Тип статьи: научная
УДК 629.3.076
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-2-115-126

ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ НАВЕСНОЙ СИСТЕМЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА

***Александр Николаевич Беляев*[1], *Дмитрий Николаевич Афоничев*[2], *Татьяна Владимировна Тришина*[3], *Алексей Евгеньевич Новиков*[4], *Павел Викторович Шередекин*[5], *Ирина Алевтиновна Высоцкая*[6]**

[1,2,3,4]*Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, г. Воронеж, Россия*

[5]*Институт защиты семян ООО «Сингента», г. Воронеж, Россия*

[6]*Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия*
Министерства обороны Российской Федерации

[1]aifkm_belyaev@mail.ru, [2] dmafonichev@yandex.ru, [3]t.v.trishina@gmail.com, [4]novikov-alexey1@yandex.ru, [5]pavel.sheredekin@syngenta.com, [6]i.a.trishina.gmail.com

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

Реферат. *Поиск конструктивный решений, позволяющих снизить влияние инерционных сил на процесс криволинейного движения машинно-тракторного агрегата при криволинейном движении, является актуальной проблемой, связанной не только со снижением динамических нагрузок на трактор и оборудование, агрегатируемое с ним, но с сохранением устойчивости движения. В качестве объекта исследований выбран круговой беспетлевой поворот. Опытная навесная система разработана для решения поставленных в работе задач. Она отличается от базовой тем, что между навесной рамкой трактора Беларус-1221.2 и навесной рамкой сеялки СТВ-12 установлен упругий элемент из полиуретана, обладающего наиболее подходящими физико-механическими свойствами. Нелинейная аппроксимация массива величин абсцисс и ординат кривой траектории входа в поворот, рассчитанных с помощью параметрического вида уравнений для окружности постоянного радиуса участка установившегося поворота, позволила описать нелинейными функциями явного вида два рассматриваемых этапа теоретической траектории поворота. Анализ массивов теоретических и экспериментальных значений координат кривых траекторий дал постоянное значение коэффициента сдвига теоретической траектории для исследуемых условий эксплуатации агрегата* $k_y = 1{,}12$*, умножением на который явной теоретической функции получена параметрическая функция действительной траектории поворота. Сравнение траекторий показало целесообразность использования упругих элементов в местах сочленения трактора с оборудованием, применение полиуретана приводит к сохранению траектории, так как отклонение действительной траектории от теоретической при базовой комплектации по высоте поворотной полосы на 1,6…2,25 м, а при опытной – на 0,6…1,13 м, длина теоретических кривых при этом равна 8,21…10,82 м, а действительных: с базовой навеской 11,223…12,792 м, с опытной – 9,652…11,854 м. Сравнение результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, показало, что наибольшая их разница не превышает 4 %, что позволяет сделать вывод об их корректности.*

Ключевые слова: *машинно-тракторный агрегат, траектория, поворот, радиус кривизны, координата, устойчивость движения, функция явного вида, корректирующий коэффициент, навесная система, упругий элемент.*

THE INFLUENCE OF THE RIGIDITY OF THE HINGED SYSTEM ON THE STABILITY OF THE CURVED MOVEMENT OF THE MACHINE-TRACTOR UNIT

***Alexander Belyaev*[1], *Dmitry Afonichev* [2], *Tatiana Trishina* [3], *Alexey Novikov* [4], *Pavel Sheredekin* [5], *Irina Vysotskaya* [6]**
[1,2,3,4]*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*
[5]*Institute of Seed Protection LLC «Syngenta», Voronezh, Russia*
[6]*Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air force Academy, Voronezh, Russia*
Ministry of Defence of the Russian Federation
[1]aifkm_belyaev@mail.ru, [2] dmafonichev@yandex.ru, [3]t.v.trishina@gmail.com, [4]novikov-alexey1@yandex.ru, [5]pavel.sheredekin@syngenta.com, [6]i.a.trishina.gmail.com

Abstract. *The search for constructive solutions to reduce the influence of inertial forces on the process of curved movement of a machine-tractor unit during curved movement is an urgent problem associated not only with reducing dynamic loads on the tractor and equipment aggregated with it, but with maintaining the stability of movement. A circular loop-free turn was chosen as the object of research. An experimental hinged system is designed to solve the tasks set in the work. It differs from the basic one in that between the hinged frame of the Belarus-1221.2 tractor and the hinged frame of the STV-12 seeder, an elastic element made of polyurethane is installed, which has the most suitable physical and mechanical properties. Nonlinear approximation of the array of abscissas and ordinates of the turn entry trajectory curve, calculated using the parametric form of equations for a circle of constant radius of the steady turn section, made it possible to describe the two considered stages of the theoretical turn trajectory by explicit non-linear functions. Analysis of arrays of theoretical and experimental values of the coordinates of the curves of the trajectories gave a constant value of the shift coefficient of the theoretical trajectory for the studied operating conditions of the unit 1.12, multiplying by which the explicit theoretical function obtained a parametric function of the actual trajectory of rotation. The comparison of trajectories showed the expediency of using elastic elements at the points of articulation of the tractor with the equipment, the use of polyurethane leads to the preservation of the trajectory, since the deviation of the actual trajectory from the theoretical one with the basic configuration in the height of the turning strip is 1.6... 2.25 m, and with the experimental one – 0.6 ... 1.13 m, the length of the theoretical curves is 8.21...10.82 m, and valid: with a base hitch of 11,223...12,792 m, with an experimental one – 9,652 ...11,854 m. A comparison of the results of theoretical studies with experimental data showed that their greatest difference does not exceed 4%, which allows us to conclude that they are correct.*

Keywords: *machine-tractor unit, trajectory, turn, radius of curvature, coordinate, stability of movement, explicit function, correction factor, hinged system, elastic element.*

Для цитирования: Беляев А.Н., Афоничев Д.Н., Тришина Т.В., Новиков А.Е., Шередекин П.В., Высоцкая И.А. Влияние жесткости навесной системы на устойчивость криполинейного движения машинно-тракторного агрегата // Наука в центральной России. 2023. Т. 62, № 2. С. 115-126. https://doi.org/10.35887/2305- 2538-2023-2-115-126.

For citation: Belyaev A., Afonichev D., Trishina T., Novikov A., Sheredekin P., Vysotskaya I. The influence of the rigidity of the hinged system on the stability of the curved movement of the machine-tractor unit. Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia: 2023; 62(2): 115-126. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-115-126.

Введение. Тенденция роста посевных площадей сельскохозяйственных культур, например, на 1,4 млн. га в 2022 году в сравнении с 2021 годом, наблюдающаяся в последние годы в Российской Федерации [1], вызывает потребность в технике для возделывания этих угодий, что, в свою очередь, является также фактором стимулирования спроса на качественную сельскохозяйственную технику.

Для возделывания земель используются тракторы с различными вариантами присоединения к ним рабочих агрегатов. Существуют следующие типы почвообрабатывающих машин: прицепные, полуприцепные, навесные. Все указанные виды агрегатов обладают рядом преимуществ и недостатков, однако, как показывает практика, навесные орудия являются наиболее

эффективными в работе. Основными их преимуществами являются: простая конструкция, меньший вес и металлоемкость, высокая маневренность и простота эксплуатации [2].

Однако, применение навесных орудий и увеличение скорости движения машинно-тракторных агрегатов (МТА) на базе колесных тракторов при выполнении рабочих процессов приводит к существенному изменению эксплуатационных характеристик агрегата, которые напрямую влияют на его поворачиваемость при криволинейном движении на поворотной полосе. При агрегатировании сельскохозяйственных машин и орудий на задней навесной системе трактора происходит увеличение инерционных сил, возникающих в ней; эти силы способствуют его смещению с первоначальной траектории движения из-за бокового скольжения и заноса задней оси, вследствие чего увеличивается радиус поворота, расход топлива, количество воздействий оператора на органы управления, ухудшается его психофизическое состояние, происходит более интенсивное уплотнение и распыление почвы, что, в итоге, крайне отрицательно влияет на выполнение технологической операции [3].

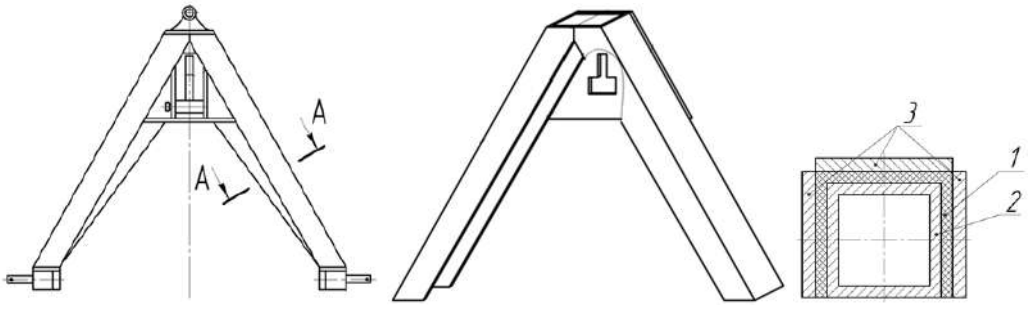
Так как суммарный путь МТА на поворотной полосе может достигать до 30…40 % от всего пути, пройденного трактором по полю [4], то, следовательно, в целях обеспечения необходимого качества выполнения сельскохозяйственных работ, сохранения необходимого уровня ресурсосбережения и улучшения условий труда требуется повышение показателей устойчивости и управляемости трактора.

Одним из путей уменьшения влияния заднего навесного орудия на процесс криволинейного движения МТА является снижение инерционных нагрузок со стороны орудия на трактор [3].

Исходя из вышесказанного, целью настоящей работы является повышение устойчивости МТА при криволинейном движении за счет снижения динамических нагрузок в заднем навесном устройстве.

Ввиду этого задачами исследований являются усовершенствование конструкции заднего навесного устройства за счет применения упругих элементов в местах соединения трактора с орудием, так как именно этот узел является источником передачи различных нагрузок на опорные колеса машины, и теоретическое обоснование влияния предложенных конструктивных изменений на технико-эксплуатационные характеристики МТА.

Результаты и обсуждение. Усовершенствована конструкция задней навесной системы [5], в которой между охватываемой навесной рамкой трактора (рисунок 1а) и охватывающей навесной рамкой орудия (рисунок 1б) размещена прокладка из упругого материала (рисунок 1в) [6]. Прокладка из эластомера *1* установлена на внешних охватываемых поверхностях квадратных труб *2*. Для сохранения качественных показателей упругого материала прокладки, в первую очередь, для предотвращения задиров в момент сочленения трактора и орудия, к ней сверху прикреплены металлические пластины *3* (рисунок 1в).



а) б) в)

а – охватываемая рамка навесной системы; б – охватывающая рамка навесной системы; в – сечение А–А охватываемой рамки навесной системы

Рисунок 1 – Усовершенствованная конструкция задней навесной системы трактора

Указанные конструктивные изменения были внесены в навесную систему трактора Беларус-1221.2, способного выполнять обширный ряд сельскохозяйственных операций и, который

является в настоящее время основной тяговой единицей в сельскохозяйственном производстве Российской Федерации [7].

В качестве упругого материала для изготовления эластичной прокладки использован полиуретан. Предпочтение ему обусловлено его физическими и механическими свойствами, среди которых, кроме того, что он обладает наилучшими характеристиками для гашения вибраций и имеет при необходимых минимальных размерах требуемые для выбранных нагрузочных параметров упругие характеристики, также стоит выделить следующие [8, 9].

1. Высокая абразивная стойкость.
2. Высокая прочность на разрыв.
3. Способность противостоять достаточно высоким нагрузкам.
4. Широкий диапазон твердости.
5. Высокая устойчивость к распространению надрезов.
6. Высокая устойчивость к атмосферным воздействиям – озону, кислороду, влаге, ультрафиолетовой радиации, нагреву.
7. Низкий коэффициент трения.
8. Длительное сохранение рабочих размеров.
9. Возможность практически всех видов механической обработки.

Все эти преимущества позволили сделать вывод, что полиуретан является наиболее подходящим материалом для использования в качестве эластомера в модернизированной навесной системе без каких-либо конструктивных изменений серийной системы.

При проведении полевых работ трактор Беларус-1221.2 способен работать в составе с различными навесными агрегатами: плугом, культиватором, сеялкой и т.д. Так как конструктивные, массово-габаритные параметры культиватора и сеялки во многом совпадают, то, следовательно, условия движения МТА при повороте при этом достаточно близки, и, соответственно, большую часть времени эксплуатации при проведении полевых работ трактор работает в составе указанных агрегатов, поэтому в качестве объекта исследований выбран машинно-тракторный агрегат, составленный по схеме: Беларус-1221.2+СТВ-12 [2, 10].

Очевидно, способ поворота МТА зависит от типа и состава агрегата, агротехнических требований, размеров обрабатываемого участка, но, так как в каждом способе движения на поворотной полосе заложены элементы кругового беспетлевого поворота [2, 4], именно он является объектом наших исследований [11].

Применив методику, изложенную в работах [3, 12, 13, 14], и положив в ее основу классическую формулу для определения теоретического минимального радиуса поворота $R_T = L / \operatorname{tg}\alpha_{cp}$, где L – продольная база машины, м; α_{cp} – средний угол поворота передних управляемых колес, рад. (рисунок 2) [15, 16, 17, 18] получены уравнения параметрического вида для определения теоретических значений абсцисс $x(t)$ и ординат $y(t)$ кривых траекторий движения середины заднего моста, принятого за кинематический центр, при входе в поворот колесной машины:

$$x(t) = -v\int_0^{t_1} \sin\left(\frac{v\ln\cos\omega t_1}{L\omega}\right)dt_1;$$
$$y(t) = v\int_0^{t_1} \cos\left(\frac{v\ln\cos\omega t_1}{L\omega}\right)dt_1, \quad (1)$$

где v – скорость поступательного движения колесной машины, м/с;

ω – угловая скорость поворота передних управляемых колес, рад/с;

t_1 – время движения машины, с.

Нелинейной аппроксимацией расчетных данных уравнений $x(t)$ и $y(t)$ (1) [19, 20] получены функции явного вида и проведена их «склейка» с окружностью постоянного радиуса участка установившегося поворота, что позволило описать два указанных этапа кривых теоретической траектории кругового беспетлевого поворота нелинейными функциями явного вида. Например,

для одного из вариантов эксплуатационных условий и конструктивных параметров, соответствующих техническим характеристикам трактора Беларус-1221.2 [21]: $v = 2{,}556$ м/с, $\omega = 0{,}155$ рад/с, $L = 2{,}78$ м, $\alpha_{cp\,\max} = 0{,}62$ рад. – максимальный средний угол поворота передних управляемых колес, $t_1 = 4$ с – время движения до окончания входа в поворот (рисунок 3, кривая *1*) [19, 20, 22]:

$$y(x) = \begin{cases} 6{,}445x^{0{,}33} - 0{,}085x^{1{,}932}, & x < 3{,}643; \\ 5{,}168 + \sqrt{15{,}163 - (x - 4{,}924)^2}, & x > 3{,}643. \end{cases} \quad (2)$$

Верхнее уравнение в системе (2) относится к участку входа в поворот, нижнее – к участку установившегося поворота.

Радиус кривизны траектории входа в поворот $\rho(x)$, описываемой первой функцией (2), определяется по формуле [19, 20, 22]

$$\rho(x) = \frac{\left(1 + \left[\frac{dy(x)}{dx}\right]^2\right)^{1,5}}{\left|\frac{d^2y(x)}{dx^2}\right|}. \quad (3)$$

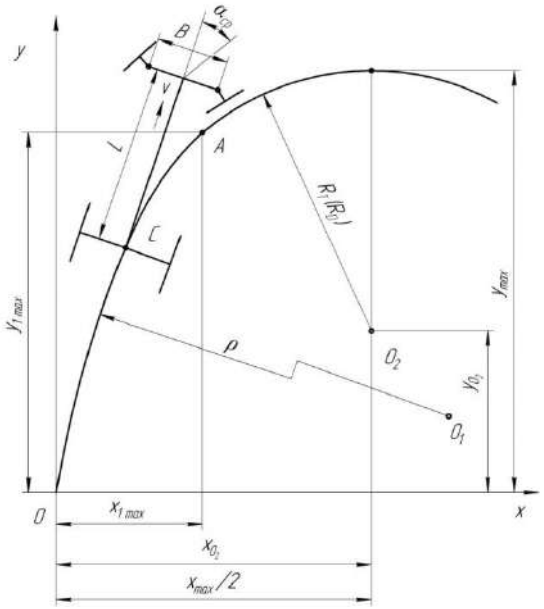


Рисунок 2 – Расчетная кинематическая схема поворота трактора

Для первой функции системы (2) из уравнения (3) имеем

$$\rho(x) = \frac{\left(1 + \left(2{,}127x^{-0.67} - 0{,}164x^{0{,}932}\right)^2\right)^{1,5}}{\left|-1{,}425x^{-1.67} - 0{,}153x^{-0{,}068}\right|}. \quad (4)$$

В уравнении (4) выражение под модулем равное $-1{,}425x^{-1.67} - 0{,}153x^{-0{,}068} < 0$ при $0 < x < 3{,}643$, а поэтому если снять модуль, то знак поменяется на противоположный

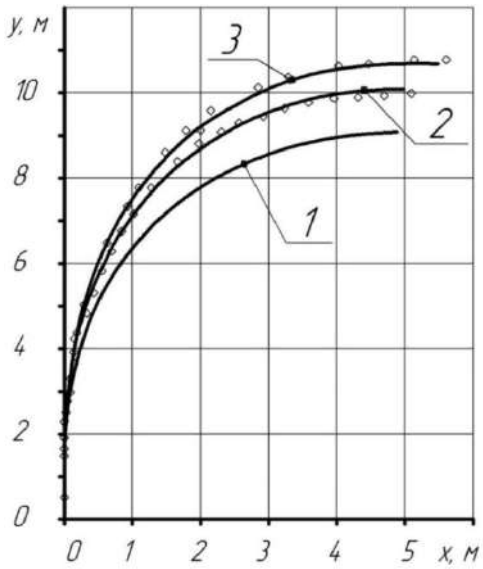
$$\rho(x) = \frac{\left(1 + \left(2{,}127x^{-0.67} - 0{,}164x^{0{,}932}\right)^2\right)^{1,5}}{1{,}425x^{-1.67} + 0{,}153x^{-0{,}068}}. \quad (5)$$

Выражение (5) использовано для определения теоретического радиуса кривизны участка установившегося поворота R_T при максимальном значении абсциссы окончания этапа входа в поворот $x_{1\max} = 3{,}643$ м. Значение максимальной ординаты участка входа в поворот при этом $y_{1\max} = 3{,}846$ м, центр кривизны сопрягаемой с ним окружности лежит в точке с координатами $x_{O2} = 4{,}924$ м, $y_{O2} = 5{,}168$ м, а $R_T = 3{,}899$ м, что практически совпадает со значением $R_T = 3{,}894$ м, полученным расчетом по формуле $R_T = L / \operatorname{tg}\alpha_{cp}$ при $L = 2{,}78$ м и $\alpha_{cp\,\max} = 0{,}62$ рад., что и должно быть.

Как видно, исследованию подвергается только левая ветвь выбранного вида поворота, для правой ветви траектории поворота (для части участка установившегося поворота и участка выхода из поворота) будем считать траекторию МТА абсолютно «зеркальной» левой ветви, что вполне оправдано, так как при этом происходит переход от более динамически нагруженного состояния к менее нагруженному [3].

При проведении экспериментальных исследований МТА Беларус-1221.2+СТВ-12 с модернизированной навесной системой [6] в реальных условиях эксплуатации с помощью современной высокоточной навигационной системы [23] были получены массивы действительных значений абсцисс и ординат кривых траекторий кинематического центра трактора (рисунок 3, точки, лежащие на кривой *2* или близкие к ней). Опытные заезды, обработка и анализ результатов осуществлялись с соблюдением рекомендаций и соответствующих норм и правил, изложенных в [24, 25], и апробированных [3] на поле с фоном, подготовленным под посев, с типом почвы – выщелоченный чернозем в соответствии с ГОСТ 7057-2001 [26]. Исходя из анализа и сравнения массива экспериментальных данных с массивом теоретических значений абсцисс и ординат (5), для аналитического получения действительной траектории принят корректирующий коэффициент сдвига теоретических траекторий (2) $k_y = 1{,}12$ [19]. При этом уравнение реальной кривой траектории участка входа в поворот для принятых условий принимает следующий вид

$$y_Д(x) = k_y y(x) = 7{,}218x^{0{,}33} - 0{,}095x^{1{,}932}. \qquad (6)$$



◊ – экспериментальные точки траекторий поворота,
1 – график аппроксимирующей явного вида функции теоретической траектории поворота,
2 – график аппроксимирующей явного вида функции действительной траектории поворота (опытная навеска), *3* – график аппроксимирующей явного вида функции действительной траектории поворота (базовая навеска)

Рисунок 3 – Траектории поворота трактора при $v = 2{,}556$ м/с, $\omega = 0{,}155$ рад/с

Подставим формулу (6) в уравнение (3), опустим модуль и получим:

$$\rho(x)=\frac{\left(1+\left(2,382x^{-0.67}-0,184x^{0,932}\right)^2\right)^{1,5}}{1,596x^{-1.67}+0,171x^{-0,068}}. \quad (7)$$

Склейка функций (6) и (7) позволила получить аппроксимирующие функции явного вида для двух основных ветвей действительных кривых траекторий кругового беспетлевого поворота (рисунок 3, кривая *2*):

$$y_{Д}(x)=\begin{cases}7,218x^{0,33}-0,095x^{1,932}, & x<3,643;\\ 6,473+\sqrt{13,221-\left(x-4,959\right)^2}, & x>3,643.\end{cases} \quad (8)$$

Соответствующие (8) максимальные координаты конца участка входа в поворот при завершении данного маневра и центра сопрягаемой с ним окружности $R_{Д}$ участка установившегося поворота равны соответственно $x_{1\max}=3,643$ м, $y_{1\max}=9,863$ м и $x_{O2}=4,959$ м, $y_{O2}=6,473$ м; действительный радиус поворота – радиус окружности участка установившегося поворота $R_{Д}=3,636$ м (рисунок 3, кривая *2*).

Проведя аналогичные эксперименты, рассуждения и расчеты для исходных данных: $v=1,86$ м/с, $\omega=0,31$ рад/с, $L=2,78$ м, $\alpha_{cp\max}=0,62$ рад., $t_1=2$ с, получен явный вид функции теоретической траектории:

$$y(x)=\begin{cases}4,625x^{0,333}-0,236x^{1,5}, & x<0,528;\\ 1,974+\sqrt{15,163-\left(x-4,043\right)^2}, & x>0,528.\end{cases} \quad (9)$$

Для функции (9) $x_{1\max}=0,528$ м, $y_{1\max}=3,649$ м; $x_{O2}=4,043$ м, $y_{O2}=1,974$ м; $R_{T}=3,902$ м (как и в первом случае, имеем практически совпадение с $R_{T}=3,894$ м, определенным по формуле $R_{T}=L/\operatorname{tg}\alpha_{cp}$).

При этом анализ массивов теоретических и опытных значений координат траекторий также дал значение $k_{y}=1,12$ и явная параметрическая функция приняла следующий вид (рисунок 4, кривая *2*):

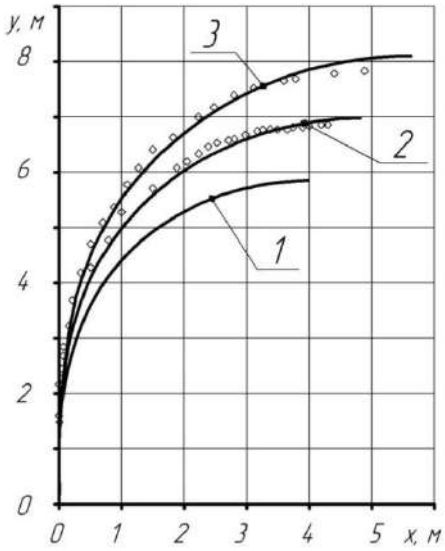
$$y_{Д}(x)=\begin{cases}5,18x^{0,333}-0,264x^{1,5}, & x<0,528;\\ 2,303+\sqrt{21,953-\left(x-4,845\right)^2}, & x>0,528.\end{cases} \quad (10)$$

Формула для определения радиуса окружности этапа установившегося поворота получена подстановкой первой функции системы (10) в уравнение (3)

$$\rho_1(x)=\frac{\left(1+\left(1,725x^{-0.667}-0,396x^{0,5}\right)^2\right)^{1,5}}{1,15x^{-1.667}+0,198x^{-0,5}}. \quad (11)$$

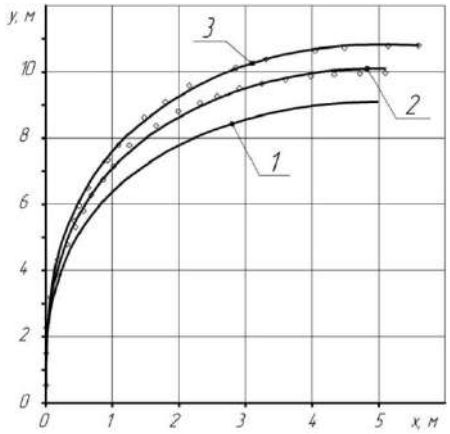
Геометрические параметры кривой траектории (10) следующие (рисунок 4, кривая *2*): $x_{1\max}=0,528$ м, $y_{1\max}=4,124$ м; $x_{O2}=4,845$ м, $y_{O2}=2,3033$ м; $R_{Д}=4,685$ м (11).

На рисунках 3 и 4 приведены также экспериментальные точки координат кривых траекторий поворота и полученные с использованием вышеизложенной методики аппроксимирующие эти точки графики (кривые *3*) для исследуемого МТА с базовой навесной системой при выбранном для обоих вариантов коэффициенте 1,2. Максимальное отклонение расчетных кривых траекторий по оси ординат от экспериментальных точек составило 0,153 м и 0,214 м (рисунок 3, кривые *2* и *3*), что дает, соответственно, 1,5 % и 2 % погрешности, а по второму варианту (рисунок 4, кривые *2* и *3*) имеем 0,296 м и 0,217 м, то есть 4 % и 2,6 %.



◊ – экспериментальные точки траекторий поворота,
1 – график аппроксимирующей явного вида теоретической функции траектории поворота,
2 – график аппроксимирующей явного вида функции действительной траектории поворота (опытная навеска), *3* – график аппроксимирующей явного вида функции действительной траектории поворота (базовая навеска)
Рисунок 4 – Траектории поворота трактора при $v = 1{,}86$ м/с, $\omega = 0{,}31$ рад/с

Таким образом, для обоих вариантов начально-исходных конструктивных параметров и кинематических характеристик имеем постоянный коэффициент сдвига теоретической траектории при использовании упругого элемента в навесной системе $k_y = 1{,}12$, соответствующий выбранным основным условиям эксплуатации: комплектации агрегата и свойствам опорной поверхности.



◊ – экспериментальные точки траекторий поворота,
1 – график параметрической функции теоретической траектории поворота,
2 – график параметрической функции действительной траектории поворота (опытная навеска),
3 – график параметрической функции действительной траектории поворота (базовая навеска)
Рисунок 5 – Траектории поворота трактора при $v = 2{,}556$ м/с, $\omega = 0{,}155$ рад/с

Адекватность полученных результатов исследований доказывает и тот факт, что умножение на коэффициент $k_y = 1{,}12$ формул параметрических функций (1) и теоретического минимального радиуса поворота ($R_T = L / \operatorname{tg} \alpha_{cp}$) дали графики (рисунок 5), практически совпадающие и с экспериментальными точками кривых траекторий и с соответствующими графиками рисунка 3. При этом получены следующие значения длин соответствующих траекторий полного цикла кругового беспетлевого поворота: по рисунку 3: $l_1 = 21{,}64$ м (кривая *1*), $l_2 = 23{,}708$ м (кривая *2*), $l_3 = 25{,}584$ м (кривая *3*); по рисунку 5: $l_1 = 23{,}194$ м (кривая *1*), $l_2 = 25{,}228$ м (кривая *2*), $l_3 = 27{,}773$ м (кривая *3*), где максимальное расхождение составило не более 7,1 %. Абсциссы $x_{\max}$ и ординаты $y_{\max}$ поворотной полосы в данных случаях отличаются друг от друга, соответственно, в пределах 4 % и 1 % и имеют величины: 9,792 м и 9,08 м (рисунок 3, кривая *1*); 9,95 м и 10,092 м (рисунок 3, кривая *2*); 10,752 м и 10,678 м (рисунок 3, кривая *3*); 9,984 м и 9,094 м (рисунок 5, кривая *1*); 10,232 м и 10,095 м (рисунок 5, кривая *2*); 11,232 м и 10,792 м (рисунок 5, кривая *3*).

Как видно, при использовании базовой навесной системы имеем более значительное, на $\Delta x_{\max} = 0{,}98$ м, $\Delta y_{\max} = 1{,}6$ м (рисунок 3) и на $\Delta x_{\max} = 3{,}3$ м, $\Delta y_{\max} = 2{,}25$ м (рисунок 4) максимальное отклонение для обоих режимов движения МТА от заданной траектории в сравнении с тем же агрегатом с опытной навеской: $\Delta x_{\max} = 0{,}32$ м, $\Delta y_{\max} = 0{,}6$ м (рисунок 3) и $\Delta x_{\max} = 1{,}7$ м, $\Delta y_{\max} = 1{,}13$ м (рисунок 4), что позволит уменьшить площадь поворотной полосы примерно на 12,5…25 %. При этом длина полного цикла изучаемого вида поворота сократилась соответственно на 1,9 м и 3,14 м, что позволит снизить расход топлива трактором.

Также предложенный подход к аналитическому представлению действительной траектории позволяет определить величину бокового отклонения трактора от заданной траектории без проведения очень сложных, материалоемких, трудозатратных и гораздо более дорогостоящих экспериментов по оценке условий качения каждого колеса трактора [27].

Выводы.

1. Так как силовое воздействие на колеса трактора со стороны навесного оборудования передается через продольные тяги, то его уменьшение возможно за счет установки упругих полиуретановых элементов в местах сочленения трактора с оборудованием, что также, в свою очередь позволит устранить асимметрию передачи весовой нагрузки от оборудования на навесное устройство трактора, которое возникает ввиду неплотного прилегания между соединительной рамкой оборудования и треугольником на тракторе, и устранить неравномерное распределение крутящих моментов по колесам.

2. Анализ результатов расчетов по полученным аналитическим функциям явного вида для описания теоретической и действительной кривых траектории поворота трактора подтвердил целесообразность использования упругих элементов в местах сочленения трактора с оборудованием, так как отклонение действительной траектории от теоретической при базовой комплектации по высоте поворотной полосы больше на 1,6…2,25 м, а при опытной – на 0,6…1,13 м, длина траектории поворота при этом уменьшается на 1,9…3,14 м. . Выявленное значение коэффициента сдвига $k_y = 1{,}12$ теоретической траектории от действительной является постоянным для выбранной комплектации агрегата и условий движения.

3. Корректность полученных результатов исследований подтверждается совпадением кривых действительных траекторий, рассчитанных с помощью функций явного и параметрического вида, и выявленными при этом одинаковыми коэффициентами сдвига, и, тем, что наибольшая разница параметров этих кривых не превышает 1…7 %

Список источников

1. Полухин А.А., Латнева Н.А., Парушина Н.В. Анализ рынка зерновых и зернобобовых культур в системе ФГИС «ЗЕРНО» для продовольственной безопасности страны // Зернобобовые и крупяные культуры, 2022. № 4(44). С. 12–23.

2. Спицын И.А. и др. Сельскохозяйственная техника и технологии; под ред. И.А. Спицына. М.: Колос, 2006. 646 с.

3. Беляев А.Н. Повышение эффективности работы машинно-тракторных агрегатов на базе интегральных универсально-пропашных колесных тракторов: дис. … д-ра техн. наук: 05.20.01 / А.Н. Беляев. Мичуринск-наукоград, 2019. 440 с.

4. Иофинов С.А. Эксплуатация машинно-тракторного парка. М.: Колос, 1974. 430 с.

5. ГОСТ 10677-2001. Устройство навесное заднее сельскохозяйственных тракторов классов 0,6-8. Типы, основные параметры и размеры. Введ. 2004-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 10 с.

6. Патент на полезную модель № 204692 РФ, МПК A01B 61/02. Устройство для навески машин на трактор / А.Н. Беляев, В.Д. Бурдыкин Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, И.В. Высоцкая; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. № 2020128722; заявл. 28.08.20; опубл. 07.06.21. Бюл. № 31. 10 с.

7. Автоматизированная справочная система «Сельхозтехника» [Электронный ресурс] / АГРОБИЗНЕС. КОНСАЛТИНГ. Электрон. дан. info@agrobase.ru. Режим доступа: http //www\\ agrobase.ru, свободный. Загл. с экрана.

8. Яковлев С.Н. О некоторых физических свойствах конструкционных полиуретанов // Известия СПБТИ. 2013. № 20. С. 78–80.

9. Яковлев С.Н. Расчет полиуретановых деталей, работающих на сжатие при статической нагрузке // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. № 1(190). 2014. С. 137–142.

10. Кленин Н.И., Киселев С.Н., Левшин А.Г. Сельскохозяйственные машины. М.: Колос, 2008. 816 с.

11. Беляев А.Н. и др. Обоснование методики экспериментальных исследований криволинейного движения колесной машины // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной научно-практической конференции (Россия, Воронеж, 25 февраля 2022 г.). Ч. II. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. С. 168–175.

12. Беляев А.Н., Афоничев Д.Н., Тришина Т.В. Оценка параметров клотоидной траектории входа в поворот колесной машины // Наука в Центральной России. 2022. № 2 (56). С. 30–37.

13. 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. P. 4527–4531.

14. Belyaev A.N., Shatsky V.P., Kozlov V.G., Trishina T.V., Vysotskaya I.A. Determination of Theoretical Path of Vehicle Motion upon Cornering // Journal of Applied Science and Engineering. Taiwan. 2022. Vol. 25. № 5. P. 741–747.

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

16. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

17. Болотин С.В. и др. Теоретическая механика. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 432 с.

18. Гуськов В.В. Тракторы: теория; под ред. В.В. Гуськов. М.: Машиностроение, 1988. 374 с.

19. Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах. М.: ДМК-Пресс, 2011. 800 с.

20. Дьяконов В.П. Энциклопедия компьютерной алгебры. М.: ДМК-Пресс, 2009. 1264 с.

21. Беларус-1221.2/1221В.2/1221.3: руководство по эксплуатации. РУП «Минский тракторный завод», 2009. 292 с.

22. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: Наука, 1961. 871 с.

23. Беляев А.Н. и др. Адаптация навигационной системы на тракторе Беларус-1221.2 // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной научно-практической конференции (Россия, Воронеж, 25 февраля 2022 г.). Ч. I. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. С. 230–236.

24. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных. М.: Колос, 1973. 194 с.

25. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Сельхозиздат, 1985. 352 с.

26. ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. Введ. 2003-01-0. М.: Изд-во стандартов, 2001. 7 с.

27. Трояновская И.П. Механика криволинейного движения тракторных агрегатов. Челябинск: Издательств Челябинского ГАУ, 2009. 152 с.

References

1. Polukhin A.A., Latneva N.A., Parushina N.V. Analysis of the market of grain and leguminous crops in the FSIS "GRAIN" system for the food security of the country // Grain legumes and cereals, 2022. No. 4(44). pp. 12–23.

2. Spitsyn I.A. etc. Agricultural machinery and technologies; ed. I.A. Spitsyn. M.: Kolos, 2006. 646 p.

3. Belyaev A.N. Improving 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.

4. Iofinov S.A. Operation of the machine and tractor fleet. M.: Kolos, 1974. 430 p.

5. GOST 10677-2001. Rear attachment device for agricultural tractors of classes 0.6-8. Types, basic parameters and sizes. Introduction 2004-01-01. M.: Publishing house of standards, 2002. 10 p.

6. Utility model patent No. 204692 RF, IPC A01B 61/02. Device for attaching machines to a tractor / A.N. Belyaev, V.D. Burdykin T.V. Trishina, A.E. Novikov, I.V. Vysotskaya; applicant and patent holder FGBOU VO Voronezh State Agrarian University. No. 2020128722; dec. 08/28/20; publ. 06/07/21. Bull. No. 31. 10 p.

7. Automated reference system "Selkhoztekhnika" [Electronic resource] / AGRIBUSINESS. CONSULTING. Electron. Dan. info@agrobase.ru. Access mode: http //www\\agrobase.ru, free. Title from the screen.

8. Yakovlev S.N. On some physical properties of structural polyurethanes // Izvestiya SPBTI. 2013. No. 20. P. 78–80.

9. Yakovlev S.N. Calculation of polyurethane parts working in compression under static load // Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. No. 1(190). 2014, pp. 137–142.

10. Klenin N.I., Kiselev S.N., Levshin A.G. Agreecultural machines. Agreecultural equipment. M.: Kolos, 2008. 816 p.

11. Belyaev A.N. Substantiation of the methodology for experimental studies of the curvilinear movement of a wheeled vehicle // Trends in the development of technical means and technologies in the agro-industrial complex: materials of the international scientific and practical conference (Russia, Voronezh, February 25, 2022). Part II. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 168–175.

12. Belyaev A.N., Afonichev D.N., Trishina T.V. Estimation of the parameters of the clothoid trajectory of the entry into the turn of a wheeled vehicle // Science in Central Russia. 2022. No. 2 (56). pp. 30–37.

13. 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. P. 4527–4531.

14. Belyaev A.N., Shatsky V.P., Kozlov V.G., Trishina T.V., Vysotskaya I.A. Determination of Theoretical Path of Vehicle Motion upon Cornering // Journal of Applied Science and Engineering. Taiwan. 2022 Vol. 25. No. 5. P. 741–747.

15. Skotnikov V.A., Mashchenskii A.A., Solonskii A.S. Fundamentals of the theory and calculation of the tractor and the car. M.: Agropromizdat, 1986. 383 p.

16. Smirnov G.A. Theory of motion of wheeled vehicles. M.: Mashinostroenie, 1990. 352 p.

17. Bolotin S.V. etc. Theoretical mechanics. M.: Publishing Center "Academy", 2010. 432 p.

18. Guskov V.V. Tractors: theory; ed. V.V. Guskov. M.: Mashinostroenie, 1988. 374 p.

19. Dyakonov V.P. Maple 10/11/12/13/14 in mathematical calculations. M.: DMK-Press, 2011. 800 p.

20. Dyakonov V.P. Encyclopedia of Computer Algebra. M.: DMK-Press, 2009. 1264 p.

21. Belarus-1221.2/1221B.2/1221.3: operation manual. Republican Unitary Enterprise "Minsk Tractor Plant", 2009. 292 p.

22. Vygodsky M.Ya. Handbook of higher mathematics. M.: Nauka, 1961. 871 p.

23. Belyaev A.N. Adaptation of the navigation system on the Belarus-1221.2 tractor // Trends in the development of technical means and technologies in the agro-industrial complex: materials of the international scientific and practical conference (Russia, Voronezh, February 25, 2022). Part I. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 230–236.

24. Vedenyapin G.V. General methodology of experimental research and processing of experimental data. M.: Kolos, 1973. 194 p.

25. Armor B.A. Methods of field experience. M.: Selkhozizdat, 1985. 352 p.

26. GOST 7057-2001. Agricultural tractors. Test methods. Introduction 2003-01-0. M.: Publishing house of standards, 2001. 7 p.

27. Troyanovskaya I.P. Mechanics of curvilinear motion of tractor units. Chelyabinsk: Publishing House of the Chelyabinsk State Agrarian University, 2009. 152 p.

Информация об авторах

А.Н. Беляев – доктор технических наук, доцент; Д.Н. Афоничев – доктор технических наук, профессор; Т.В. Тришина – кандидат технических наук, доцент, А.Е. Новиков – ассистент; П.В. Шередекин – специалист по применению средств защиты семян; И.А. Высоцкая – кандидат физико-математических наук.

Information about the authors

A. Belyaev - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; D. Afonichev - Doctor of Technical Sciences, Professor; T. Trishina - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, A. Novikov - assistant; P. Sheredekin - specialist in the use of seed protection products; I. Vysotskaya - Candidate of Physical and Mathematical Sciences.

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): 18.03.2023 Принята к публикации (Accepted): 21.04.2023