

ОЦЕНКА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВОРОТА КОЛЁСНОЙ МАШИНЫ

Александр Николаевич Беляев¹
Татьяна Владимировна Тришина¹
Андрей Николаевич Брюховецкий²
Ирина Алевтиновна Высоцкая³
Анатолий Иванович Завражнов⁴

¹Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

²Луганский национальный аграрный университет

³Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Министерства обороны Российской Федерации

⁴Мичуринский государственный аграрный университет

Для синхронного поворота колёс осей двухосной машины предусмотрена рулевая трапеция, которая обеспечивает поворот наружных и внутренних колёс на разные углы, что позволяет им катиться при криволинейном движении по разным радиусам без проскальзывания. Для реализации этого необходимы очень точные расчёты взаимосвязанных кинематических параметров – различных углов поворота колёс переднего и заднего мостов. Известные расчётные формулы для средних и наружных, по отношению к центру поворота, углов поворота колёс переднего и заднего мостов устанавливают взаимосвязь между исходными параметрами, определяемыми конструкцией машины: продольной базой, расстояниями между осями шкворней, углом поворота внутреннего, по отношению к центру поворота, переднего колеса. Известно, что начальным параметром для исследования кинематики поворота и правильного подбора характеристик рулевой трапеции является также угол поворота внутреннего, по отношению к центру поворота, заднего колеса. В связи с этим в настоящей работе представлены расчётные зависимости для определения средних и наружных углов поворота колёс, теоретического радиуса поворота центра тяжести в зависимости от продольной базы машины, расстояний между осями шкворней и угла поворота внутреннего заднего колеса, проведены расчёты с их использованием и сравнение результатов с ранее известными. Многовариантность расчётов позволяет добиться высокой степени автоматизации при их реализации, так как получение одинакового результата по разным формулам свидетельствует о высокой точности выполненных операций. Результаты исследований можно применять для расчётов кинематических характеристик криволинейного движения колёсных тракторов и автомобилей с целью выбора оптимальных параметров рулевой трапеции, режимов поворота колёс, рациональных величин продольной базы и ширины колеи, выявления закономерностей их изменения для обеспечения требуемых манёвренности, управляемости и устойчивости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: колёсная машина, кинематика поворота, радиус поворота, управляемые колёса, конструктивные параметры.

KINEMATIC CHARACTERISTICS OF A WHEELED VEHICLE TURNING AND THEIR EVALUATION

Alexander N. Belyaev¹
Tatyana V. Trishina¹
Andrey N. Bryukhovetsky²
Irina A. Vysotskaya³
Anatoly I. Zavrzhnov⁴

¹Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

²Luhansk National Agrarian University

³Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation

⁴Michurinsk State Agrarian University

For synchronous rotation of the wheels of the axles of the two-axle machine, it is supplied with steering geometry, which provides rotation of the outer and inner wheels at different angles, which allows them to roll in a curved motion along different radius without slipping. To achieve this, very precise calculations of the interrelated kinematic parameters are required, i.e. of different angles of rotation of the wheels of the front and rear axles. Known calculation formulas for determining the average and external, relative to the center of rotation, angles of rotation of the wheels of the front and rear axles establish relationships between the initial parameters determined by the design of the machine such as the longitudinal base, the distances between the axes of the pivots, the angle of rotation of the inner, relative to the center of rotation, front wheel. It is known that the initial parameter for studying the kinematics of rotation and the correct selection of the characteristics of the steering geometry is also the angle of rotation of the inner, relative to the center of rotation, rear wheel. In this regard, this paper presents the calculated dependencies for determining the average and outer angles of rotation of the wheels, the theoretical radius of rotation of the center of gravity, depending on the longitudinal base of the machine, the distances between the axes of the pivots and the angle of rotation of the inner rear wheel. Calculations are performed using the defined dependence and comparing the results obtained with previously known ones. The multivariance of calculations allows achieving high degree of automation at practical implementation, since obtaining the same result for different formulas indicates the high accuracy of the performed operations. The results of research can be used to calculate the kinematic characteristics of the curvilinear motion of wheeled tractors and cars in order to select the optimal parameters of the steering geometry, wheel rotation modes, rational values of the longitudinal base and track width, as well as to identify patterns of their changes to ensure the required maneuverability, controllability and stability.

KEYWORDS: wheeled vehicle, turning kinematics, turning radius, driven wheels, design parameters.

Основным измерителем качественных статических показателей криволинейного движения колёсной машины (трактора, автомобиля) является, несомненно, минимальный теоретический радиус поворота [7, 8, 11, 14, 15]. Способ же поворота колёсной машины в основном определяет отличительные свойства кинематических характеристик и её важнейшие эксплуатационные свойства – управляемость, манёвренность и устойчивость движения [3, 4]. Для синхронного поворота колёс осей двухосной машины предусмотрена рулевая трапеция, которая обеспечивает поворот наружных и внутренних колёс на разные углы, что позволяет им катиться при криволинейном движении по разным радиусам без проскальзывания [5, 7, 8, 11]. При правильном подборе параметров рулевой трапеции соотношение между углами поворота внутренних и наружных колёс достаточно близко к теоретическим [7].

В работах [1, 2] предложены аналитические зависимости для определения минимального теоретического радиуса поворота R_T , средних углов поворота колёс переднего и заднего мостов α_{1cp} и α_{2cp} , углов поворота наружных по отношению к центру поворота колёс переднего и заднего мостов α''_1 и α''_2 , теоретического радиуса поворота центра тяжести R_C в зависимости от углов поворота внутренних, по отношению к центру поворота, передних и задних управляемых колёс двухосной машины со всеми управляемыми колёсами α'_1 и α'_2 . Перечисленные аналитические зависимости являются универсальными, применяются для различных, наиболее часто используемых способов поворота, при которых изменение направления движения осуществляется поворотом или только передних, или только задних, или одновременно передних и задних управляемых колёс в горизонтальной плоскости относительно собственной оси поворота и остова машины.

При этом для определения минимального теоретического радиуса поворота в работах [1, 2, 13] была представлена формула (1)

$$R_T = \frac{\left[\frac{B}{2} (tg\alpha'_1 + tg\alpha'_2) + L \right] \cos\alpha'_1 \cos\alpha'_2}{\sin(\alpha'_1 + \alpha'_2)}, \quad (1)$$

где B – расстояния между осями шкворней машины, м;

L – продольная база машины, м.

В формуле (1) установлена взаимосвязь между начальными конструктивными, эксплуатационными и кинематическими параметрами, каковыми являются продольная база машины L , расстояния между осями шкворней B (приняты равными для переднего

и заднего мостов, что соответствует реальным конструктивным характеристикам тракторов и автомобилей) и углами поворотов внутренних, по отношению к центру поворота, передних и задних управляемых колёс – соответственно α'_1 и α'_2 .

Для расчёта величин остальных вышеуказанных параметров только через α'_1 были рекомендованы следующие выражения [1, 2]:

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

$$\operatorname{tg} \alpha_{2cp} = \frac{2L - \operatorname{tg} \alpha'_1 (2R_T - B)}{2R_T}, \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \alpha''_1 = \frac{\operatorname{tg} \alpha'_1 (2R_T - B)}{2R_T + B}, \quad (4)$$

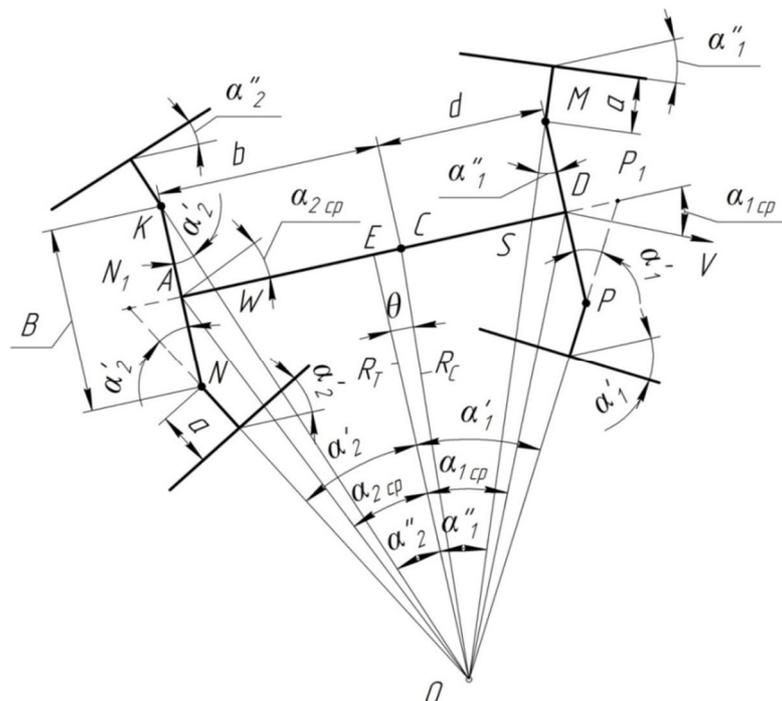
$$\operatorname{tg} \alpha''_2 = \frac{2L - \operatorname{tg} \alpha'_1 (R_T - B)}{2R_T + B}, \quad (5)$$

$$R_C = \sqrt{\left(\operatorname{tg} \alpha'_1 \left(R_T - \frac{B}{2}\right) - d\right)^2 + R_T^2}, \quad (6)$$

где d – расстояние от середины переднего моста (на рисунке точка D) до центра тяжести машины (на рисунке точка C).

Как уже было отмечено выше, начально-исходным параметром для исследования криволинейного движения, определяемым конструкцией машины, является также внутренний, по отношению к центру поворота, угол поворота заднего управляемого колеса α'_2 . С учётом этого параметра проведём проверку корректности формул (2) – (6) и рассчитаем аналитические выражения для α_{1cp} , α_{2cp} , α''_1 , α''_2 и R_C через α'_2 .

Для решения поставленной задачи используем расчётную схему поворота двухосной колёсной машины со всеми управляемыми колёсами, представленную на рисунке, как наиболее универсальную, предложенную в работе [1].



Расчётная схема поворота двухосной колёсной машины со всеми управляемыми колёсами

Для определения средних углов поворота колёс переднего и заднего мостов используем следующие выражения, учитывающие подобие (по трём углам) треугольников DEO , N_1EO и N_1AN (см. рис.) [6, 10]:

$$\operatorname{tg}\alpha_{1cp} = \frac{DE}{OE} = \frac{L - \operatorname{tg}\alpha'_2(R_T - \frac{B}{2})}{R_T}, \quad (7)$$

$$\operatorname{tg}\alpha_{2cp} = \frac{AE}{OE} = \frac{\operatorname{tg}\alpha'_2(2R_T - B)}{2R_T}, \quad (8)$$

где

$$DE = L - \operatorname{tg}\alpha'_2(R_T - \frac{B}{2}),$$

$$AE = \frac{\operatorname{tg}\alpha'_2(2R_T - B)}{2}.$$

Для расчёта углов поворота наружных, по отношению к центру поворота, колёс переднего и заднего мостов используем выражения (9) и (10), учитывающие подобие треугольников (по трём углам) OES и MDS , WEO и WAK [6, 10]

$$\operatorname{tg}\alpha_1'' = \frac{SE}{OE} = \frac{DE}{OE + \frac{B}{2}} = \frac{L - \operatorname{tg}\alpha'_2(R_T - \frac{B}{2})}{R_T + \frac{B}{2}}, \quad (9)$$

$$\operatorname{tg}\alpha_2'' = \frac{WE}{OE} = \frac{\operatorname{tg}\alpha'_2(2R_T - B)}{2R_T + B}, \quad (10)$$

где

$$SE = \frac{OE \cdot \operatorname{tg}\alpha_1''}{\operatorname{tg}\alpha_1'' + 1},$$

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

Используя подобие (по трём углам) треугольников ECO , EOA и AWK , получаем расчётную зависимость для теоретического радиуса поворота центра тяжести [6, 10]

$$R_C^2 = CE^2 + OE^2 = \frac{(2d - (2R_T - B)\operatorname{tg}\alpha')^2}{4} + R_T^2, \quad (11)$$

$$R_C = \frac{\sqrt{(2d - (2R_T - B)\operatorname{tg}\alpha')^2 + 4R_T^2}}{2}.$$

Для подтверждения корректности формул (2)–(11) проведём по ним расчёты при следующих исходно-начальных параметрах, соответствующих техническим характеристикам трактора РТМ-160 [12]:

$$L = 2,765 \text{ м};$$

$$B = 1,8 \text{ м};$$

$$\alpha'_{1max} = \alpha'_{2max} = 33^\circ 30';$$

$$R_T, \text{ определённый по формуле (1), равен } 2,989 \text{ м.}$$

При одних и тех же исходных данных расчёты как по формулам (2) и (3), так и по формулам (7) и (8) дают абсолютно идентичные значения углов $\alpha_{1cp\ max} = \alpha_{2cp\ max} = 24^{\circ}50'$, а по формулам (4) и (5), (9) и (10) – $\alpha''_{1max} = \alpha''_{2max} = 19^{\circ}35'$.

Теоретический радиус поворота центра тяжести R_C составляет 3,022 м при расчёте и по формуле (6), и по формуле (11).

При повороте только передними колёсами исходно-начальные параметры были следующими:

$$L = 2,765 \text{ м};$$

$$B = 1,8 \text{ м};$$

$$\alpha'_{1max} = 33^{\circ}30';$$

$$\alpha'_{2max} = 0^{\circ}.$$

R_T , определённый по формуле (1), равен 5,077 м.

При этих параметрах по тем же формулам получены следующие идентичные значения: $\alpha_{1cp\ max} = 28^{\circ}34'$, $\alpha_{2cp\ max} = 0^{\circ}$ и $\alpha''_{1\ max} = 24^{\circ}50'$, $\alpha''_{2\ max} = 0^{\circ}$, $R_C = 5,343$ м.

Таким образом, представленные формулы для определения значений некоторых кинематических параметров криволинейного движения двухосной колёсной машины позволят на стадии проектирования и в процессе эксплуатации выбрать их рациональные конструктивные и эксплуатационные характеристики.

Многовариантность расчётов позволяет также добиться высокой степени автоматизации при их реализации [9], так как получение одинакового результата по разным формулам свидетельствует о точности выполненных операций.

Библиографический список

1. Беляев А.Н. Исследование кинематики поворота колесного трактора / А.Н. Беляев, Т.В. Тришина // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 1 (48). – С. 115–120.
2. Беляев А.Н. Повышение эффективности работы машинно-тракторных агрегатов на базе интегральных универсально-пропашных колёсных тракторов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / А.Н. Беляев. – Мичуринск-наукоград, 2019. – 440 с.
3. Гольпяпин В.Я. Новые интегральные тракторы JCB / В.Я. Гольпяпин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 4. – С. 40–43.
4. Козлов Д.Г. Повышение маневренности интегрального трактора / Д.Г. Козлов, К.А. Манаенков // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2014. – № 4. – С. 50–55.
5. Козлов Д.Г. Рулевой привод универсально-пропашного трактора со всеми управляемыми колёсами / Д.Г. Козлов, А.С. Дурманов // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 9. – С. 14–18.
6. Кудрявцев В.А. Краткий курс высшей математики / В.А. Кудрявцев, Б.П. Демидович. – Москва : Наука, 1978. – 624 с.

7. Скотников В.А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля / В.А. Скотников, А.А. Машенский, А.С. Солонский; под. ред. В.А. Скотникова. – Москва : Агропромиздат, 1986. – 383 с.
8. Смирнов Г.А. Теория движения колёсных машин / Г.А. Смирнов. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Машиностроение, 1990. – 352 с.
9. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем / В.П. Тарасик. – Минск : Дизайн ПРО, 1997. – 640 с.
10. Теоретическая механика : учебник / С.В. Болотин и др. – Москва : Академия, 2010. – 432 с.
11. Тракторы: теория : учебник для вузов по специальности «Автомобили и тракторы» / В.В. Гуськов, Н.Н. Велев, Ю.Е. Атаманов и др.; под общ. ред. В.В. Гуськова. – Москва : Машиностроение, 1988. – 374 с.
12. Тракторы PTM-160 и PTM-160У. Конструкция, эксплуатация и техническое обслуживание / А.С. Дурманов, Ю.А. Коцарь, Г.А. Головащенко, С.В. Плужников. – Саратов : Научная книга, 2006. – 155 с.
13. Computation of Vehicle Motion Path upon Entering Turn / A.N. Belyaev, V.G. Kozlov, I.A. Vysotskaya, T.V. Trishina // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). – 2019. – Vol. 9, No. 1. – Pp. 4527–4531.
14. Mammari S. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering / S. Mammari, V.B. Baghdassarian // Proceedings of the American Control Conference. – 2000. – Vol. 1 (6). – Pp. 105–109. DOI: 10.1109/ACC.2000.878782.
15. Ryu J.-C. Estimation of vehicle roll and road bank angle / J.-C. Ryu, J.C. Gerdes // Proceedings of the 2004 American Control Conference. – 2004. – Vol. 3. – Pp. 2110–2115. DOI:10.23919/acc.2004.1383772.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Александр Николаевич Беляев – доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой прикладной механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: aifkm_belyaev@mail.ru.

Татьяна Владимировна Тришина – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: tata344@rambler.ru.

Андрей Николаевич Брюховецкий – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой тракторов и автомобилей, проректор по учебной и научно-педагогической работе ГОУ ЛНР «Луганский национальный аграрный университет», ЛНР, г. Луганск, e-mail: bruhoveckiy@rambler.ru.

Ирина Алевтиновна Высоцкая – кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры математики ФГКВУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, Россия, г. Воронеж, e-mail: i.a.trishina@gmail.com.

Анатолий Иванович Завражнов – доктор технических наук, академик РАН, главный научный сотрудник, профессор кафедры технологических процессов и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, Тамбовская область, г. Мичуринск, e-mail: aiz@mgau.ru.

Дата поступления в редакцию 18.09.2020

Дата принятия к печати 14.11.2020

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Alexander N. Belyaev, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Head of the Dept. of Applied Mechanics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: aifkm_belyaev@mail.ru.

Tatyana V. Trishina, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Applied Mechanics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia, e-mail: tata344@rambler.ru.

Andrey N. Bryukhovetskiy, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Head of the Dep. of Tractors and Automobiles, Vice Rector for Academic and Scientific-Pedagogical Work, Luhansk National Agrarian University, LNR, Lugansk, e-mail: bruhoveckiy@rambler.ru.

Irina A. Vysotskaya, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lecturer, the Dept. of Mathematics, Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh, e-mail: i.a.trishina@gmail.com.

Anatoly I. Zavrazhnov, Doctor of Engineering Sciences, Academician of RAS, Chief Researcher, Professor, the Dept. of Technological Processes and Technosphere Safety, Michurinsk State Agrarian University, Russia, Tambov Oblast, Michurinsk, e-mail: aiz@mgau.ru.

Received September 18, 2020

Accepted after revision November 14, 2020