Тип статьи: научная
УДК 629.3.012
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-40-47

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА МАНЕВРЕННОСТЬ ТРАКТОРА СО ВСЕМИ УПРАВЛЯЕМЫМИ КОЛЕСАМИ

Александр Николаевич Беляев [1]***, Владимир Иванович Оробинский*** [2]***,***
Татьяна Владимировна Тришина [3]
[1,2,3] *Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия*
[1] aifkm_belyaev@mail.ru, [2] n7477@mail.ru, [3] t.v.trishina@gmail.com

Автор, ответственный за переписку: Александр Николаевич Беляев, aifkm_belyaev@mail.ru
Corresponding author: Alexander Belyaev, aifkm_belyaev@mail.ru

Реферат. *Приведены результаты теоретического анализа по оценке влияния продольной базы и колеи трактора со всеми управляемыми колесами на его основные геометрические и кинематические характеристики при криволинейном движении, характеризующие его маневренность. В качестве оценочных показателей приняты максимальные абсцисса и ордината траектории входа в поворот и минимальный теоретический радиус установившегося этапа кругового беспетлевого поворота. Дано сравнение с результатами расчетов, полученными при исследовании трактора с передними управляемыми колесами при идентичных конструктивных параметрах и эксплуатационных условиях. Для определения необходимых искомых параметров, описывающих траекторию криволинейного движения трактора, получены уравнения параметрического вида. Анализ результатов расчетов показал, что при поочередном увеличении длины продольной базы с 2,2 м до 3,0 м и ширины колеи с 1,2 м до 2,2 м, при остальных неизменных конструктивных и эксплуатационных характеристиках, минимальный радиус возрастает, соответственно, на 18,5 % и 16,3 %, а максимальная ордината траектории входа в поворот – на 3,9 % и 16,6 %, при этом максимальная абсцисса этого участка траектории уменьшается на 20,4 % и 40,4 %. Сравнение способа поворота, являющегося предметом исследования в настоящей работе со способом поворота передними управляемыми колесами при прочих равных условиях показало эффективность первого из них. Выявлено увеличение максимальной абсциссы в 1,75 раза, но уменьшение максимальной ординаты в 1,05 раза и минимального радиуса поворота в 1,69 раза. дает основание говорить о лучшей маневренности трактора со всеми управляемыми колесами.*

Ключевые слова*: трактор, маневренность, колесная база, колея, абсцисса, ордината, траектория, радиус поворота.*

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS ON TRACTOR ANEUVERABILITY WITH ALL STEERABLE WHEELS

Alexander Belyaev [1]***, Vladimir Orobinsky*** [2]***, Tatiana Trishina*** [3]
[1,2,3] *Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*
[1] aifkm_belyaev@mail.ru, [2] n7477@mail.ru, [3] t.v.trishina@gmail.com

Abstract. *The results of a theoretical analysis are presented to assess the influence of the longitudinal base and track of a tractor with all steerable wheels on its basic geometric and kinematic characteristics in curved motion, characterizing its maneuverability. The maximum abscissa and ordinate of the trajectory of the entrance to the turn and the minimum theoretical radius of the steady-state stage of a circular loop-free turn are taken as estimated indicators. A comparison is given with the calculation results obtained in the study of a tractor with front steerable wheels under identical design parameters and operating conditions. To determine the necessary desired parameters describing the trajectory of the*

curved movement of the tractor, parametric equations are obtained. Analysis of the calculation results showed that with an alternate increase in the length of the longitudinal base from 2.2 m to 3.0 m and the track width from 1.2 m to 2.2 m, with the remaining unchanged design and operational characteristics, the minimum radius increases, respectively, by 18.5% and 16.3%, and the maximum ordinate of the trajectory of entry into the turn – by 3.9% and 16.6 %, while the maximum abscissa of this section of the trajectory decreases by 20.4 % and 40.4%. A comparison of the turning method, which is the subject of research in this paper, with the method of turning the front steerable wheels, all other things being equal, showed the effectiveness of the first of them. An increase in the maximum abscissa by 1.75 times was revealed, but a decrease in the maximum ordinate by 1.05 times and the minimum turning radius by 1.69 times. This gives reason to talk about the best maneuverability of a tractor with all steerable wheels.

Keywords: *tractor, maneuverability, wheelbase, track, abscissa, ordinate, trajectory, turning radius*.

Для цитирования: Беляев А.Н., Оробинский В.И., Тришина Т.В. Анализ влияния конструктивных параметров на маневренность трактора со всеми управляемыми колесами // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 40-47. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-40-47.

For citation: Belyaev A., Orobinsky V., Trishina T. Analysis of the influence of design parameters on the maneuverability of a tractor with all steerable wheels. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 40-47. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-40-47.

Введение.

Важным эксплуатационным свойством универсально-пропашного колесного трактора, определяющим качество выполнения технологической операции, приспособляемость к условиям функционирования, удобство и эффективность управления, является маневренность – способность изменять требуемым образом положение на возможно минимальной площади при движении по траектории малого радиуса кривизны с резким изменением направлений, и вписываться в необходимые габариты [1]. Для решения проблемы улучшения маневренности колесного трактора необходимо выявление влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на характеристики, определяющие его коридор движения.

Основными конструктивными параметрами, влияющими на маневровые свойства колесной машины являются продольная (колесная) база и колея, для обеспечения оптимального сочетания величин которых, при сохранении качественных показателей машины при эксплуатации, необходимо принятие некоторых компромиссных решений [2], так как, например, при удлинении базы, для сохранения маневренности, необходимо увеличение предельных углов поворота управляемых колес, а действующие стандарты ограничивают ширину колеи.

Кроме того, увеличение этих параметров приводит к возрастанию массы машины, что очевидно, скажется на условиях качения колес и на топливной экономичности [3].

Также, как известно, их изменение оказывает значительное влияние на перераспределение нормальных нагрузок по мостам и бортам машины и, следовательно, на величины боковых и касательных сил [2].

Материалы и методы.

Цель настоящей работы состоит в теоретической оценке влияния основных конструктивных параметров на маневренность колесного трактора.

В соответствие с этим задачами исследований является выявление закономерностей изменения величин длины L колесной базы и ширины B колеи универсально-пропашного трактора на геометрические и кинематические характеристики криволинейного движения (рисунок 1).

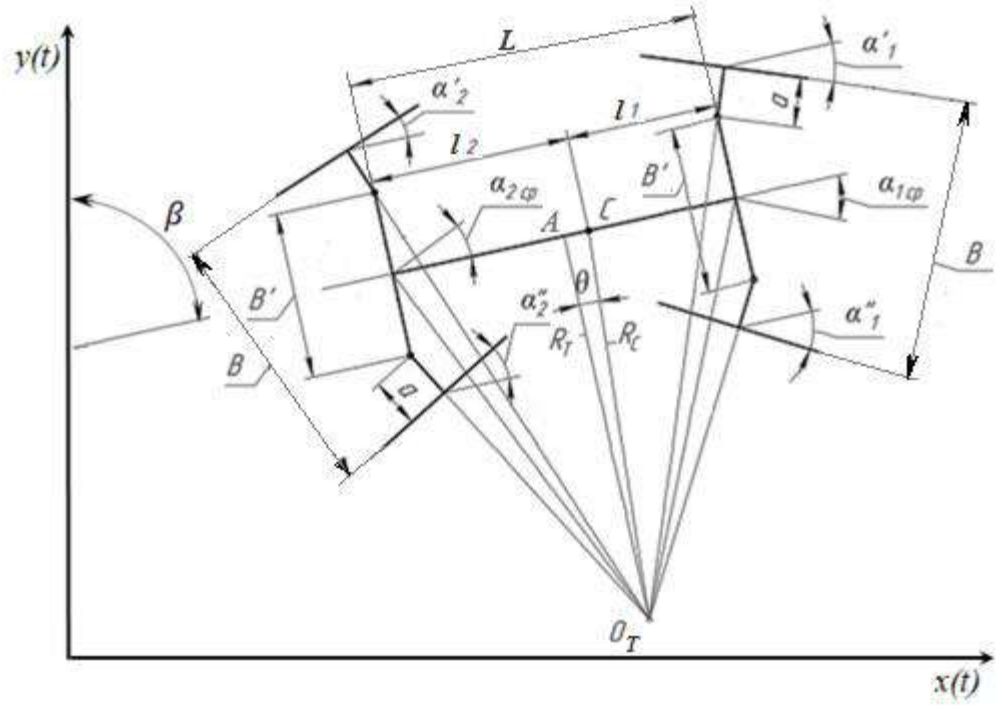


Рисунок 1 – Расчетная плоская схема поворота трактора со всеми управляемыми колесами

Так как кинематические способы поворота применяются в настоящее время для управления большинством современных колесных тракторов, и процесс криволинейного движения двухосных колесных машин с передними управляемыми колесами на различных этапах поворота довольно подробно рассмотрен в литературе, поэтому для решения поставленных задач предметом исследований выбран способ поворота, при котором изменение направления движения реализуется поворотом всех четырех управляемых колес в противоположные стороны относительно рамы (рисунок 1). Такая компоновка в последнее время находит все большее применение, так как является наиболее действенным конструктивным мероприятием для уменьшения почти в два раза его радиуса поворота [4, 5, 6].

Исследования будем проводить по характеру поведения трактора при реализации беспетлевого кругового поворота, так как его комбинации являются основой большинства из известных способов поворота, и при выполнении маневра на ограниченной площадке циклы поворота почти во всех случаях в качественном отношении идентичны [7].

Так как тракторы, выбранные в качестве объекта исследований, в основном работают в полевых условиях, то на них накладываются, в первую очередь, ограничения в виде агротехнических требований, которые заключаются в стремлении к сокращению площади поворотной полосы, что является признаком значительного уменьшения количества повреждаемых растений, уплотнения и распыления почвы, и поэтому в качестве оценочных показателей маневровых свойств приняты граничные геометрические и кинематические характеристики изучаемого типа траектории – максимальные значения абсциссы x_{max} и ординаты y_{max} траектории входа в поворот и минимального теоретического радиуса поворота $R_T = R_{Tmin}$ на установившемся участке поворота, относящиеся к кинематическому центру трактора [2].

Текущие координаты принятой за кинематический центр трактора точки A на его продольной оси, находящейся на пересечении перпендикуляра к ней, проведенного из мгновенного центра поворота O_T, находились при переменном радиусе кривизны путем решения системы дифференциальных уравнений с искомыми функциями времени $x=x(t)$ и $y=y(t)$ согласно принятой

плоской расчетной схемы с учетом допущений об отсутствии бокового увода и скольжения колес (рисунок 1) [8, 9]

$$\left.\begin{aligned} \rho &= \left|\frac{(\dot{x}^2+\dot{y}^2)^{3/2}}{\dot{x}\ddot{y}-\dot{y}\ddot{x}}\right|; \\ v^2 &= \dot{x}^2+\dot{y}^2 \end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

где $\rho = \rho(t)$ – мгновенный радиус кривизны траектории поворота трактора, м;

t – время выполнения трактором маневра, с;

v – скорость поступательного движения трактора, м/с.

Если поворот происходит на деформируемом грунте, а также, если схема или конструкция трактора создает дополнительный момент сопротивления повороту, то принятию допущения о не учете влияния динамических характеристик на кинематические параметры должен предшествовать соответствующий анализ [2].

Очевидно, выбор той или иной формулы для определения радиуса кривизны траектории при изучении процесса криволинейного движения колесной машины определяется задачами, которые в конкретном случае стоят перед исследователем. Однако, когда необходимо проводить многовариантные расчеты, например при дискретном изменении длины L продольной базы и ширины B колеи, использование универсальной формулы для определения минимального теоретического радиуса поворота трактора со всеми управляемыми колесами, которая разработана на основании того, что в нее входит большинство параметров, которые определяются, а в некоторых случаях и ограничиваются, его конструкцией, наиболее эффективно [2]

$$R_T = \frac{\left[\frac{B'}{2}(tg\,\alpha_1'' + tg\,\alpha_2'') + L\right]\cos\alpha_1''\cos\alpha_2''}{\sin(\alpha_1''+\alpha_2'')}, \qquad (2)$$

где B' – расстояние между осями шкворней рулевых трапеций (принято допущение (что вполне оправдано конструктивными особенностями большинства существующих типов современных колесных машин [5]) о равенстве расстояний между осям шкворней передних и задних колес), м;

α_1'' и α_2'' – соответственно, углы поворота передних и задних, внутренних, по отношению к центру поворота, управляемых колес, град.

Совместным решением (1) и (2) были выведены уравнения для расчета координат траекторий (абсцисс и ординат) кинематического центра колесной машины со всеми управляемыми колесами при входе в поворот [2, 10]

$$x(t) = v\int_0^t \sin\left[v\int_0^{t_1} \frac{\sin(\omega_1\tau+\omega_2\tau)}{\left[\frac{B'}{2}(tg\,\omega_1\tau + tg\,\omega_2\tau)+L\right]\cdot\cos\omega_1\tau\cos\omega_2\tau}d\tau\right]dt_1; \qquad (3)$$

$$y(t) = v\int_0^t \cos\left[v\int_0^{t_1} \frac{\sin(\omega_1\tau+\omega_2\tau)}{\left[\frac{B'}{2}(tg\,\omega_1\tau + tg\,\omega_2\tau)+L\right]\cdot\cos\omega_1\tau\cos\omega_2\tau}d\tau\right]dt_1. \qquad (4)$$

где ω_1 и ω_2 – соответственно, угловые скорости поворота передних и задних управляемых колес трактора в поперечной плоскости относительно его остова, $с^{-1}$.

Дальнейшие рассуждения в настоящей работе будут отнесены к выбранному кинематическому центру *A*, но при необходимости все выводы возможно генерировать на любые другие базовые точки трактора, так как его координаты связаны с ними вполне определенными геометрическими соотношениями.

Например, требуется определить координаты и радиус кривизны траектории, описываемой серединой левого переднего тракторного колеса.

Текущие координаты траектории центра масс трактора (точка *C* на рисунке 1) устанавливаются по следующим уравнениям:

$$x_C(t) = x(t)\cos\theta; \tag{5}$$

$$y_C(t) = y(t)\sin\theta, \tag{6}$$

где на рисунке 1:

$$\theta = arctg\left(\frac{tg\alpha_1''(R_T - \frac{B'}{2}) - l_1}{R_T}\right),$$

а l_1 – расстояние от центра тяжести *C* до середины переднего моста, *м.*

С учетом (5) и (6) имеем для рассматриваемого колеса

$$x_1' = x_C + l_1 \cdot \sin\beta - B'/2 \cdot \cos\beta - a \cdot \cos(\beta + \alpha_1'); \tag{7}$$

$$y_1' = y_C + l_1 \cdot \cos\beta + B'/2 \cdot \sin\beta + a \cdot \sin(\beta + \alpha_1'), \tag{8}$$

где *a* – плечо обката, м.

Курсовой угол трактора и угол поворота левого переднего колеса вычисляются, соответственно, по следующим зависимостям (2):

$$\beta = v\int_0^t \frac{d\tau}{\rho};$$

$$\alpha_1' = arctg\left(\frac{tg\alpha_1'' \cdot (2R_T - B')}{2R_T + B}\right).$$

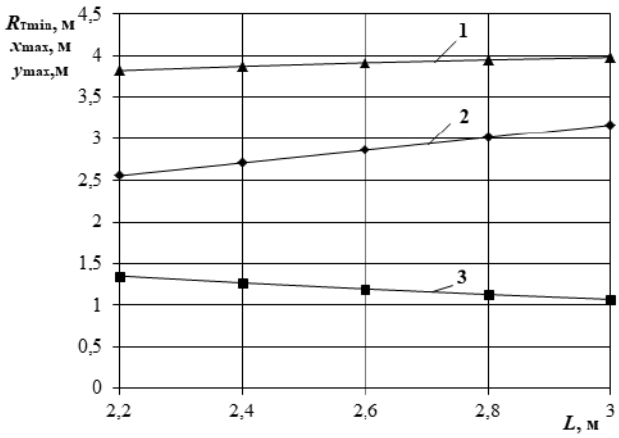
Радиус кривизны в любой точке траектории, с учетом (3) и (4), (7) и (8), определяется по первому уравнению системы (1).

Следует отметить, что последовательное решение уравнений (3) и (4) с определенным шагом интегрирования позволяют не только определить координаты основных точек трактора, но и также построить траекторию их движения (2).

Результаты и обсуждение.

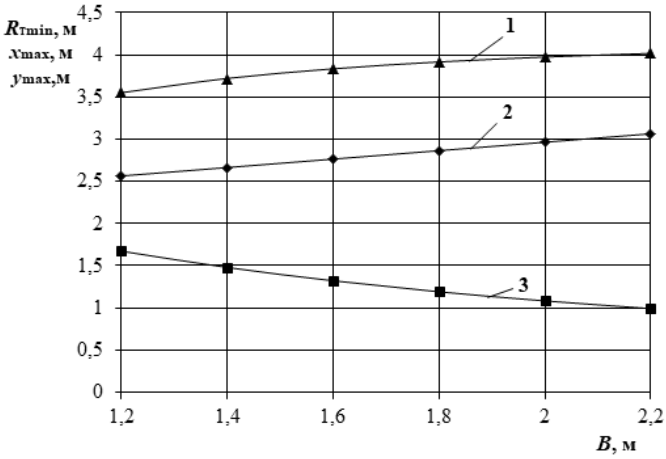
Значения абсцисс x_{max}, ординат y_{max} и минимального радиуса поворота R_{Tmin}, очевидно, согласно (3) и (4), будут получены в верхней точке траектории входа в поворот, соответствующей, например одним из принятых нами начальным условиям: $t=t_{max}$=3 с, ω_1=0,195 с$^{-1}$ и ω_2=0,195 с$^{-1}$ (рисунок 2, рисунок 3).

Кроме того, были также приняты другие следующие исходные параметры: $\alpha_1'' = \alpha_{1max}''$ =33°30' и $\alpha_2'' = \alpha_{2max}''$ =33°30', *v*=1,41 м/с. При этом при дискретном изменении длины *L* постоянна ширина *B'*=1,8 м, а при варьировании *B'* изменна *L*=2,6 м.



1– y_{max} ; 2 – R_{Tmin}; 3 – x_{max}

Рисунок 2 – Зависимость максимальных координат траектории входа в поворот и минимального теоретического радиуса поворота от продольной базы трактора



1– y_{max} ; 2 – R_{Tmin}; 3 – x_{max}

Рисунок 3 – Зависимость максимальных координат траектории входа в поворот и минимального теоретического радиуса поворота от расстояния между осями шкворней трактора

Синхронный поворот передних и задних колес на некоторые углы $\alpha_1'' = \alpha_2''$ за время t осуществляется с постоянными угловыми скоростями ω_1=ω_2, что вполне допустимое, с достаточной для практики точностью, условие [2, 10].

В результате расчетов выявлено, что при поочередном увеличении L с 2,2 м до 3,0 м и B' с 1,2 до 2,2 м при остальных неизменных входных параметрах R_{Tmin} возрастает в обоих случаях почти с одинаковой интенсивностью и практически по линейным зависимостям: в первом варианте R_{Tmin}=2,562…3,166 *м*, во втором – 2,564…3,064 *м* (рисунок 2 и рисунок 3, зависимости 2). В процентном отношении – это, соответственно – 18,5 % и 16,3 %.

Такая же практически картина, разве что необходимо отметить некоторую нелинейность и чуть большую интенсивность роста зависимости при повышении B', по отмеченным критериям и по изменению y_{max} в рассматриваемых случаях (рисунок 2 и рисунок 3, зависимости 1): при варьировании L – y_{max}=3,823…3,978 м, а при изменении B' – y_{max}=3,530…4,016 м, что дает 3,9 % и 11,6 %.

Зависимости x_{max} от L и B' также не очень значительно отличаются друг от друга по интенсивности, но в отличие от R_{Tmin} и y_{max} характер изменения у них другой: происходит уменьшение x_{max} с 1,344 м до 1,070 м и с 1,673 м до 0,993 м при вышеуказанных пределах роста L и B', что соответствует 20,4 % и 40,64 % (рисунок 1 и рисунок 2, зависимости 3).

При этом с увеличением L средние углы поворота передних и задних колес $\alpha_{1cp}=\alpha_{2cp}$ возрастают с 23,240° до 25,349°, а с увеличением B' – уменьшаются с 26,885° до 22,980°.

Приведем для примера один из вариантов результатов расчётов при L=2,6 м и B'=1,8 м: x_{max}=1,192 м, y_{max}=3,915 м, R_{Tmin}=2,864 м, $\alpha_{1cp}=\alpha_{2cp}$=24,19° и β=48,942°.

При тех же начально-исходных параметрах при повороте передними управляемыми колесам согласно (3), (4) и первому уравнению (1) при ω_2=0 и $\alpha_2''=0$ получили следующие значения: x_{max}=0,68 м, y_{max}=4,13 м, R_{Tmin}=4,828 м, α_{1cp}=28,303°, α_{2cp}=0° и β=28,303°.

При сравнении имеем: x_{max} при повороте всеми колесами в 1,75 раза выше, чем передними, а y_{max} уменьшается всего лишь в 1,05 раза, за счет этого площадь участка входа в поворот примерно в 1,6 раза больше, но затем возможно последующее продолжение маневра на участке установившегося движения с R_{Tmin} меньшим в 1,69 раза и при этом величина угла β в 1,73 раза выше, что позволяет получить более рациональное размещение центра окружности радиуса R_{Tmin}, влияющее на общую площадь поверхности для разворота.

Выводы.

1. Отмечено, что маневренность является одним из важных эксплуатационных свойств колесного трактора, определяющим качество выполнения технологической операции, приспособляемость к условиям функционирования, удобство и эффективность управления.

2. В качестве оценочных показателей маневровых свойств колесного трактора предложены максимальные значения абсциссы и ординаты траектории входа в поворот и минимального теоретического радиуса поворота на установившемся участке поворота.

4. Как увеличение длины продольной базы, так и ширины колеи приводит к возрастанию максимальной ординаты траектории входа в поворот и минимального теоретического радиуса поворота, и, наоборот, – к уменьшению максимальной абсциссы траектории входа в поворот.

5. При повороте трактора всеми колесами более чем в 1,5 раза уменьшается площадь поворотной полосы в сравнении с поворотом передними колесами.

6. Полученные результаты расчетов основных геометрических и кинематических характеристик криволинейного движения на различных этапах поворота колесного трактора со всеми управляемыми колесами позволят выбрать рациональные значения длины продольной базы и ширины колеи.

Список источников

1. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.

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. Автомобильный справочник: пер. с англ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЗАО «КЖИ «За рулём», 2004. 992 с.

4. Скотников В.А., Мащенский А.А., Солонский А.С. Основа теории и расчета трактора и автомобиля. М.: Агропромиздат, 1986. 383 с.

5. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

6. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. и др. Тракторы: теория. М.: Машиностроение, 1988. 374 с.

7. Иофинов С.А., Бабенко Э.П., Зуев Ю.А. Справочник по эксплуатации машинно-тракторного парка. М.: Агропромиздат, 1985. 272 с.

8. Болотин С.В., Карапетян А.В., Кугушев Е.И., Трещев Д.В. Теоретическая механика. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 432 с.

9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 831 с.

10. Belyaev A.N., Kozlov V.G., Vysotskaya I.A., Trishina T.V. Computation of Vehicle Motion Path upon Entering Turn / International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2019. Vol. 9. №. 1. Pp. 4527-4531.

References

1. Litvinov A.S., Farobin Ya.E. Automobile. Theory of performance properties. M.: Mechanical Engineering, 1989. 240 p.

2. Belyaev A.N. Increasing the efficiency of machine-tractor units based on integral universal row-crop wheeled tractors: Dis. ...Dr.Tech. Sciences: 05.20.01 / A.N. Belyaev. Michurinsk-naukograd, 2019. 440 p.

3. Automotive reference book: per. from English 2nd ed., revised. and additional M.: CJSC “KZHI “Za Rulem””, 2004. 992 p.

4. Skotnikov V.A., Mashchensky A.A., Solonsky A.S. The basis of the theory and calculation of tractors and cars. M.: Agropromizdat, 1986. 383 p.

5. Smirnov G.A. The theory of movement of wheeled vehicles. 2nd ed., add. and processed M.: Mechanical Engineering, 1990. 352 p.

6. Guskov V.V., Velev N.N., Atamanov Yu.E. etc. Tractors: theory. M.: Mechanical Engineering, 1988. 374 p.

7. Iofinov S.A., Babenko E.P., Zuev Yu.A. Handbook for operating the machine and tractor fleet. M.: Agropromizdat, 1985. 272 p.

8. Bolotin S.V., Karapetyan A.V., Kugushev E.I., Treshchev D.V. Theoretical mechanics. M.: Publishing center "Academy", 2010. 432 p.

9. Korn G., Korn T. Handbook of mathematics for scientists and engineers. M.: Nauka, 1984. 831 p.

10. Belyaev A.N., Kozlov V.G., Vysotskaya I.A., Trishina T.V. Computation of Vehicle Motion Path upon Entering Turn / International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2019. Vol. 9. No. 1.Pp. 4527-4531.

Информация об авторах

А.Н. Беляев – доктор технических наук, доцент; В.И. Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; Т. В. Тришина – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

A. Belyaev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; V. Orobinsky - Doctor of gricultural Sciences, Professor; T. Trishina - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 15.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 18.02.2024