

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПОВОРОТА КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

Александр Николаевич Беляев, кандидат технических наук, зав. кафедрой прикладной механики
Татьяна Владимировна Тришина, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.1.115

Целью исследования является вывод аналитических выражений для определения кинематических параметров криволинейного движения колесной машины при исследовании кинематики ее поворота. Предметом исследований является наиболее универсальный способ поворота трактора, при котором изменение направления криволинейного движения осуществляется поворотом передних и задних управляемых колес относительно его остова в разные стороны. В результате проведенного анализа выявлено, что известные расчетные формулы, применяемые для исследования кинематики поворота трактора и автомобиля, имеют существенные недостатки ввиду принимаемых при их выводе допущений, в них также не установлена взаимосвязь между начально-исходными данными. В работе предложены методики выводов формул для соотношений между углами поворотов передних и задних управляемых колес, средними углами поворота колес мостов трактора. Вывод формул осуществлен различными способами, расчеты по которым дают идентичные результаты, что позволяет сделать вывод о корректности полученных зависимостей. Установлена взаимосвязь между начальными известными конструктивными и эксплуатационными характеристиками для определения кинематических параметров криволинейного движения колесного трактора. Именно полученные в результате предварительного расчета величины теоретического радиуса и должны применяться при исследовании кинематики поворота и криволинейного движения колесной машины. Предложенные формулы являются универсальными и могут быть использованы для большинства кинематических способов поворота, если принимать при расчетах равными нулю углы поворотов соответствующих колес, что позволит и на стадии проектирования, и в процессе эксплуатации колесной машины как с передними и задними управляемыми, так и со всеми управляемыми колесами поворотом их в разные стороны относительно остова с высокой степенью точности оценить кинематику ее поворота.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: колесная машина, способ поворота, криволинейное движение, кинематические параметры.

The objective of research was to obtain analytical expressions for determining the kinematic parameters of curvilinear movement of a wheel car when studying its rotational kinematics. The subject of research was the most universal way of turning of a tractor, at which the changing of curvilinear movement direction is carried out by turning the front and rear steered wheels in different directions relative to the frame. As a result of analysis it was revealed that known calculation formulas applied to study the kinematics of turning of tractors and vehicles have essential drawbacks due to their assumptions and the unestablished interrelation between the initial data. The authors propose the techniques for determining the formulas for ratios between corners of turning of front and rear steered wheels, and average angles of rotation of wheels of tractor axles. Formulas were determined by various ways with the calculation results being identical, which allows concluding about the correctness of the obtained dependences. The authors have established an interrelation between initial known constructive and operational characteristics for the determination of kinematic parameters of curvilinear movement of a wheel tractor. The values of theoretical radius obtained as a result of preliminary calculation should be used in studying rotational kinematics and curvilinear movement of a wheel car. The proposed formulas are universal and can be used for the majority of rotational kinematic modes, if corners of turning of the corresponding wheels are taken as zero at calculation. Application of the obtained formulas will allow estimating the kinematics of turning movement both at the designing stage and during the operation of wheel cars with both front and rear steered wheels and with all-wheel steering when turning the wheels in different directions relative to the frame.

KEY WORDS: wheel car, way of turning, curvilinear movement, kinematic parameters.

На большинстве современных транспортных средств для управления применяется кинематический способ поворота, который реализуется, как правило, поворотом управляемых колес относительно остова [1, 5, 6, 8, 9, 10] (рис. 1, а, б).

Его суть заключается в том, что каждое управляемое колесо может поворачиваться в горизонтальной плоскости относительно собственной оси поворота. Для синхронизации поворота колес одной оси предусмотрена рулевая трапеция, которая обеспечивает поворот правого и левого колес на разные углы, что позволяет им катиться на повороте по разным радиусам без проскальзывания.

Данная конструкция имеет следующие преимущества: колеса занимают при поворотах небольшой объем внутри конструкции машины. Для поворота колес требуются незначительные усилия, близкое расположение колеса к оси его поворота уменьшает удары, передающиеся от дороги на рулевое управление.

Двухосные транспортные средства имеют, как правило, одну переднюю ось с управляемыми колесами. Иногда для улучшения маневренности такие транспортные средства снабжают всеми управляемыми колесами, но при этом усложняется конструкция рулевого управления и возникают проблемы с управляемостью на высокой скорости. Для этого при движении с высокими скоростями принудительное управление задними колесами отключают, а колеса фиксируют в нейтральном положении.

Автомобили и колесные универсально-пропашные тракторы поворачивают по первому способу (рис. 1, а), наиболее распространенному по сравнению с другими способами поворота колесных машин. Обычно передние колеса являются управляемыми (рис. 1, а) и имеют меньший диаметр, чем задние колеса. На самоходных шасси, предназначенных для работы с широкозахватными жатками, задние колеса являются управляемыми и меньшего диаметра, чем ведущие передние.

Некоторые полноприводные тракторы выполнены со всеми управляемыми колесами. Изменение направления движения такой колесной машины осуществляется поворотом передних и задних колес в разные стороны относительно остова (рис. 1, б).

Недостатками способа поворота транспортных средств с управляемыми колесами являются: относительная сложность привода рулевого управления, особенно у машин со всеми управляемыми колесами, например [3, 7, 9]; трудность получения малого радиуса поворота; увеличение минимальной колеи, при которой повернутые на максимальный угол управляемые колеса не касаются остова. Эти недостатки особенно существенны при колесах большого диаметра.

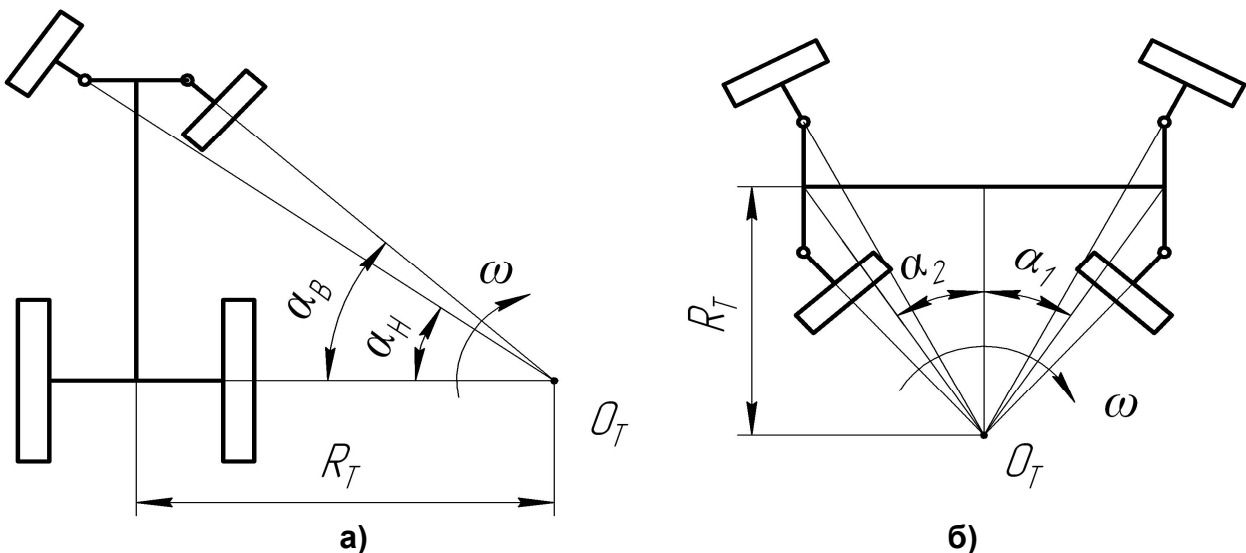


Рис. 1. Кинематические способы поворота колесных машин с управляемыми колесами

Рулевое управление транспортного средства должно обеспечивать ощущаемую водителем связь между углом поворота рулевого колеса и направлением движения колесной машины, обладать высокой надежностью. Усилия, необходимые для управления, не

должны приводить к повышенной утомляемости водителя и в то же время должны информировать его о состоянии контакта управляемых колес с дорогой (обеспечивать «чувство дороги»). От рулевого управления зависит минимальный радиус поворота транспортного средства на ограниченных площадях. Конструкция рулевого управления не должна передавать ударные нагрузки от неровностей дороги на руки водителя [9].

Все перечисленные выше требования учитываются при проектировании рулевого управления. Однако известные расчетные формулы для исследования кинематики вышеприведенных способов поворота имеют множество допущений, которые существенно влияют на конечный результат. Например, средний угол поворота управляемых колес определяется как половина суммы углов поворота внутреннего и наружного колес, а величины радиусов поворота вычисляются по их значениям.

Целью исследования является получение аналитических выражений для определения некоторых кинематических параметров криволинейного движения колесной машины: углов поворота управляемых колес, радиусов поворота характерных точек трактора.

Нами для исследования выбран способ поворота, при котором изменение траектории криволинейного движения осуществляется поворотом передних и задних колес в разные стороны относительно остова по схеме рис. 1, б ввиду его универсальности [2, 4, 9, 10].

Кинематические параметры криволинейного движения: радиус поворота мобильного энергетического средства, смещение центра поворота, угловые и линейные скорости движения колес, траектория его движения и др. – зависят от конструктивных и эксплуатационных факторов (базы, способа поворота, максимальных углов поворота управляемых колес, скорости их поворота, скорости движения, характеристик шин и грунта и т. п.).

Исходными для определения кинематических параметров криволинейного движения являются следующие конструктивные и эксплуатационные характеристики:

- теоретический радиус поворота R_T – кратчайшее расстояние от мгновенного центра поворота до продольной оси мобильного энергетического средства, определяемый без учета явления бокового увода шин (жесткие в боковом направлении шины), так как его значение приводится в технических характеристиках;

- база мобильного энергетического средства $L = b + d$ (где b – расстояние от задней оси до центра тяжести C , d – расстояние от передней оси до центра тяжести C);

- расстояние между осями шкворней B ;

- плечо обката a , углы поворотов передних и задних внутренних управляемых колес, соответственно α'_1 и α'_2 – максимальные значения α'_1 и α'_2 определяются (ограничиваются) конструкцией мобильного энергетического средства.

Для того чтобы жесткие в боковом направлении колеса катились без скольжения, каждое из них нужно повернуть на такой угол, при котором перпендикуляры к плоскостям вращения колес пересекаются в одной точке O – кинематическом центре поворота, а ее проекция (E) на продольную ось – полюс рулевого управления [9].

Получим выражения для определения некоторых из перечисленных кинематических параметров. Используя подобие треугольников (по трем углам) P_1OE и P_1PD (рис. 2), получаем

$$P_1D = \frac{B}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha'_1 . \quad (1)$$

Из треугольника OEP_1 имеем

$$P_1E = R_T \cdot \operatorname{tg} \alpha'_1 . \quad (2)$$

Используя отношения (рис. 2)

$$\frac{P_1O}{P_1P} = \frac{OE}{PD} = \frac{P_1E}{P_1D}$$

с учетом (1) и (2), получаем

$$DE = P_1E - P_1D = \operatorname{tg}\alpha'_1 \left(R_T - \frac{B}{2} \right). \quad (3)$$

Так как радиус поворота центра тяжести (рис. 2)

$$R_C = \sqrt{CE^2 + R_T^2}$$

и с учетом (3)

$$CE = DE - DC = \operatorname{tg}\alpha'_1 \left(R_T - \frac{B}{2} \right) - d,$$

то

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{CE}{R_T} = \frac{\operatorname{tg}\alpha'_1 \left(R_T - \frac{B}{2} \right) - d}{R_T}; \quad (4)$$

$$R_C = \sqrt{\left(\operatorname{tg}\alpha'_1 \left(R_T - \frac{B}{2} \right) - d \right)^2 + R_T^2}; \quad (5)$$

$$\operatorname{tg}\alpha_{1cp} = \frac{DE}{R_T} = \frac{\operatorname{tg}\alpha'_1 \left(R_T - \frac{B}{2} \right)}{R_T} = \frac{\operatorname{tg}\alpha'_1 (2R_T - B)}{2R_T}, \quad (6)$$

где α_{1cp} – средний угол поворота передних колес.

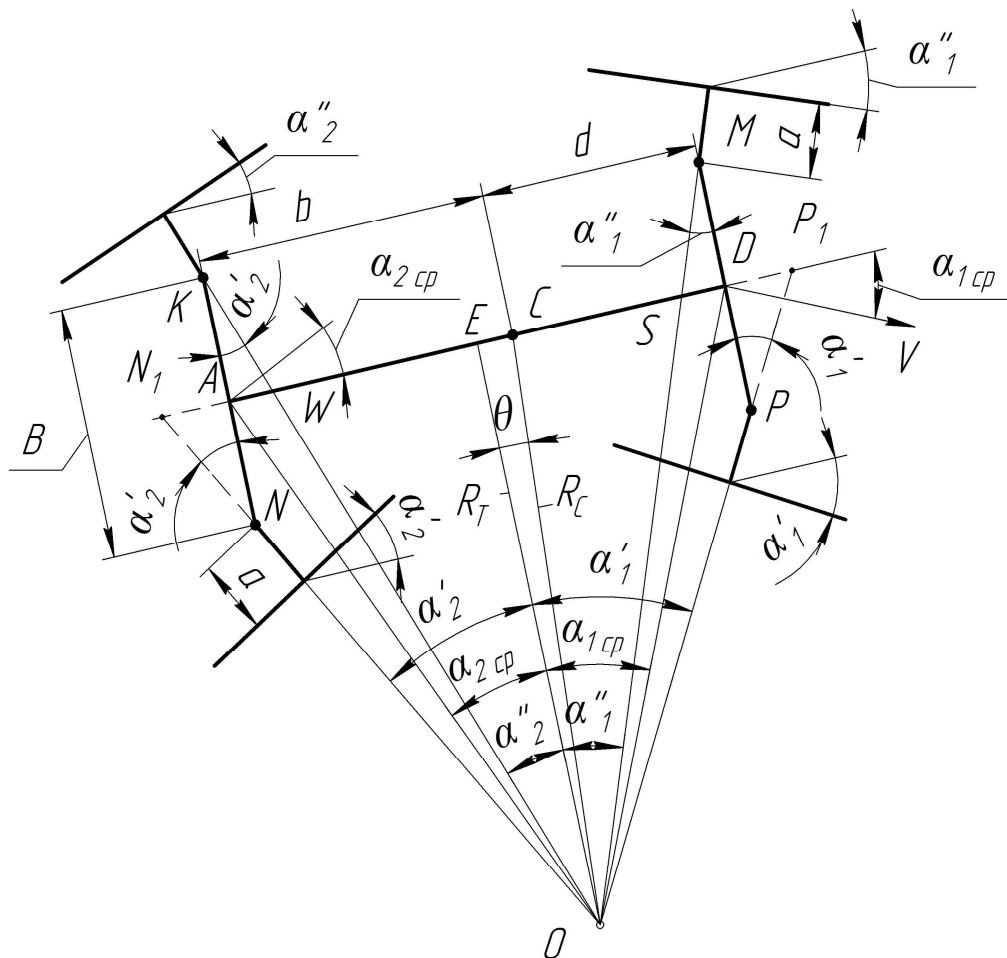


Рис. 2. Расчетная схема колесного трактора со всеми управляемыми колесами

Из подобия треугольников (по трем углам) SMD и SOE (рис. 2) имеем отношения

$$\frac{SM}{SO} = \frac{MD}{OE} = \frac{SD}{SE},$$

используя которые, получаем

$$SE = \frac{2R_T \cdot (DE - SE)}{B}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) выражение (3), после преобразований получаем

$$SE = \frac{R_T \cdot \operatorname{tg}\alpha'_1(2R_T - B)}{2R_T + B}. \quad (8)$$

Тангенс угла поворота внешнего переднего управляемого колеса получаем из треугольника OSE (рис. 2) и из выражения (8):

$$\operatorname{tg}\alpha_1'' = \frac{SE}{OE} = \frac{R_T \cdot \operatorname{tg}\alpha'_1(2R_T - B)}{2R_T + B} \cdot \frac{1}{R_T} = \frac{\operatorname{tg}\alpha'_1(2R_T - B)}{2R_T + B}. \quad (9)$$

С учетом формулы (3)

$$AE = L - DE = L - \operatorname{tg}\alpha'_1\left(R_T - \frac{B}{2}\right), \quad (10)$$

определяем тангенс среднего угла поворота задних управляемых колес из треугольника OAE

$$\operatorname{tg}\alpha_{2cp} = \frac{AE}{OE} = \frac{L - \operatorname{tg}\alpha'_1\left(R_T - \frac{B}{2}\right)}{R_T} = \frac{2L - \operatorname{tg}\alpha'_1(2R_T - B)}{2R_T}. \quad (11)$$

Из подобия треугольников (по трем углам) WEO и WAK и отношения

$$\frac{WE}{WA} = \frac{EO}{AE}$$

получаем

$$WE = \frac{2R_T \cdot AE}{B + 2R_T}. \quad (12)$$

Из треугольника WEO с учетом (10) и (12) определяем тангенс угла поворота внешнего заднего колеса

$$\operatorname{tg}\alpha_2'' = \frac{WE}{OE} = \frac{2R_T \cdot AE}{(B + 2R_T)R_T} = \frac{2AE}{B + 2R_T} = \frac{2(L - \operatorname{tg}\alpha'_1\left(R_T - \frac{B}{2}\right))}{2R_T + B} = \frac{2L - \operatorname{tg}\alpha'_1(2R_T - B)}{2R_T + B}. \quad (13)$$

Результаты. Проведя аналогичные преобразования через угол поворота внутреннего заднего колеса, получим следующие выражения для тангенсов углов поворота α_1'' и α_2'' и тангенсов средних углов α_{1cp} и α_{2cp} :

$$\operatorname{tg}\alpha_{1cp} = \frac{L - \operatorname{tg}\alpha'_2\left(R_T - \frac{B}{2}\right)}{R_T}; \quad (14)$$

$$\operatorname{tg}\alpha_1'' = \frac{L - \operatorname{tg}\alpha'_2\left(R_T - \frac{B}{2}\right)}{R_T + \frac{B}{2}}; \quad (15)$$

$$\operatorname{tg}\alpha_{2cp} = \frac{(2R_T - B)\operatorname{tg}\alpha'_2}{2R_T}; \quad (16)$$

$$\operatorname{tg}\alpha_2'' = \frac{\operatorname{tg}\alpha_2' \cdot (2R_T - B)}{2R_T + B}. \quad (17)$$

Сравнивая результаты расчетов, полученных соответственно по формулам (6) и (14), (9) и (15), (11) и (16), (13) и (17) при одинаковых исходных данных, можно убедиться в их идентичности, что позволяет сделать вывод о корректности проведенных исследований.

Следует отметить, что в исходных данных при этих расчетах значение теоретического радиуса поворота R_T следует предварительно определить по формуле, устанавливающей взаимосвязь между начальными конструктивными и эксплуатационными характеристиками. Определим эту связь.

Так как

$$R_T = P_1 O \sin(90^\circ - \alpha_1')$$

или

$$R_T = N_1 O \sin(90^\circ - \alpha_2'),$$

то

$$R_T = \frac{P_1 N_1 \sin(90^\circ - \alpha_2')}{\sin(\alpha_1' + \alpha_2')} \sin(90^\circ - \alpha_1') = \frac{P_1 N_1 \cos \alpha_1' \cos \alpha_2'}{\sin(\alpha_1' + \alpha_2')}.$$

После преобразований получаем окончательно

$$R_T = \sqrt{\frac{\frac{B}{2}(\operatorname{tg}\alpha_1' + \operatorname{tg}\alpha_2') + L}{\sin(\alpha_1' + \alpha_2')}} \cos \alpha_1' \cos \alpha_2'. \quad (18)$$

Эти же значения R_T (18) также должны быть использованы в формулах (4) и (5) и в любых других подобных расчетах по определению углов поворота, траектории движения, радиусов поворота.

Вывод. Таким образом, использование полученных формул позволит и на стадии проектирования, и в процессе эксплуатации колесной машины, как только с передними и задними управляемыми, так и со всеми управляемыми колесами поворотом их в разные стороны относительно остова, с высокой степенью точности оценить кинематику ее поворота. Разновариантность методик выводов формул и полученные по ним результаты для одних и тех же параметров дают основание сделать вывод о корректности проведенных исследований.

Список литературы

1. Барский И.Б. Динамика тракторов / И.Б. Барский, В.Я. Анилович, Г.М. Кутьков. – Москва : Машиностроение, 1973. – 280 с.
2. Беляев А.Н. Улучшение характеристик криволинейного движения комбинированного МТА на базе колесного трактора класса 2 ЛТЗ применением упруго-демпфирующего привода колес : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / А.Н. Беляев. – Воронеж, 1995. – 22 с.
3. Козлов Д.Г. Математическая модель и результаты математического моделирования силового воздействия трактора на почву / Д.Г. Козлов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2013. – № 2. – С. 267-276.
4. Козлов Д.Г. Снижение динамической нагруженности почвы при криволинейном движении комбинированного МТА на базе трактора тягового класса 2 : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Д.Г. Козлов. – Воронеж, 2013. – 174 с.
5. Матяш С.П. Теория трактора и автомобиля : краткий курс лекций / С.П. Матяш, П.И. Федюнин, С.П. Сальников. – Новосибирск : НГАУ, 2010. – 83 с.
6. Мирошниченко А.Н. Основы теории автомобиля и трактора : учеб. пособие / А.Н. Мирошниченко. – Томск : Изд-во Томского гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – 490 с.
7. Пат. 2277488 Российская Федерация, МПК С1 В62 D 7/14 (2006.01). Система рулевого управления транспортного средства со всеми управляемыми колесами / А.Н. Беляев, В.И. Калашник, Е.М. Попов, Д.Г. Козлов, В.И. Крюков ; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный аграрный университет им. К.Д. Глинки. – № 2004138956/11; заявл. 30.12.2004; опубл. 10.06.2006, Бюл. № 24. – 7 с.
8. Сазонов И.С. Кинематика поворота колесного трактора с реальной рулевой трапецией / И.С. Сазонов, Ю.Е. Атаманов, С.Н. Турлай // Вестник Могилевского гос. техн. ун-та. – 2003. – № 2. – С. 134-142.
9. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин / Г.А. Смирнов. – Москва : Машиностроение, 1990. – 352 с.
10. Тракторы: теория / В. В. Гуськов [и др.], под ред. В.В. Гуськова. – Москва : Машиностроение, 1988. – 376 с.