від μ (рис. 3). При повороті за схемою на рис. 1а кут α в 2 рази більший в порівнянні зі схемою на рис. 1б. Звичайно, збільшення кута повороту керування коліс α не бажано, оскільки потребує відповідного ускладнення конструкції механізму керування коліс агрозасобу і збільшення енерговитрат на цей процес.

Розглянуті нами кінематичні параметри дають велику, але не повну інформацію про криволінійний рух спеціалізованого ширококолієного агрозасобу. Повна інформація про можливість руху із заданими кінематичними параметрами може бути отримана при визначенні силових параметрів (дотичні сили тяги на ведучих колесах, витрати енергії агрозасобом на подолання сумарного моменту опору повороту та ін.).

Для отримання характеристик статичної поворотності розглянемо круговий рух плоскої моделі ширококолієного агрозасобу навколо центру повороту (т. О) (рис. 4) з постійною кутовою швидкістю $\omega = \text{const}$, $\dot{\omega} = 0$. Керувані колеса одного з його бортів (в даному випадку – лівого) повернуті на кути α_1 і α_2 .

При складанні рівнянь руху будемо виходити із загальноприйнятого поняття правильності повороту. Згідно якого всі ведучі колеса агрозасобу (на рис. 4 – це два колеса лівого борту) рухаються без бічного ковзання, а їх перетин осей здійснюється в точці, яка є центром кривизни пройденого шляху. Бічне уведення коліс при цьому не враховуємо, оскільки агрозасіб здійснює кругове обертання навколо нерухомої осі і його рух у перпендикулярному напрямку відсутній. Врахуємо тільки ті елементи спеціалізованого

ширококоліїного агрозасобу які здійснюють плоско-паралельний рух. Тангенціальні сили інерції і інерційні моменти опору повороту агрозасобу і його технологічної частини через їх абсолютну мализну в дослідження не враховуються.

З ширококоліїним агрозасобом жорстко зв'яжемо рухому систему координат xSy , початок якої помістимо в центр мас його лівого борту (т. S). Вісь x направимо паралельно до поздовжньої осі агрозасобу, а її позитивний напрямок направимо в бік руху.

В режимі повороту на ширококоліїний агрозасіб діють ряд відповідних сил. В першу чергу, це рушійні сили передніх і задніх керованих коліс (у нашому випадку – лівих) F_{k1} і F_{k2} та сили опору кочення F_{f1} і F_{f2} , які прикладені в їх центрі (т. P_1 і P_2) та сила інерції. Для здійснення подальших дій саме в цих точках доцільно розмістити розділену на дві частини (m_1 і m_2) масу m_b , що припадає на лівий борт агрозасобу. Вплив опору робочих органів його технологічної частини представимо головним вектором F_{tr} , який прикладений в центрі опору (т. C), напрям дії якого на повороті складає з поздовжньою віссю агрозасобу кут γ . Реакції, які виникають в шарнірному поворотному механізмі агрозасобу, представимо силами F_{jx} і F_{jy} , прикладеними в т. J , а також моментом опору M_j .

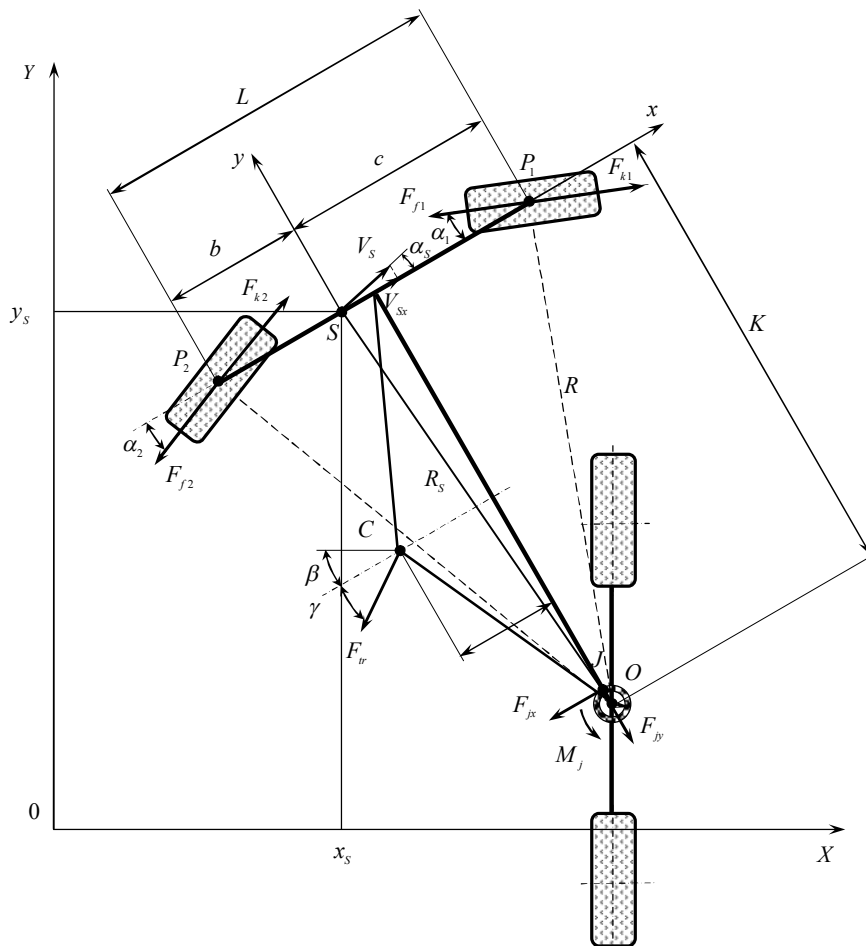


Рис.4 – Еквівалентна схема повороту (правостороннього) спеціалізованого ширококоліїного агрозасобу

Рівняння руху ширококоліїного агрозасобу, що описують статичну поворотність, відносно рухомої системи координат xSy представимо наступною системою відомих залежностей кінестатики:

$$\left. \begin{aligned} m_b a_{Sx} &= \sum F_{xj}; \\ m_b a_{Sy} &= \sum F_{yj}; \\ M_R &= \sum M_{Si}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де a_{Sx} , a_{Sy} – прискорення центра мас S вздовж осей x і y рухомої системи координат;

$\sum F_{xj}$, $\sum F_{yj}$ – сума проекцій j -тих сил на осі x і y рухомої системи координат;

M_R – сумарний момент опору повороту;

$\sum M_{Si}$ – сума i -тих моментів відносно центра мас S .

В розгорнутому вигляді система (5) прийме вигляд:

$$\left. \begin{aligned} m_b a_{Sx} &= (F_{k1} - F_{f1}) \cos \alpha_1 + (F_{k2} - F_{f2}) \cos \alpha_2 - F_{tr} \cos \gamma - F_{jx} \cos \alpha_S + F_{jy} \sin \alpha_S; \\ m_b a_{Sy} &= -(F_{k1} - F_{f1}) \sin \alpha_1 + (F_{k2} - F_{f2}) \sin \alpha_2 - F_{tr} \sin \gamma - F_{jy} \cos \alpha_S - F_{jx} \sin \alpha_S; \\ M_R &= c(F_{k1} - F_{f1}) \sin \alpha_1 + b(F_{k2} - F_{f2}) \sin \alpha_2 - F_{tr} \sin \gamma [0,5L + a] + 0,5K F_{tr} \cos \gamma - M_j, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де α_S , a , b і c – конструктивні параметри ширококолісного агрозасобу, природа яких зрозуміла з рис. 4.

Для дослідження динамічної поворотності ширококолісного агрозасобу скористаємося розрахунковою схемою на рис. 4. Його рух будемо розглядати в нерухомій системі координат XOY , пов'язаної з площиною поворотної смуги. Це дозволяє описати рух агрозасобу трьома незалежними узагальненими координатами x_S , y_S , β , де x_S , y_S – координати центру мас при русі в нерухомій системі координат XOY ; β – кут між осями абсцис рухомої і нерухомої системи координат.

Рівняння пласко-паралельного руху ширококолісного агрозасобу, які описують його динамічну поворотність, відносно нерухомої системи координат XOY представимо відомими залежностями:

$$\left. \begin{aligned} m_b \ddot{x}_S &= \sum F_{xj}; \\ m_b \ddot{y}_S &= \sum F_{yj}; \\ J_{zS} \ddot{\beta} &= \sum M_i, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де \ddot{x}_S – прискорення центра мас S вздовж осі X нерухомої системи координат;

\ddot{y}_S – прискорення центра мас S вздовж осі Y нерухомої системи координат;

J_{zS} – момент інерції відносно вертикальної осі Z (т. S);

$\ddot{\beta}$ – кутове прискорення агрозасобу на повороті.

Для складання динамічних рівнянь руху ширококолісного агрозасобу скористаємося принципом Д'Аламбера:

$$\left. \begin{aligned} m_b \ddot{x}_S &= (F_{k1} - F_{f1}) \cdot \cos(\beta + \alpha_1) + (F_{k2} - F_{f2}) \cdot \cos(\beta - \alpha_2) - F_{tr} \cdot \cos(\beta - \gamma); \\ m_b \ddot{y}_S &= -(F_{k1} - F_{f1}) \cdot \sin(\beta + \alpha_1) + (F_{k2} - F_{f2}) \cdot \sin(\beta - \alpha_2) - F_{tr} \cdot \sin(\beta - \gamma); \\ J_{zS} \ddot{\beta} &= c \cdot (F_{k1} - F_{f1}) \cdot \sin \alpha_1 + b \cdot (F_{k2} - F_{f2}) \cdot \sin \alpha_2 - F_{tr} \cdot \sin \gamma \cdot [0,5L + a] - M_R. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Початкові умови ($t=0$): $x_S = x_0$; $y_S = y_0$; $\beta = 0$; $\dot{x}_S = 0$; $\dot{y}_S = 0$; $\dot{\beta} = 0$.

З рис.4 взаємозв'язок кінематичних радіусів R_s і R , поступальної V_{sx} і окружної V_s швидкості центру мас S з конструктивними параметрами ширококолісного агрозасобу має вигляд:

$$R_s = \sqrt{(c - 0,5L)^2 + K^2} = \sqrt{R^2 - cL + c^2} = \sqrt{K^2 \left(1 + \frac{\mu^2}{4}\right) - c(\mu K + c)}. \quad (9)$$

За допомогою рівнянь (8) і (9) можна оцінювати вплив конструктивних параметрів спеціалізованого ширококолісного агрозасобу на критерії його динамічної поворотності, що дозволяє обґрунтовувати оптимальні значення кінематичних і силових параметрів при вчиненні динаміки кругового його руху на повороті.

Висновки

1. Запропонована нова схема розвороту спеціалізованого ширококолісного агрозасобу на поворотній смузі, шляхом повороту його шасі керованими колесами з одного борту навколо центру, розташованого в центрі міжколісного простору з іншого борту, дозволяє одночасно з поворотом переміщати агрозасіб на наступну робочу позицію з кращими кінематичними параметрами. При цьому покращення характеристик поворотності досягається при такому конструктивному виконанні ширококолісного агрозасобу, коли відношення його колісної бази до ширини колії є якомога меншим.

2. Отримані рівняння руху спеціалізованого ширококолісного агрозасобу для запропонованої нової схеми повороту дозволяють оцінити вплив його конструктивних, кінематичних і силових параметрів на критерії статичної та динамічної поворотності. Правильний вибір значень вказаних параметрів, з позиції необхідної поворотності, забезпечить рух спеціалізованого ширококолісного агрозасобу при повороті в оптимальному режимі і зменшує непродуктивні втрати енергії та площу поля під інженерну зону.

Література

1. Onal I. Controlled Traffic farming and Wide span tractors / I. Onal // Journal of Agricultural Machinery Science. – 2012. – 8(4). – P. 353–364.
2. Кувачов В.П. Спеціалізований транспортний засіб для колійного землеробства / В.П. Кувачов // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – 2014. – №148. – С. 63–69.
3. Кувачов В.П. Землевикористання при облаштуванні поля для роботи енерготехнологічних засобів мостового типу / В.П. Кувачов // Науковий вісник ТДАТУ. – 2013. – Вип.1, т.3. – С.116-126.
4. Кувачов В.П. Кінематика повороту ширококолісних засобів механізації сільськогосподарського виробництва для колійної системи землеробства / В.П. Кувачов // Вісник Сумського НАУ. – 2016. – Вип. 10/2 (30). – С. 46–49.
5. Улексін В.О. Автоматизація керування транспортним засобом у мостовому землеробстві / В.О. Улексін // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – 2011. – Вип.10, т.2. – С. 101–110.
6. Улексін В.О. Спеціалізований транспортний засіб для мостового землеробства / В.О. Улексін // Вісник КДПУ. – 2007. – Вип. 1/2007 (42). Ч.1. – С. 87–89.
7. Фаробин А.Я. Теория поворота транспортных машин / А.Я. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1970. – 174 с.
8. Тракторы: Теория: учебник / [Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. и др.]; под общ. ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.

9. Надикто В.Т. До питання поворотності МТА на основі МЕЗ / В.Т. Надикто, В.М. Кю-рчев // Праці Таврійського ДАТУ. – 2005. – Вип. 27. – С. 8–14.
10. Горин Г.С. Разработка гибридной теории установившегося поворота машинно-тракторного агрегата / Г.С. Горин, В.М. Головач, Я.Ю. Жгут // Агропанорама. – 2011. – №1. – С.91–109.

Summary

Kuvachov V.P. Theoretical justification of the turn of a wide span tractor (vehicle) for controlled traffic farming.

A new scheme of the turn of a wide span tractor (vehicle) is presented for controlled traffic farming on the turning strip. The turn of the tractor, according to the presented scheme, allows moving the tractor to the next working position with better kinematic parameters. In addition to it, the improvement of the turnability characteristics is achieved at such a design embodiment of a wide span tractor when the ratio of its wheelbase to the width of the wheeltrack is as small as possible. The obtained equations about the movement of the wide span tractor for the offered new scheme of the turn allow estimation of the impact of its design, performance, kinematic and power parameters upon the criteria of static and dynamic turnability. Correct choice of values of these parameters in terms of the required turnability ensures the movement of the wide span tractor on the turn in an optimal mode and minimises unproductive losses of energy and areas of the field under the engineering area.

Keywords: wide span tractor, turn, kinematics, dynamic turnability.

References

1. Onal I. Controlled Traffic farming and Wide span tractors / I. Onal // Journal of Agricultural Machinery Science. – 2012. – 8(4). – P. 353–364.
2. Kuvachov V.P. Specializovaniy transportnij zasib dlya kolijnogo zemlerobstva / V.P. Kuvachov // Visnik HNTUSG im. P. Vasilenka. – 2014. – №148. – S. 63–69.
3. Kuvachov V.P. Zemlevikoristannya pri oblashtuvanni polya dlya roboti energotekhnologichnih zasobiv mostovogo tipu / V.P. Kuvachov // Naukovij visnik TDATU.– 2013. – Vip.1, t.3. – S.116-126.
4. Kuvachov V.P. Kinematika povorotu shirokokolijnih zasobiv mekhanizacii sil's'kogospodars'kogo virobництва dlya kolijnoi sistemi zemlerobstva / V.P. Kuvachov // Visnik Sums'kogo NAU. – 2016. – Vip. 10/2 (30). – S. 46–49.
5. Uleksin V.O. Avtomatizaciya keruvannya transportnim zasobom u mostovomu zemlerobstvi / V.O. Uleksin // Visnik HNTUSG im. P. Vasilenko. – 2011. – Vip.10, t.2. – S. 101–110.
6. Uleksin V.O. Specializovaniy transportnij zasib dlya mostovogo zemlerobstva / V.O. Uleksin // Visnik KDPU.–2007. – Vip. 1/2007 (42). CH.1. – S. 87–89.
7. Farobin A.YA. Teoriya povorota transportnyh mashin / A.YA. Farobin. – M.: Mashinostroenie, 1970. – 174 s.
8. Traktory: Teoriya: uchebник / [Gus'kov V.V., Veleв N.N., Atamanov YU.E. i dr.]; pod obshch. red. V.V. Gus'kova. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 376 s.
9. Nadikto V.T. Do pitannya povortkosti MTA na osnovi MEZ / V.T. Nadikto, V.M. Kyurchev // Praci Tavrijs'kogo DATU. – 2005. – Vip. 27. – S. 8–14.
10. Gorin G.S. Razrabotka gibridnoj teorii ustanovivshegosya povorota mashinno-traktornogo agregata / G.S. Gorin, V.M. Golovach, YA.YU. ZHgut // Agropanorama. – 2011. – №1. – S.91–109.