

4.3.1. ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА  
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья  
УДК 629.3.027.2  
DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2025\_1\_60

EDN: LSUQPQ

**Оценка эффективности применения различных видов  
рулевых приводов на тракторе Беларус-80.1**

**Александр Николаевич Беляев<sup>1✉</sup>, Аркадий Васильевич Химченко<sup>2</sup>,  
Алексей Максимович Мухин<sup>3</sup>, Татьяна Владимировна Тришина<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,  
Воронеж, Россия

<sup>1</sup> aifkm\_belyaev@mail.ru, aifkm@agroeng.vsau.ru✉

**Аннотация.** Основным условием реализации правильного поворота транспортного средства является расположение мгновенного центра поворота всех колес на линии продолжения задней оси. Для выполнения этого требования должна соблюдаться вполне определенная закономерность, связывающая углы поворота наружного и внутреннего управляемых колес, что оказалось достаточно сложным для осуществления практически. Согласованный поворот управляемых колес большинства транспортных средств, с той или иной степенью точности, выполняет рулевой привод, в основу конструкции которого, как правило, положен или четырехзвенный, или шестизвенный шарнирно-рычажный механизм, именуемый в технике как неразрезная и разрезная рулевая трапеция. Выбор типа рулевой трапеции для системы рулевого управления колесного трактора определяется преимущественными видами работ, выполняемых им. Оценка эффективности использования различных рулевых приводов управляемых колес проведена сравнением кинематических характеристик правильного и фактического поворота трактора Беларус-80.1, полученных имитационным моделированием на платформе программного комплекса MATLAB в среде Simscape Simulink. Выявлено, что кинематика фактического поворота, реализуемого и разрезной, и неразрезной трапециями не вполне соответствует кинематике идеального поворота. Обе конструкции рулевых трапеций не обеспечивают благоприятные условия качения колес. Лишь при значении угла поворота внутреннего управляемого колеса  $\alpha_B$ , составляющем примерно  $22^\circ$ , наблюдается полное совпадение кинематики правильного и фактического поворота, осуществляемого разрезной рулевой трапецией. Отклонения минимального радиуса  $R_{\min}$  реального поворота, реализуемого разрезной и неразрезной рулевыми трапециями, от  $R_{\min}$  идеального поворота лежат соответственно в пределах 1,22–20,00% и 17,79–35,79% в интервале изменения  $\alpha_B = 5 \dots 40^\circ$ . В целях обеспечения чистого качения колес при движении трактора Беларус-80.1 на повороте необходим более тщательный теоретический анализ геометрии применяемых механизмов рулевого привода.

**Ключевые слова:** колесная машина, трактор, управляемые колеса, рулевая трапеция, шарнирно-рычажный механизм, кинематика поворота

**Для цитирования:** Беляев А.Н., Химченко А.В., Мухин А.М., Тришина Т.В. Оценка эффективности применения различных видов рулевых приводов на тракторе Беларус-80.1 // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, № 1(84). С. 60–69. [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2025\\_1\\_60-69](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2025_1_60-69).

4.3.1. TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT  
FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX  
(ENGINEERING SCIENCES)

Original article

**Assessment of feasibility of various types  
of steering gears on the Belarus-80.1 tractor**

**Aleksandr N. Belyaev<sup>1✉</sup>, Arkadiy V. Khimchenko<sup>2</sup>,  
Aleksy M. Mukhin<sup>3</sup>, Tatyana V. Trishina<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

<sup>1</sup> aifkm\_belyaev@mail.ru, aifkm@agroeng.vsau.ru✉

**Abstract.** The main condition for the correct rotation of the vehicle is the location of the instantaneous center of rotation of all wheels on the continuation line of the rear axle. To fulfill this requirement, a well-defined pattern must be observed connecting the angles of rotation of the external and internal steerable wheels, which turned

out to be quite difficult to implement. The coordinated rotation of the steerable wheels of most vehicles, with varying degrees of accuracy, is performed by a steering gear, the design of which is usually based on either four-link or six-link articulation linkage, referred to in engineering practice as continuous and divided steering linkage, respectively. Type selection of steering linkage for the steering system of a wheeled tractor is determined by the preferred types of performed operations. Assessment of feasibility of using various steerable wheel drives was carried out by comparing the kinematic characteristics of the correct and actual rotation of the Belarus-80.1 tractor, obtained by simulation modeling on the MATLAB software package platform in the Simscape Simulink environment. It is revealed that the kinematics of the actual rotation, realized by both continuous and divided steering linkage, does not fully correspond to the kinematics of the ideal rotation. Both steering linkage designs do not provide favorable rolling conditions for the wheels. Only when the angle of rotation of the inner steerable wheel ( $\alpha_B$ ) is set about  $22^\circ$ , there is a complete coincidence of the kinematics of the correct and actual rotation performed by the divided steering linkage. The deviations of the minimum radius of a real turn, realized by continuous and divided steering linkage, from the  $R_{min}$  of an ideal turn lie, respectively, within 1.22-20% and 17.79-35.79% in the range of  $\alpha_B = 5-40^\circ$ . In order to ensure pure rolling of the wheels when the Belarus-80.1 tractor is turning, a more thorough theoretical analysis of the geometry of the steering gear mechanisms used is necessary.

**Keywords:** wheeled vehicle, tractor, steerable wheels, steering linkage, articulation linkage, turning kinematics

**For citation:** Belyaev A.N., Khimchenko A.V., Mukhin A.M., Trishina T.V. Assessment of feasibility of various types of steering gears on the Belarus-80.1 tractor. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2025;18(1):60-69. (In Russ.). [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2025\\_1\\_60-69](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2025_1_60-69).

## Введение

Система рулевого управления любого мобильного энергетического средства служит для передачи сигнала от водителя как управляющего звена к поворотным колесам, посредством которых изменяется направление движения машины. Рулевая система состоит из основных двух частей: рулевого механизма и механизма рулевого привода [4, 5].

Назначение рулевого механизма – преобразование вращения рулевого колеса в требуемое, вполне определенное, движение начального звена механизма рулевого привода – рулевой сошки, а также облегчение работы водителя за счет увеличения прикладываемого к рулевому колесу усилия [6, 9].

Рулевой привод предназначен для выполнения согласованного поворота управляемых колес машины. Так как при криволинейном движении внешнее и внутреннее колеса проходят разные пути, то для того, чтобы они перемещались по вполне определенным траекториям, которые являются концентрическими (эквидистантными) окружностями, например  $R_B$  и  $R_H$  (рис. 1), необходим их поворот относительно продольной оси транспортного средства на разные углы.

### Методика исследования

Очевидно, что, например, при рассмотрении классического (традиционного), наиболее востребованного на практике способа поворота передними управляемыми колесами (схема представлена на рис. 1) внутреннее колесо (по отношению к центру поворота) должно поворачиваться на больший угол  $\alpha_B$  в сравнении с углом поворота наружного колеса  $\alpha_H$ . И очевидно то, что указанные углы поворота колес должны быть вполне определенными, согласованными друг с другом [3].

Для выполнения этого условия требуется, чтобы при одних и тех же углах поворота управляемых колес неизменно в одной и той же точке находился мгновенный центр поворота всех колес. Для схемы поворота передними колесами мгновенный центр поворота (точка О на рис. 1) всегда должен лежать на продолжении линии задней оси машины. В том случае, когда соблюдается отмеченное условие, машина способна совершать правильный (идеальный) поворот, при котором осуществляется чистое, без проскальзывания, качение всех колес [2].

На практике же оказалось, что выполнить взаимный согласованный поворот колес для реализации идеального поворота достаточно сложно.



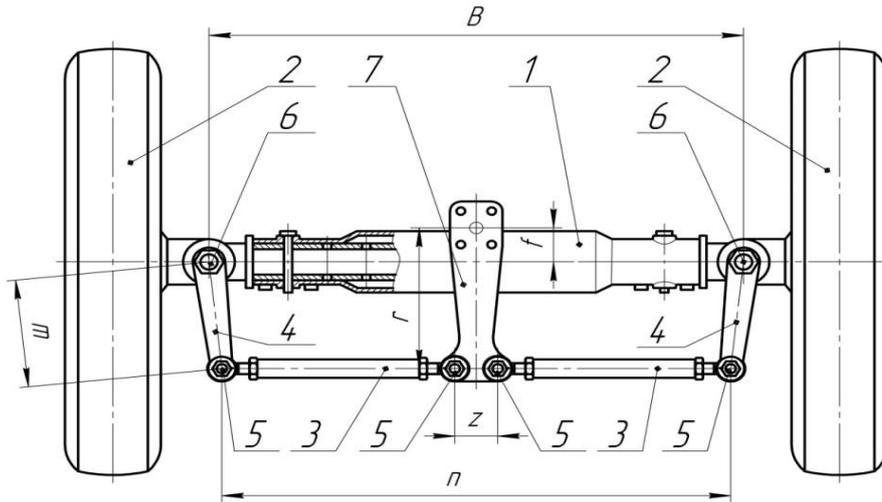


Рис. 3. Управляемый мост колесной машины с разрезной трапецией: 1 – передний мост; 2 – управляемые колеса; 3 – поперечные тяги; 4 – боковые рычаги; 5 – сферические шарниры; 6 – шкворни; 7 – рулевая сошка

Оснащение трактора той или иной из указанных конструкций систем рулевых управлений зависит от соотношения затраченного времени на отдельные виды работ, от состава агрегата, в который он входит. Например, трактор с ГОРУ, ввиду отсутствия механической связи рулевого колеса с управляемыми колесами, в случае отказа гидравлической системы становится неуправляемым. Следовательно, такие тракторы используются, в основном, на полевых работах, предполагающих не очень высокую скорость движения [8].

Так как при выходе из строя гидравлической системы на тракторе с ГУРУ нет опасности полной потери управляемости, несмотря на резкое возрастание усилия на рулевом колесе, их можно эксплуатировать также и в составе транспортных агрегатов [8].

Однако, как видно из кинематических схем фактического поворота колесной машины, осуществляемого неразрезной (рис. 4) и разрезной (рис. 5) рулевой трапецией, их геометрия не позволяет повторить кинематику идеального поворота.

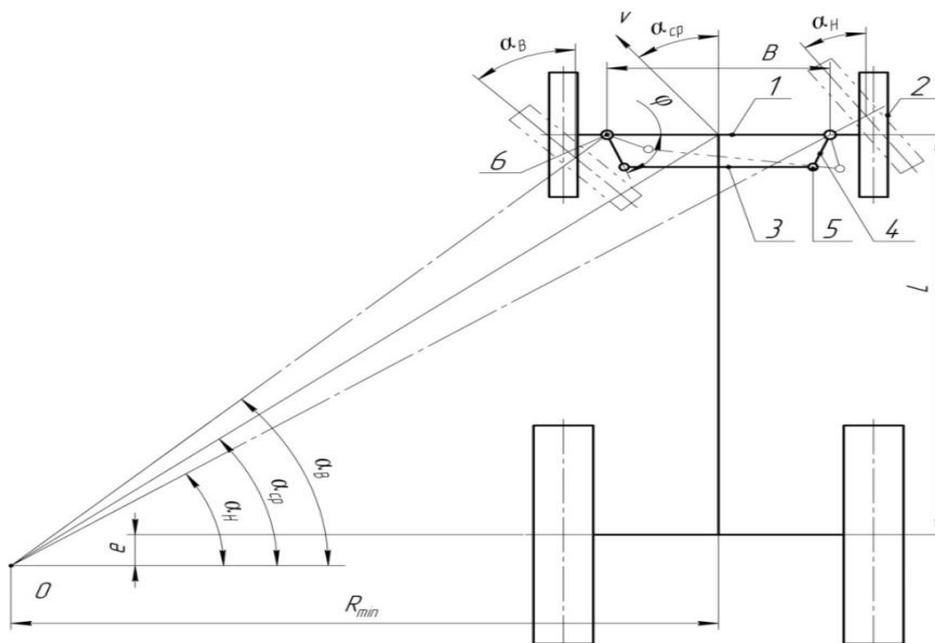
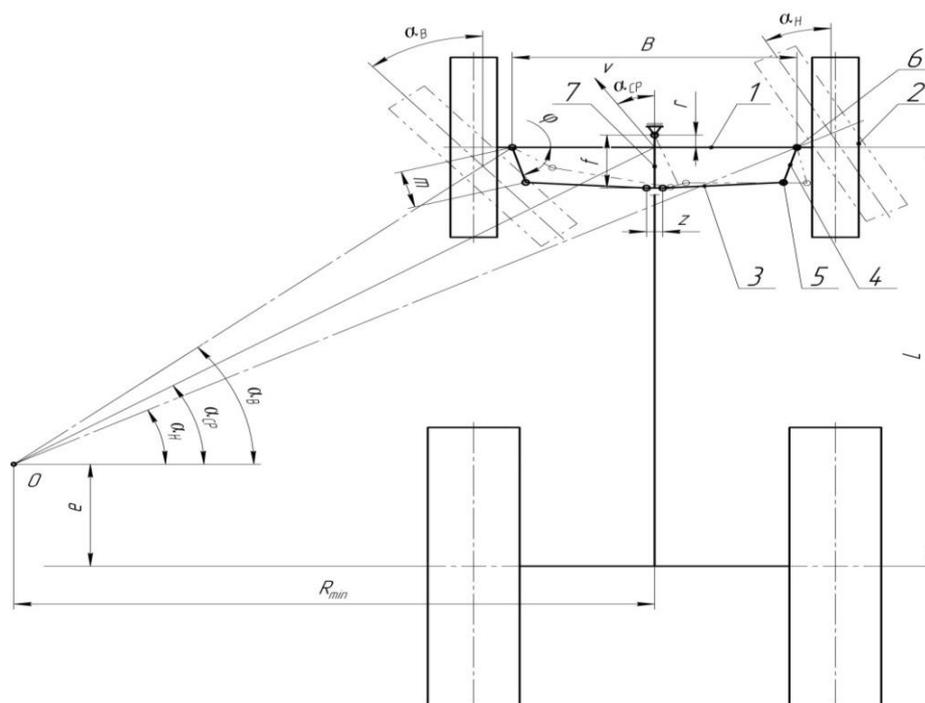


Рис. 4. Кинематическая схема фактического поворота колесной машины, реализуемого неразрезной рулевой трапецией: 1 – передний мост; 2 – управляемые колеса; 3 – поперечная тяга; 4 – боковые рычаги; 5 – сферические шарниры; 6 – шкворни



**Рис. 5.** Кинематическая схема фактического поворота колесной машины, реализуемого разрезной рулевой трапецией: 1 – передний мост; 2 – управляемые колеса; 3 – поперечные тяги; 4 – боковые рычаги; 5 – сферические шарниры; 6 – шкворни; 7 – рулевая сошка

Если не рассматривать боковую эластичность шин, мгновенный центр поворота  $O$  может находиться или внутри колесной базы, или вне нее, и лишь при каком-либо одном из углов поворота колес – оказаться на продолжении задней оси транспортного средства. Если точка  $O$  находится внутри колесной базы, то радиус поворота уменьшается, если вне – увеличивается в сравнении с правильным поворотом. Несмотря на то что в первом случае имеем машину с очевидно лучшей маневренностью, оба варианта вызывают нежелательные последствия, связанные с кинематическим рассогласованием при криволинейном движении колес, приводящим к нарушению условия чистого качения, их скольжению и, как следствие, увеличению нагрузок на ее детали и узлы, уплотнению и распылению почвы из-за возникновения экскавационно-бульдозерного эффекта при взаимодействии поворотных колес с опорной поверхностью.

В соответствии с вышеизложенным целью представленной работы является оценка эффективности использования различных видов рулевых приводов на тракторе Беларус-80.1 методом сравнения кинематических характеристик выполняемого им поворота.

Конструкцию управляемого моста, включающего рулевую трапецию с неразрезной поперечной тягой, составляют следующие основные узлы, детали и элементы: передний мост 1, управляемые колеса 2, поперечная тяга 3, поворотные боковые рычаги 4, сферические шарниры 5 для крепления поперечной тяги, шкворни 6 боковых рычагов, рулевая сошка 7, выполненная как одно звено с левым боковым рычагом (рис. 2).

Управляемый мост с рулевой трапецией с разрезной поперечной тягой дополнительно оснащается центральной рулевой сошкой 7 и вместо одной (рис. 2) – двумя поперечными тягами 3 (рис. 3). Именно по этим причинам трапеции получили для краткости названия неразрезная (рис. 2) и разрезная (рис. 3).

Таким образом, основу структуры рулевой трапеции с неразрезной поперечной тягой составляет четырехзвенный шарнирно-рычажный механизм, а с разрезной – шестизвенный шарнирно-рычажный механизм [1].

**Результаты и их обсуждение**

Для достижения поставленной цели рассмотрены кинематические характеристики чистого поворота и поворотов, выполняемых четырехзвенной и шестизвенной рулевой трапецией при прочих возможных равных условиях. На платформе программного комплекса MATLAB в среде Simscape Simulink выполнено имитационное моделирование процессов правильного и фактического поворота трактора Беларус-80.1 [10].

В таблицах 1–3 приведены значения полученных в результате моделирования основных кинематических параметров правильного поворота (табл. 1) и фактических поворотов, осуществляемых посредством неразрезной (табл. 2) и разрезной (табл. 3) трапеций, при следующих исходных характеристиках трактора Беларус-80.1 (рис. 2 и 3) [7]:

- продольная база  $L = 2370$  мм;
- межшкворневая колея  $B = 1220$  мм (выбрана для исследования из тех соображений, что на тракторе Беларус-80.1 расстояние между вертикальными осями шкворней изменяется дискретно от 1020 до 1420 мм с шагом 100 мм, то есть среднее ее значение);
- длина бокового рычага  $m = 206,6$  мм;
- угол наклона бокового рычага к продольной оси трактора  $\varphi = 73,83^\circ$ ;
- отношение длины бокового рычага к длине поперечной тяги  $m/n = 0,228$  (для разрезной трапеции за  $n$  принимаем условную длину – расстояние между шарнирами крепления поперечных тяг к боковым рычагам);
- длина рулевой сошки неразрезной трапеции  $r = 300$  мм;
- вылет рулевой сошки неразрезной трапеции относительно оси переднего моста  $f = 70$  мм;
- расстояние между центрами отверстий для крепления поперечных тяг к рулевой сошке неразрезной трапеции  $z = 70$  мм.

**Таблица 1. Кинематические параметры правильного поворота**

№ п/п	$\alpha_{в}$ , град	$\alpha_{н}$ , град	$R_{min}$ , м
1	1	0,991	136,387
2	5	4,786	27,699
3	10	9,183	14,05091
4	15	13,2501	9,455
5	20	17,0423	7,122
6	25	20,608	5,693
7	30	23,993	4,715
8	35	27,234	3,995
9	40	30,369	3,435

**Таблица 2. Кинематические параметры поворота, осуществляемого неразрезной рулевой трапецией**

№ п/п	$\alpha_{в}$ , град	$\alpha_{н}$ , град	$R_{min}$ , м	$e$ , м
1	1	0,994	218,9098	1,4404
2	5	4,864	43,892	1,417
3	10	9,463	21,681	1,345
4	15	13,8019	14,0556	1,233
5	20	17,875	10,10061	1,0843
6	25	21,669	7,6356	0,9062
7	30	25,161	5,936	0,7047
8	35	28,325	4,689	0,486
9	40	31,124	3,741	0,257

Таблица 3. Кинематические параметры поворота, осуществляемого разрезной рулевой трапецией

№ п/п	$\alpha_B$ , град	$\alpha_n$ , град	$R_{\min}$ , м	$e$ , м
1	1	0,992	153,656	0,3014
2	5	4,8075	30,934	0,283
3	10	9,249	15,346	0,228
4	15	13,339	9,989	0,143
5	20	17,0762	7,2098	0,0321
6	25	20,448	5,478	-0,100079
7	30	23,434	4,284	-0,249
8	35	26,001075	3,4109	-0,4088
9	40	28,112	2,748	-0,576

В сравнении с правильным поворотом, трактор Беларус-80.1, оснащенный неразрезной рулевой трапецией, выполняет поворот с гораздо большим радиусом, то есть обладает очень низкой маневренностью. Причем при меньших углах поворота колес расхождение минимальных радиусов поворота  $R_{\min}$  выше. Так, например, при  $\alpha_B = 10^\circ$  имеем увеличение на 7,83 м, или на 35,78%; при  $\alpha_B = 20^\circ$  – на 3,324 м (31,82%); при  $\alpha_B = 30^\circ$  – на 1,645 м (25,86%); при  $\alpha_B = 40^\circ$  – на 0,733 м (17,59%) (рис. 6). Таким образом, при крутых поворотах маневренность повышается. При этом мгновенный центр поворота  $O$  (рис. 4) во всем диапазоне углов поворота колес лежит на расстоянии  $e$  за задней осью машины (рис. 7). Его максимальные значения получены при малых углах поворота колес, минимальные – при больших.

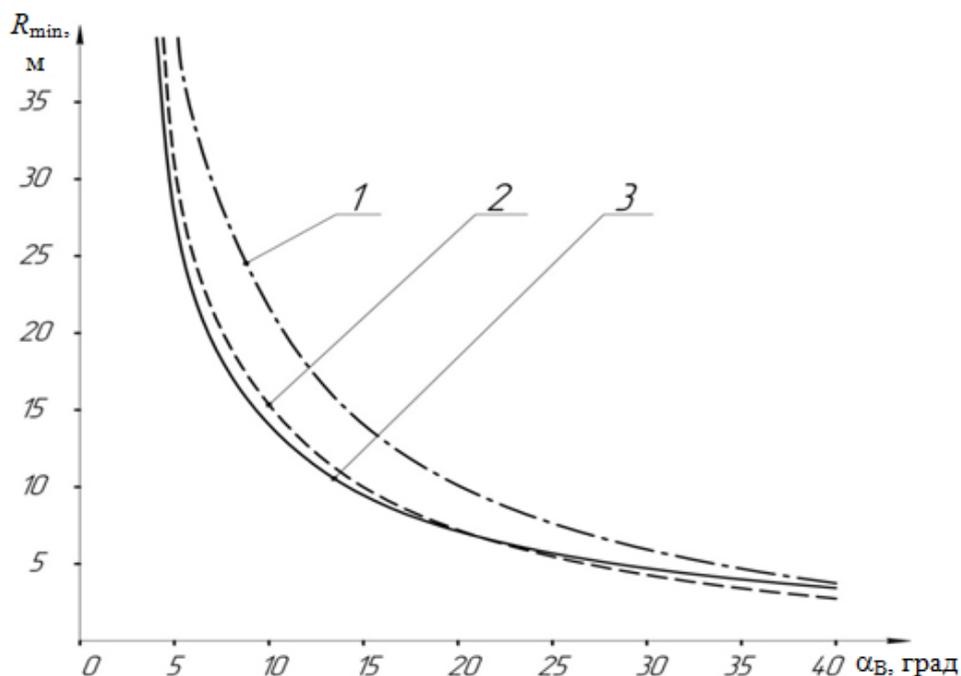


Рис. 6. Графики зависимостей минимального радиуса поворота трактора Беларус-80.1 от угла поворота внутреннего управляемого колеса: 1 – поворот, выполняемый трактором с неразрезной рулевой трапецией; 2 – поворот, выполняемый трактором с разрезной рулевой трапецией; 3 – правильный поворот трактора

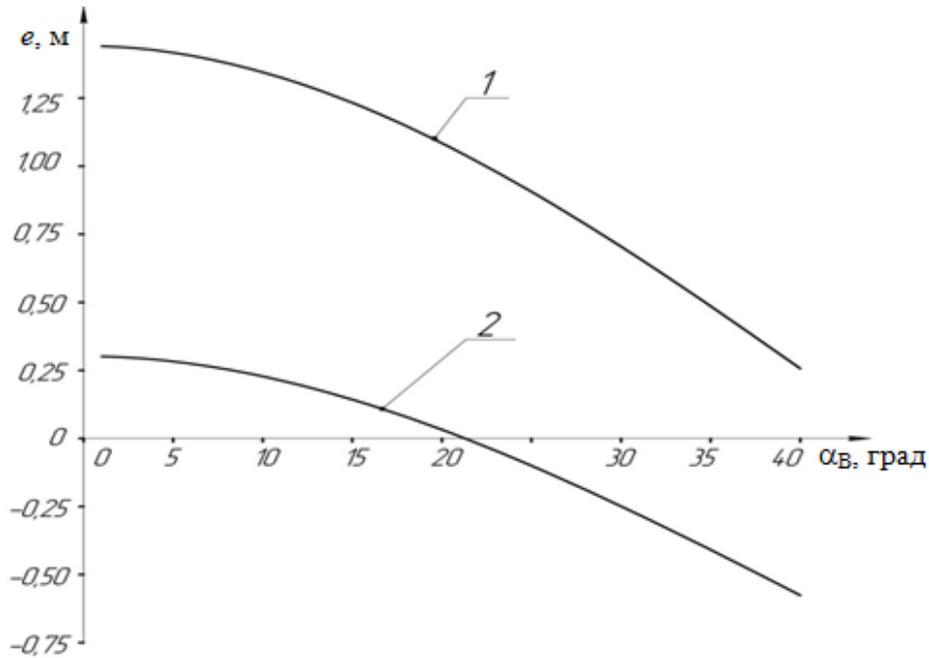


Рис. 7. Графики зависимостей отклонения мгновенного центра поворота трактора Беларус-80.1 от угла поворота внутреннего управляемого колеса: 1 – поворот, выполняемый трактором с неразрезной рулевой трапецией; 2 – поворот, выполняемый трактором с разрезной рулевой трапецией

Причина таких результатов лежит в расхождении угла поворота наружного колеса при идеальном повороте  $\alpha_{нп}$  и тем же углом  $\alpha_{нт}$  при повороте трактора, реализуемом неразрезной рулевой трапецией  $\Delta\alpha_n = \alpha_{нп} - \alpha_{нт}$ , которая, как оказалось, в изучаемом случае не совсем эффективно выполняет необходимые функции (рис. 8).

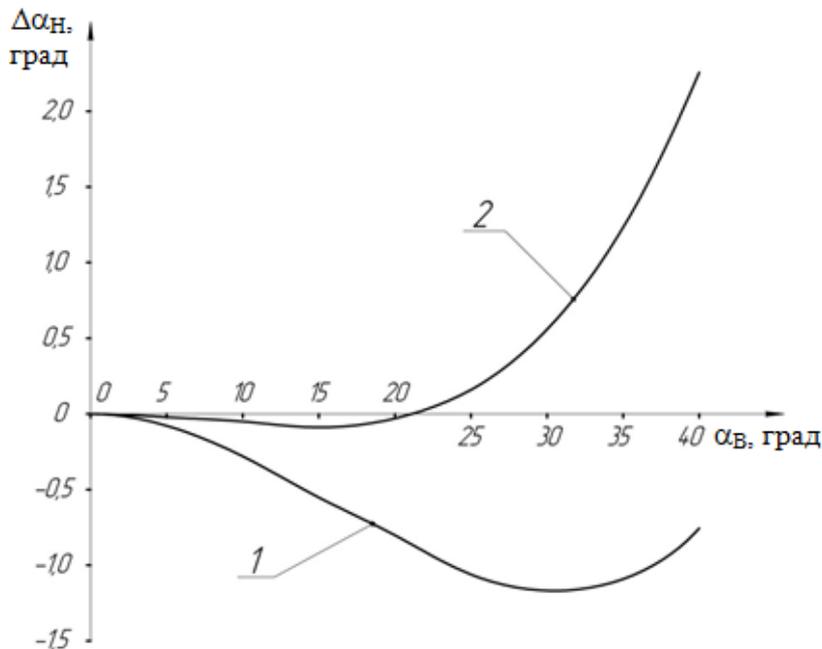


Рис. 8. Графики зависимостей разности между углами поворота наружного управляемого колеса, полученных при правильном повороте и повороте, реализуемом рулевой трапецией, от угла поворота внутреннего управляемого колеса трактора Беларус-80.1: 1 – поворот, выполняемый трактором с неразрезной рулевой трапецией; 2 – поворот, выполняемый трактором с разрезной рулевой трапецией

При оценке кинематики поворота трактора Беларус-80.1, осуществляемого разрезной рулевой трапецией, выявлено, что при углах поворота от  $\alpha_B = 0^\circ$  до  $\alpha_B \approx 22^\circ$  происходит увеличение  $R_{min}$  по отношению к правильному повороту:

- при  $\alpha_B = 5^\circ$  – на 3,235 м (10,46%);
- при  $\alpha_B = 10^\circ$  – на 1,27 м (8,29%);
- при  $\alpha_B = 15^\circ$  – на 0,534 м (5,35%);
- при  $\alpha_B = 20^\circ$  – на 0,0878 м (1,22%) (рис. 6).

В данном интервале углов поворота колес  $\alpha_B$  мгновенный центр поворота располагается также, как и в случае с неразрезной трапецией, за задней осью машины (рис. 7). При значении  $\alpha_B$ , составляющим примерно  $22^\circ$ , имеем практически полное совпадение кинематики правильного и рассматриваемого фактического поворота:  $R_{min}$  равны, а точка О лежит на линии продолжения задней оси.

При углах  $\alpha_B$  свыше  $22^\circ$  и до максимального  $\alpha_B = 40^\circ$  выявлено уменьшение  $R_{min}$  по отношению к правильному повороту:

- при  $\alpha_B = 25^\circ$  – на 0,215 м (3,78%);
- при  $\alpha_B = 30^\circ$  – на 0,431 м (9,15%);
- при  $\alpha_B = 35^\circ$  – на 0,584 м (14,62%);
- при  $\alpha_B = 40^\circ$  – на 0,687 м (20%) (рис. 6).

Точка О находится внутри колесной базы трактора (это положение зафиксировано на рис. 5), о чем свидетельствуют отрицательные значения расстояния  $e$  (табл. 3, рис. 7). При этом характер изменения величины  $e$  (рис. 7) полностью подтверждается зависимостью  $\Delta\alpha_H = f(\alpha_B)$  (рис. 8).

Таким образом, трактор, осуществляющий поворот посредством разрезной рулевой трапеции, повторяет кинематику идеального поворота лишь при одном значении углов поворота управляемых колес.

Хотя в определенном диапазоне углов поворота управляемых колес трактор здесь показывает более высокие маневровые свойства, но также проявляется тенденция к проскальзыванию колес относительно опорного основания, уплотнению и распылению почвы из-за возникновения экскавационно-бульдозерного эффекта.

Следовательно, обе рассматриваемые в работе конструкции рулевых трапеций не дают оптимального результата в направлении обеспечения благоприятных условий качения колес и в целом нормального функционирования трактора при криволинейном движении. Очевидно, что с точки зрения получения более рациональной кинематики поворота трактора использование разрезной трапеции более эффективно, о чем можно судить по величинам минимального радиуса поворота и по отклонению мгновенного центра поворота от продолжения задней оси машины, – они меньше, причем при большинстве углов поворота колес – значительно, что говорит о лучшей маневренности трактора и более щадящих условиях качения его колес.

### Выводы

1. Приведены конструктивные особенности четырехзвенного и шестизвенного шарнирно-рычажных механизмов рулевой трапеции трактора Беларус-80.1.
2. Выявлены основные критерии для оценки кинематики поворота колесной машины: минимальный радиус поворота  $R_{min}$  и положение мгновенного центра поворота.
3. Сравнением минимального радиуса поворота и отклонения мгновенного центра поворота от линии продолжения задней оси трактора Беларус-80.1 выявлено, что и неразрезная, и разрезная рулевые трапеции не позволяют выполнить поворот, соответствующий идеальному. С точки зрения наиболее благоприятных условий качения колес и лучшей маневренности наиболее предпочтительна рулевая трапеция с разрезной поперечной тягой.
4. В целях обеспечения чистого качения колес при движении трактора Беларус-80.1 на повороте необходим более тщательный теоретический анализ геометрии применяемых механизмов рулевого привода.

**Список источников**

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. Москва: Наука, 1988. 640 с.
2. Беляев А.Н., Оробинский В.И., Химченко А.В. и др. Определение положения мгновенного центра поворота и радиуса поворота при изменении ширины колеи колесного трактора // Наука в Центральной России. 2024. № 3(69). С. 73–84. DOI: 10.35887/2305-2538-2024-3-73-84.
3. Беляев А.Н., Химченко А.В., Тришина Т.В. и др. Исследование кинематики поворота колесной машины с изменяемой колеей // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 5. С. 542–552. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-627756>.
4. Гришкевич А.И., Ломако Д.М., Автушенко В.П. и др. Автомобили: конструкция, конструирование и расчет. Системы управления и ходовая часть: учебное пособие. Минск: Вышэйшая школа, 1987. 200 с.
5. Ксеневиц И.П., Гуськов В.В., Бочаров Н.Ф. и др. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет. Москва: Машиностроение, 1991. 544 с.
6. Раймпель Й. Шасси автомобиля. Рулевое управление; пер. с нем. Москва: Машиностроение, 1987. 232 с.
7. Руководство по эксплуатации тракторов Беларус-80.1/82.1/82P [Электронный ресурс] // ООО «Минский тракторный завод». URL: <https://mtz.ru/novosti/48-belarus-80-1-82-1-820-rukovodstvo-po-ekspluatatsii> (дата обращения: 18.06.2024).
8. Тракторы Беларусь МТЗ 80/82, 100/102. Руководство по ремонту и эксплуатации. Харьков: Трактормаш, 2001. 224 с.
9. Jazar Reza N. Vehicle Dynamics: Theory and Application. Switzerland: Springer Charm, 2008. 1167 p.
10. Simscape User's Guide. Math Works: Documentation R 2024a. TheMathWorks, Inc. 2024. URL: <https://manualmachine.com/mathworks/simscape3/10175871-user-guide/>.

**References**

1. Artobolevsky I.I. Theory of mechanisms and machines. Moscow: Nauka, 1988. 640 p. (In Russ.).
2. Belyaev A.N., Orobinsky V.I., Khimchenko A.V. et al. Determination of the position of the instantaneous center of rotation and the turning radius when changing the track width of a wheeled tractor. *Science in the Central Russia*. 2024;3(69):73-84. DOI: 10.35887/2305-2538-2024-3-73-84. (In Russ.).
3. Belyaev A.N., Khimchenko A.V., Trishina T.V. et al. Study of the turn kinematics of a wheeled vehicle with a variable track. *Tractors and agricultural machinery*. 2024;91(5):242-252. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-627756>. (In Russ.).
4. Grishkevich A.I., Lomako D.M., Avtushenko V.P. et al. Automobiles: design, engineering and calculation. Control systems and running gear: study guide. Minsk: Vyshayshaya shkola Publishers; 1987. 200 p. (In Russ.).
5. Ksenevich I.P., Guskov V.V., Bocharov N.F. et al. Tractors. Designing, engineering and calculation. Moscow: Mashinostroenie Publishers; 1991. 544 p. (In Russ.).
6. Reimpell J. Car Chassis. Steering Control (Fahrwerktechnik: Lenkung); translated from German. Moscow: Mashinostroenie Publishers; 1987. 232 p. (In Russ.).
7. Operation Manual. Tractor Belarus 80.1/82.1/82P. ООО "Minsk Tractor Works". URL: <https://mtz.ru/novosti/48-belarus-80-1-82-1-820-rukovodstvo-po-ekspluatatsii>. (In Russ.).
8. Tractors Belarus MTZ 80/82, 100/102. Repair and maintenance manual. Kharkiv: Traktormash Publishers; 2001. 224 p. (In Russ.).
9. Jazar Reza N. Vehicle Dynamics: Theory and Application. Switzerland: Springer Charm; 2008. 1167 p.
10. Simscape User's Guide. Math Works: Documentation R 2024a. TheMathWorks, Inc. 2024. URL: <https://manualmachine.com/mathworks/simscape3/10175871-user-guide/>.

**Информация об авторах**

А.Н. Беляев – доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой прикладной механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», [aifkm\\_belyaev@mail.ru](mailto:aifkm_belyaev@mail.ru), [aifkm@agroeng.vsau.ru](mailto:aifkm@agroeng.vsau.ru).

А.В. Химченко – кандидат технических наук, доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», [himch.arkady@yandex.ru](mailto:himch.arkady@yandex.ru).

А.М. Мухин – старший лаборант кафедры прикладной механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», [alex.fly2002@mail.ru](mailto:alex.fly2002@mail.ru).

Т.В. Тришина – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», [tata344@rambler.ru](mailto:tata344@rambler.ru).

**Information about the authors**

A.N. Belyaev, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Head of the Dept. of Applied Mechanics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, [aifkm\\_belyaev@mail.ru](mailto:aifkm_belyaev@mail.ru), [aifkm@agroeng.vsau.ru](mailto:aifkm@agroeng.vsau.ru).

A.V. Khimchenko, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, [himch.arkady@yandex.ru](mailto:himch.arkady@yandex.ru).

A.M. Mukhin, Senior Laboratory Assistant, the Dept. of Applied Mechanics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, [alex.fly2002@mail.ru](mailto:alex.fly2002@mail.ru).

T.V. Trishina, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Applied Mechanics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, [tata344@rambler.ru](mailto:tata344@rambler.ru).

Статья поступила в редакцию 15.11.2024; одобрена после рецензирования 26.12.2024; принята к публикации 15.01.2025.

The article was submitted 15.11.2024; approved after reviewing 26.12.2024; accepted for publication 15.01.2025.

© Беляев А.Н., Химченко А.В., Мухин А.М., Тришина Т.В., 2025

---

---