

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВОРОТА
ШИРОКОКОЛЕЙНОГО АГРОСРЕДСТВА ДЛЯ КОЛЕЙНОЙ
СИСТЕМЫ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**

Белоев Х.¹, DrSc., Corresp. Member Prof. Eng.,

Кангалов П.¹, DHC, Prof. Eng.,

Митев Г.¹, PhD, Assos. prof. Eng.,

Кувачов В.², к.т.н.

¹Русенский университет имени Ангела Кинчева, Болгария

²Таврический государственный агротехнологический университет имени Дмитрия Моторного, Україна

Постановка проблемы. Особенностью использования ширококолейного агросредства для колейной системы земледелия является разделение поля на агротехническую и инженерную зоны [1-8]. Разворот ширококолейного агросредства на поворотной полосе может осуществляться разными способами. Каждый способ поворота оказывает влияние на кинематику его криволинейного движения. При этом желательно, чтобы непродуктивные затраты энергии на поворот и площадь под инженерную зону были как можно меньшими. С позиции минимизации непродуктивных потерь поля под инженерную зону необходимо иметь возможность осуществлять разворот ширококолейного агросредства таким образом, чтобы движители одного из его бортов оставались в пределах той же транспортно-технологической дорожки, на которой они находятся, а движители с другого борта перемещали его шасси на следующую рабочую позицию [9-11].

Свойство трактора осуществлять повороты с заданной кривизной траектории называют поворачиваемостью. Поворачиваемость характеризуется кинематическими и силовыми параметрами. Поэтому правильный выбор последних с позиции требуемой поворачиваемости обеспечит движение ширококолейного агросредства в оптимальном режиме и минимизирует непродуктивные потери энергии и площади поля при повороте. В силу чего робота, направленная на исследование статической и динамической поворачиваемости ширококолейного агросредства является актуальной.

Анализ последних исследований и публикаций. Управление поворотом современных моделей ширококолейного агросредства [12], оборудованных колесным движителем, адаптировано к ручному или автоматическому [13] режиму и строится за кинематическим или силовым принципом совершения поворота. При кинематическом повороте используются схемы поворотом управляемых колес

(передних, задних или одновременно и передних и задних) относительно остова машины. Также известен силовой (бортовой) способ изменения направления движения разворотом машины в взвешенном состоянии [14]. Использование последнего способа поворота, по мнению авторов научной публикации, эффективно в условиях ограниченного пространства на поворотной полосе и позволяет осуществлять разворот машины в автоматическом режиме без повреждения растений в зонах пересечения транспортных дорожек.

Теория статической и динамической поворачиваемости колесного транспортного средства достаточно изучена [15, 16]. Вопросу поворачиваемости сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов посвящено большое количество научных исследований [14-16]. Вместе с тем, полученные зависимости практически не могут быть использованы для анализа поворачиваемости ширококолейного агросредства. Причина заключается в принципиальной разнице конструктивной схемы и кинематической схемы его поворота в координатно-транспортной системе движения. Тем более непригодными для дальнейшего анализа являются результаты, полученные учеными при изучении динамики поворота традиционных машинно-тракторных агрегатов.

Целью исследований является обоснование кинематических и силовых параметров движения ширококолейного агросредства для колейной системы земледелия на повороте путем разработки теоретических основ его статической и динамической поворачиваемости.

Методы исследований. Теоретические исследования, синтез конструктивных схем и параметров ширококолейного агросредства осуществлялся путем моделирования на ПК условий его функционирования. В основу методов исследования положены методы теоретической механики, теории трактора и эксплуатации агрегатов, с использованием пакета Mathcad.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим две схемы поворота ширококолейного агросредства, кинематические параметры которого: радиус поворота, угловые и линейные скорости движения колес, траектория движения и др. – зависят от конструктивных и эксплуатационных факторов (колесной базы, ширины колеи, максимальных углов поворота управляемых колес, скорости их поворота, скорости движения, характеристик шин и т.п.). Согласно первой схемы, получившей наибольшее распространение среди современных моделей ширококолейного агросредства, поворот осуществляется движением всех управляемых колес трактора вокруг центра поворота, размещенного в центре симметрии его шасси (рис. 1а). Согласно второй схемы, предложенной нами, – разворот трактора осуществляется поворотом платформы шасси управляемыми

колесами с одного его борта вокруг центра поворота, размещенного в центре межколесного пространства другого борта (тут колеса при повороте могут оставаться в пределах своей транспортно-технологической дорожки) (рис. 1б).

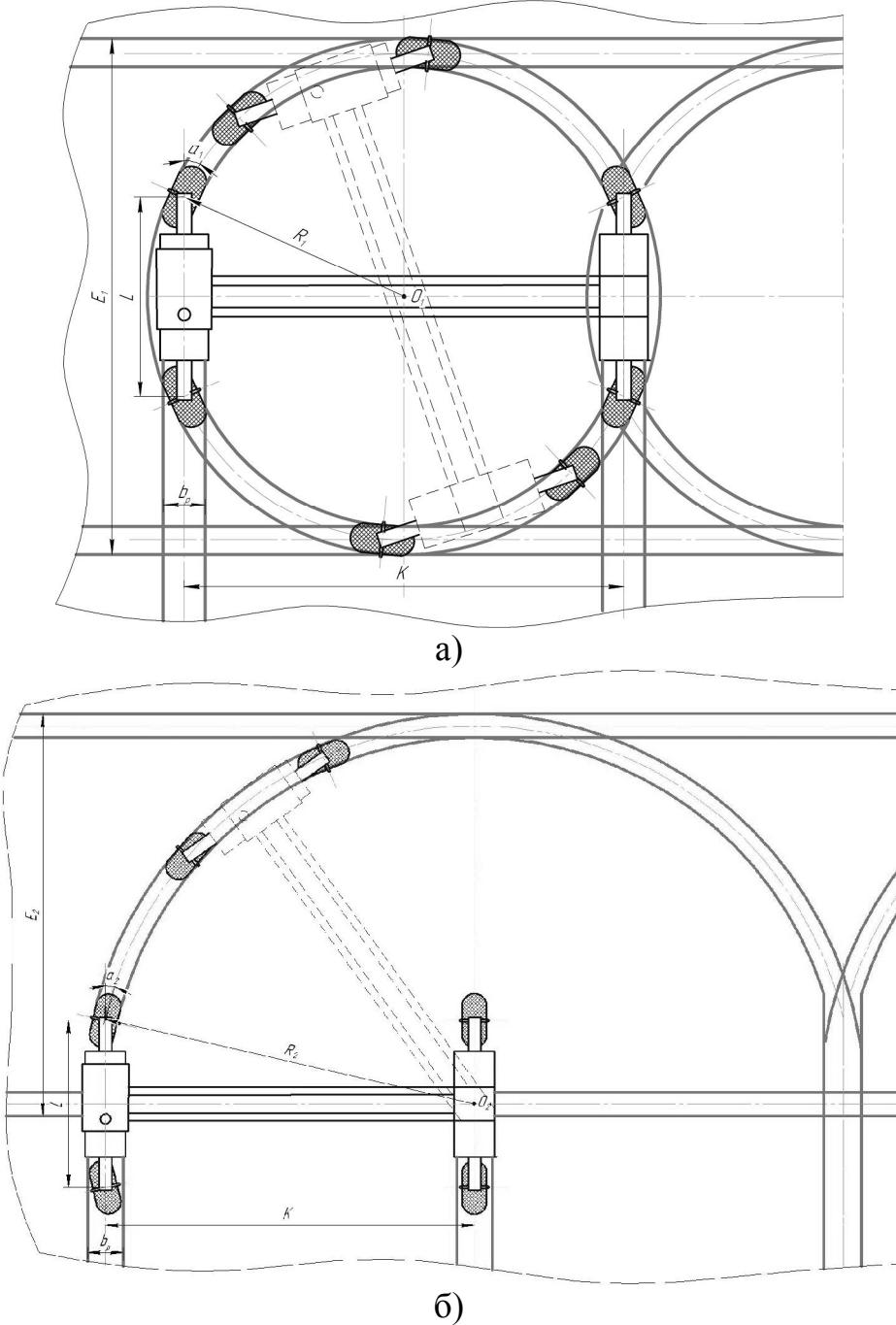


Рис. 1. Схемы разворота ширококолейного агросредства вокруг центра поворота, расположенного в центре симметрии шасси (а) и в центре межколесного пространства одного из бортов (б)

Технически реализовать предложенную нами схему поворота ширококолейного агросредства (рис. 1 б) можно как минимум двумя способами:

- 1) кинематическим поворотом платформы управляемыми колесами с одного борта с помощью шарнирного поворотного

механизма, расположенного в центре межколесного пространства с другого бока;

2) кинематически-силовым разворотом ширококолейного агросредства путем вывешивания одного его борта с помощью подъемных механизмов.

Проанализируем влияние основных конструктивных параметров ширококолейного агросредства на кинематические характеристики поворота двух рассматриваемых схем (рис. 1): радиус поворота, угол поворота управляемых колес, определяющие ширину поворотной полосы. Понятно, что величина желаемой ширины поворотной полосы E должна быть как можно меньшей и достаточной для проезда ширококолейного агросредства. Исходя из параметров их ходовой системы оптимальная ширина поворотной полосы при этом должна быть равна:

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

где K – ширина колеи ширококолейного агросредства;

b_p – ширина транспортной технологической дорожки.

Основные конструктивные параметры ширококолейного агросредства представим обобщенным характеристическим параметром μ , численно равным отношению его колесной базы L к ширине колеи K , что, как правило, не превышает 1:

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

Согласно традиционной схемы поворота ширококолейного агросредства (рис. 1а) связь кинематических показателей поворота (угла поворота колес α_1 ; радиуса поворота R_1 и действительной ширины поворотной полосы E_1) с конструктивными параметрами, представленными μ , можно выразить следующими зависимостями:

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

Согласно предложенной нами второй схемы поворота (рис. 1б) аналогично находим:

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

С помощью пакета Mathcad оценим влияние характеристического параметра μ ширококолейного агросредства на степень изменения действительной ширины поворотной полосы

относительно желаемой (рис. 2) и величину угла поворота управляемых колес (рис. 3) для двух рассматриваемых схем поворота.

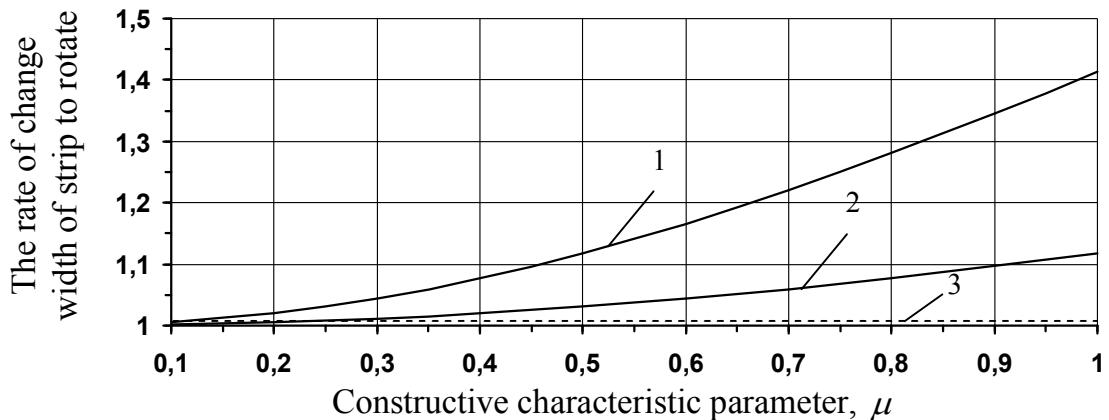


Рис. 2. Зависимость степени изменения действительной ширины поворотной полосы от конструктивного характеристического параметра μ для разных схем поворота ширококолейного агросредства: 1 – схема по рис. 1а; 2 – схема по рис. 1 б; 3 – желаемая характеристика

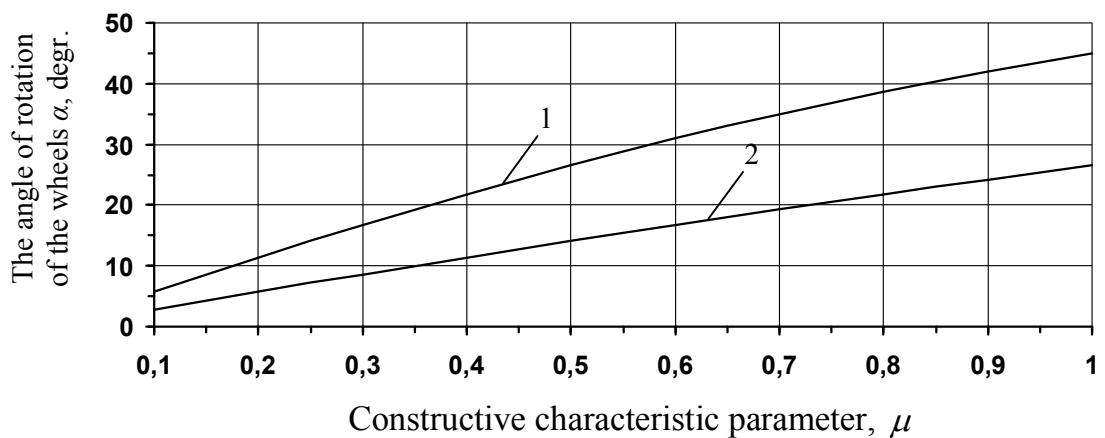


Рис. 3. Зависимость угла поворота управляемых колес ширококолейного агросредства от конструктивного характеристического параметра μ для разных схем поворота: 1 – схема на рис. 1а; 2 – схема на рис. 1 б;

Из анализа рис. 2 следует, что увеличение характеристического параметра μ ширококолейного агросредства нежелательно, поскольку увеличивает ширину поворотной полосы. Однако, степень и интенсивность такого увеличения для рассматриваемых схем поворота различна. Так, с увеличением μ до 1 ширина поворотной полосы по наиболее распространенной первой схеме поворота (рис. 1а) на 30% больше, чем для предложенной нами другой схемы (рис. 1 б). И если величина μ современных моделей ширококолейного агросредства не превышает $\mu < 0,5$, то увеличение ширины поворотной полосы по схеме на рис. 1 б не превышает 3% от желаемой. Такой

результат находится на уровне допустимого отклонения от идеального прямолинейного движения ширококолейного агросредства. В то время как организация поворота по распространенной схеме на рис. 1а требует увеличение ширины поворотной полосы до 12%, что весьма не желательно с позиции оптимального землеиспользования. Поэтому, с этой позиции, организация поворота ширококолейного агросредства по предложенной нами схеме на рис. 1б является более целесообразной.

Аналогичен и характер зависимости угла поворота управляемых колес α ширококолейного агросредства от μ (рис. 3). При повороте по схеме 1а угол α в 2 раза больший в сравнении со схемой на рис. 1б. Увеличение угла поворота управляемых колес α не желательно, поскольку требует соответствующего усложнения конструкции поворотного механизма колес и увеличения энергозатрат на этот процесс.

Рассмотренные нами кинематические параметры дают большую, но не полную информацию о криволинейном движении ширококолейного агросредства. Полная информация о возможности движения с заданными кинематическими параметрами может быть получена при определении силовых параметров (касательные силы тяги на ведущих колесах, затраты энергии трактором на преодоление суммарного момента сопротивления поворота и др.), характеризуемых статическую и динамическую поворачиваемость ширококолейного агросредства.

Для получения характеристик статической поворачиваемости рассмотрим круговое движение плоской модели ширококолейного агросредства вокруг центра поворота (т.О) (рис. 4) с постоянной угловой скоростью $\omega = \text{const}$, $\alpha = 0$. Управляемые колеса одного борта (в данном случае – левого) повернуты на углы α_1 и α_2 .

При составлении уравнений движения будем исходить из общепринятого понятия правильности поворота. Согласно которого – все ведущие колеса трактора (на рис. 4 – это два колеса левого борта) движутся без бокового скольжения, а пересечение их осей происходит в точке, которая является центром кривизны пройденного пути. Боковой увод колес здесь не учитываем, поскольку трактор совершает круговое вращение вокруг неподвижной оси и его движение в перпендикулярном направлении отсутствует. При этом учтем только те элементы ширококолейного агросредства, которые совершают плоскопараллельные движения. Тангенциальные силы инерции и инерционные моменты сопротивления повороту ширококолейного агросредства и его технологической части из-за их абсолютной малости в исследования не учитываются.

С ширококолейного агросредства жестко свяжем подвижную систему координат xSy, начало которой поместим в центр масс его левого борта (т.S). Ось x направим параллельно к продольной оси

трактора, а ее положительное направление направим в сторону движения.

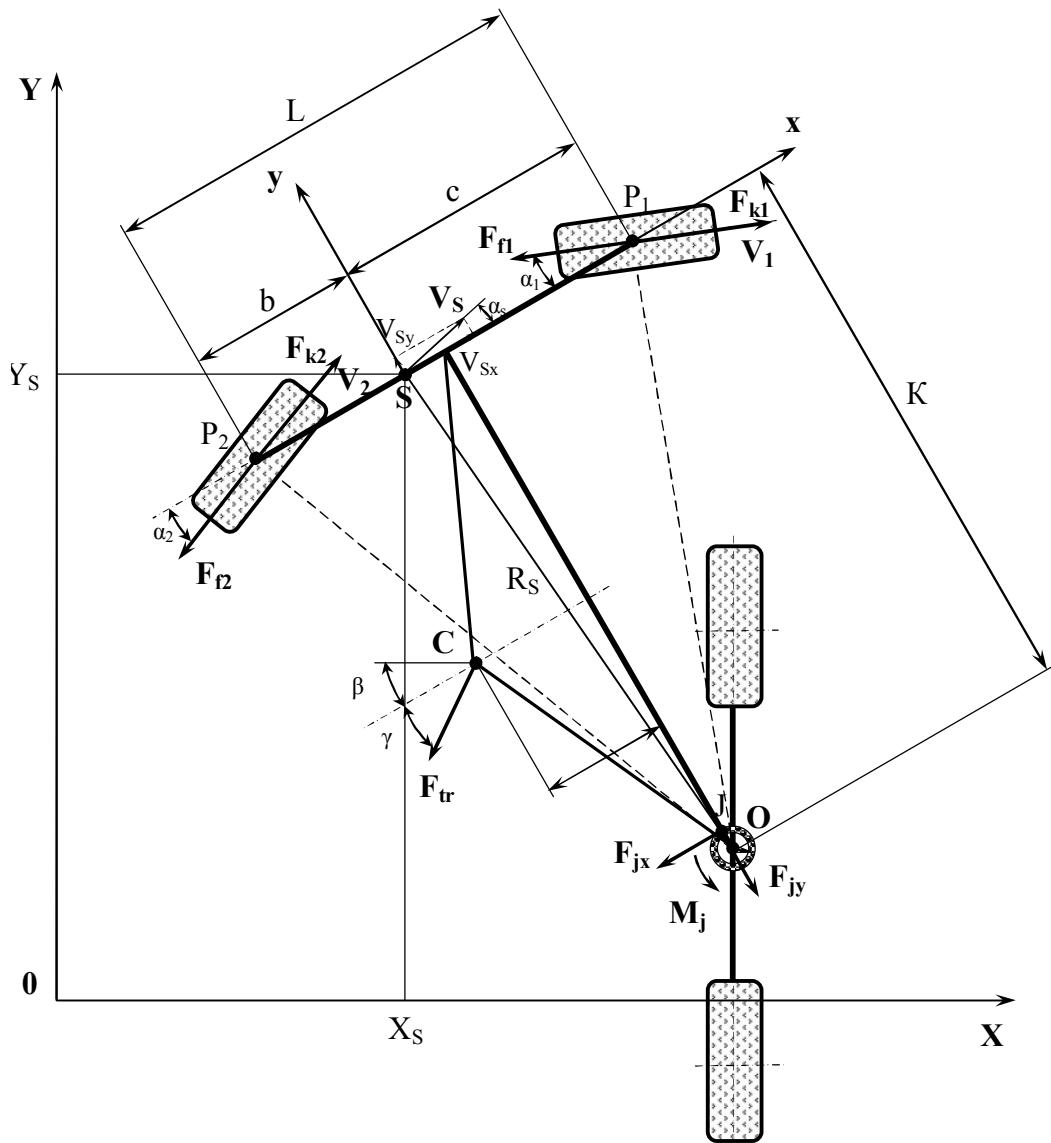


Рис. 4. Эквивалентная схема поворота (правостороннего) ширококолейного агросредства с управляемыми колесами левого борта

В режиме поворота на ширококолейного агросредства действуют ряд соответствующих сил. В первую очередь, это движущие силы передних и задних управляемых колес (в нашем случае – левых) F_{k1} и F_{k2} и силы сопротивления движению F_{f1} и F_{f2} , приложенные в их центре (т. P_1 и P_2) и сила инерции. Для совершения дальнейших действий именно в этих точках целесообразно разместить разделенную на две части (m_1 и m_2) массу m_b , приходящуюся на его левый борт. Влияние сопротивления рабочих органов технологической части трактора представим главным вектором F_{tr} , приложенным в центре сопротивления (т. C), направление действия которого на повороте составляет с продольной трактора угол γ . Реакции, возникающие в

шарнирном поворотном механизме ширококолейного агросредства, представим силами F_{jx} и F_{jy} , приложенными в т. J, а также моментом сопротивления M_j .

Уравнение движения ширококолейного агросредства, описывающие статическую поворачиваемость, относительно подвижной системы координат xSy представим следующей системой известных зависимостей кинетостатики:

$$\left. \begin{aligned} m_b \ddot{a}_{sx} &= \sum F_{xj}; \\ m_b \ddot{a}_{sy} &= \sum F_{yj}; \\ \dot{I}_R &= \sum \dot{I}_{si}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где a_{sx} , a_{sy} – ускорения центра масс S вдоль осей x и y подвижной системы координат; $\sum F_{xj}$, $\sum F_{yj}$ – сумма проекций j-тих сил на оси x и y подвижной системы координат; M_R – суммарный момент сопротивлению поворота; $\sum \dot{I}_{si}$ – сумма i-тих моментов относительно центра масс S.

В развернутом виде система (5) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} m_b \ddot{a}_{sx} &= (F_{k1} - F_{f1}) \cos \alpha_1 + (F_{k2} - F_{f2}) \cos \alpha_2 - F_{tr} \cos \gamma - F_{j0} \cos \alpha_s + F_{jy} \sin \alpha_s; \\ m_b \ddot{a}_{sy} &= -(F_{k1} - F_{f1}) \sin \alpha_1 + (F_{k2} - F_{f2}) \sin \alpha_2 - F_{tr} \sin \gamma - F_{jy} \cos \alpha_s - F_{j0} \sin \alpha_s; \\ M_R &= c(F_{k1} - F_{f1}) \sin \alpha_1 + b(F_{k2} - F_{f2}) \sin \alpha_2 - F_{tr} \sin \gamma [0,5L + \dot{\alpha}] + 0,5K F_{tr} \cos \gamma - M_j, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где α_s , a, b и c – конструктивные параметры ширококолейного агросредства, природа которых понятна из рис. 4.

Для исследования динамической поворачиваемости ширококолейного агросредства воспользуемся расчетной схемой на рис. 4. Движение трактора будем рассматривать в неподвижной системе координат X0Y, связанной с плоскостью поворотной полосы. Это позволяет описать движение ширококолейного агросредства тремя независимыми обобщенными координатами X_s , Y_s , β , где X_s , Y_s – координаты центра масс S при движении в неподвижной системе координат X0Y; β – угол между осями абсцисс подвижной и неподвижной системы координат.

Под действием движущих сил F_{k1} и F_{k2} передних и задних левых колес агросредства при наличии сил сопротивления F_{fl} , F_{f2} и F_{kp} и момента сопротивления повороту M_{op} центр масс левого борта (т.С) движется в направлении его окружной скорости V_c , что составляет при повороте с осью x угол α_c .

Для составления динамических уравнений движения агрозасобу воспользуемся принципом Д'Аламбера:

$$\begin{aligned}
 1) \quad & m_a \ddot{x} = (F_{k_1} - F_{f_1}) \cdot \cos(\beta + \alpha_1) + (F_{k_2} - F_{f_2}) \cdot \cos(\beta - \alpha_2) - F_{e\dot{\theta}} \cdot \cos(\beta - \gamma); \\
 2) \quad & m_a \ddot{y} = -(F_{k_1} - F_{f_1}) \cdot \sin(\beta + \alpha_1) + (F_{k_2} - F_{f_2}) \cdot \sin(\beta - \alpha_2) - F_{e\dot{\theta}} \cdot \sin(\beta - \gamma); \\
 3) \quad & J_{zc} \ddot{\beta} = c \cdot (F_{k_1} - F_{f_1}) \cdot \sin \alpha_1 + b \cdot (F_{k_2} - F_{f_2}) \cdot \sin \alpha_2 - F_{e\dot{\theta}} \cdot \sin \gamma \cdot [0,5L + \dot{a}] - M_{c.c.}
 \end{aligned} \quad (7)$$

где \ddot{x} – ускорения центра масс левого борта, которое направлено вдоль оси X ;

\ddot{y} – ускорения центра масс левого борта, которое направлено вдоль оси Y ;

J_{zc} – момент инерции агрозасобу относительно вертикальной оси Z .

С помощью уравнений (6) и (7) можно оценивать влияние конструктивных и эксплуатационных параметров агросредства на критерии поворачиваемости ширококолейного агросредства. К последним относят, минимальный радиус поворота при круговом движении; предельное значение скорости изменения кривизны траектории; количество энергии, затрачиваемой на поворот; удельную силу тяги, необходимую для выполнения поворота и др. С позиции оптимальной статической и динамической поворачиваемости представляется возможным обосновывать значения конструктивных и эксплуатационных параметров агросредства.

Выходы.

1. Обоснован способ поворота ширококолейного агросредства, согласно которого управляемые колеса с одного борта перемещают его на следующий перегон, при этом колеса с другой стороны остаются неподвижными в пределах той же технологической колеи в которых они находятся. Разработанная теория поворота позволяет исследовать его статическую и динамическую поворачиваемость.

2. Наименьший радиус поворота ширококолейного агросредства можно достичь в случае, когда величина его колесной базы была как можно меньше и не превышала по своему абсолютному значению 25% от ширины корлеи. По указанному условию наименеешим есть и угол поворота управляемых колес ширококолейного агросредства, что желательно с позиции технического исполнения механизма привода и наименьших энергозатрат на этот процесс.

3. Кинематический показатель режима осуществления поворота ширококолейного агросредства по новому способу существенно зависит от характеристического параметра, численно равного отношению колесной базы к ширине колеи. Установлено, что для получения оптимального режима поворачиваемости ширококолейных агросредств с увеличением ширины их колеи увеличивается. По абсолютной величине показатель режима поворота изменяется от 5,8 м/рад и достигает более 60 м/рад.

4. Оценка затрат энергии ширококолейного агросредства на преодоление суммарного сопротивления повороту, по результатам

исследования статической поворачиваемости, показала, что с увеличением скорости его движения, вследствие увеличения центробежной инерционной нагрузке на поворотный механизм, увеличиваются непроизводительные затраты мощности на преодоление сопротивления в поворотном механизме. А с увеличением величины характеристического параметра μ непроизводительные затраты на преодоление сопротивления в поворотном механизме наоборот имеют тенденцию к уменьшению. Наиболее интенсивно этот процесс наблюдается для агросредств с шириной колеи $K = 12$ м, и, соответственно, с уменьшением этого параметра – более медленно.

5. Результат определения удельной силы тяги, необходимой для выполнения поворота ширококолейного агросредства, по результатам исследования динамической поворачиваемости, показал, что при осуществлении поворота последним на малой скорости движения (0,5 м/с) реализуемая им движущая сила тяги позволяет иметь угол поворота агросредства в фазе его разгона даже менее 10 град., что является желательным. При увеличении скорости движения до 1,0 м/с угол фазы разгона на повороте агросредства увеличивается до 30 град. Достичь скоростного режима на повороте до 2,0 м/с уже становится проблематичным. Поскольку требует увеличить фазу разгона указанного агрозасобу до угла поворота по меньшей мере в 140 град. А это значит, что почти весь путь на повороте он должен двигаться с ускорением, что не является желательным.

Список литературы.

1. Кувачов В.П. Кінематика повороту ширококолійних засобів механізації сільськогосподарського виробництва для колійної системи землеробства. *Вісник Сумського НАУ*. 2016. Вип. 10/2 (30). С. 46-49.
2. Улексін В.О. Автоматизація керування транспортним засобом у мостовому землеробстві. Вісник Харківського НТУСГ ім. П.Василенко. 2011. Вип. 10, т.2. С. 101-110.
3. Bulgakov V., Adamčuk V., Nozdrovický L., Kuvačov V. Study of effectiveness of controlled traffic farming system and wide span self-propelled gantry-type. *Research in Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 64, (1): P.1–7.
4. Bulgakov V., Ivanovs S., Nadykto V., Kuvachov V., Masalabov V. Research on the turning ability of a two-machine aggregate. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 54, №.1. P. 139-146.
5. Bulgakov V, Arak M., Olt J., Holovach I., Kuvachov V. Study of special aspects of hitching to wide span tractors (vehicles). *International scientific journal "mechanization in agriculture"*. 2018. YEAR LXIV, ISSUE 4. P. 111-113.

6. Adamchuk V. V., Bulgakov V. M., Holovach I. V., Kuvachov V. P. Studying the conditions of assembling traction-drive soil-processing aggregates with tractors of traction-energy concept. *Agricultural Science and Practice*. 2018, Vol. 5, No. 2. P. 27-36.
7. Bulgakov V. et al. Theoretical study on linkage unit of wide span tractor. 29TH DAAAM International symposium on intelligent manufacturing and automation. (24h-27th October 2018, Zadar, Croatia). 2018. 10 p.
8. Bulgakov V., Kuvachov V., Nozdrovický L. The study of movement of the wide span tractor-based field machine unit with power method of its control. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018, №3. P. 163–168.
9. Kuvachov V.P. Justification of the parameters a rear-mounted linkage wide span tractor (vehicle). *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, 2019. Вип. 199. С. 32-48.
10. Bulgakov V. et al. Theoretical study of transverse offsets of wide span tractor working implements and their influence on damage to row crops. *Agriculture*. 2019. №9, P. 144.
11. Bulgakov V., Kuvachov V., Olt J. Theoretical study on power performance of agricultural gantry systems. *Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation"*. (23-26th October 2019, Vienna, Austria). 2019. Vol. 30, №.1. P. 0167-0175.
12. Кувачов В.П. Експериментальні випробування агромостового боронувального агрегату. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип. 19. Том 4. С. 223-233.
13. Кувачов В.П. Дослідження ефективності колійної системи землеробства. *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний збірник*. 2017. Вип. 5(104). С. 94-104.
14. Надикто В.Т., Улексін В.О. Колійна та мостова системи землеробства. Монографія. 2008. 270 с.
15. Adamchuk V. Mathematical modelling of the movements of tractor working tools in controlled traffic farming. *Agricultural Science and Practice*. 2017. Vol. 4, №2. P. 64-73.
16. Адамчук В.В. Теоретичне дослідження руху робочих органів ширококолійного агрозасобу. *Вісник аграрної науки*. 2017. №10. С. 44-50.