

## ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА ПРИ ВХОДЕ В ПОВОРОТ

**Александр Николаевич Беляев<sup>1</sup>**  
**Владимир Иванович Оробинский<sup>1</sup>**  
**Владимир Павлович Шацкий<sup>1</sup>**  
**Татьяна Владимировна Тришина<sup>1</sup>**  
**Ирина Алевтиновна Высоцкая<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

<sup>2</sup>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

Машинно-тракторные агрегаты (МТА) на базе колёсных тракторов при выполнении агротехнологических операций на деформируемом опорном основании практически постоянно движутся по криволинейной траектории, которая изменяется или в результате внешних возмущений, или из-за колебаний параметров трактора и агрегируемой с ним сельскохозяйственной машины, что является признаком нарушения устойчивости. Наиболее динамически нагруженным режимом работы и сложным элементом кинематики МТА является участок «вход в поворот» его криволинейного движения с целью разворота на деформируемой рыхлой почве, на котором вследствие низкого сцепления шин колёс трактора с поверхностью происходит интенсивное боковое скольжение. В настоящее время наработки по изучению криволинейного движения имеются лишь только для сравнительно больших радиусов поворота и малых скоростей или для отдельного колёсного трактора, или тракторного поезда на его базе на транспортных работах. Исходя из вышесказанного следует, что с целью поиска путей повышения устойчивости движения МТА необходим анализ различных режимов его движения на участке входа в поворот на деформируемом опорном основании. В связи с этим в настоящей работе представлены таблично заданные зависимости координат траектории движения кинематического центра комбинированного навесного агрегата и отдельного трактора, определённые экспериментально в реальных условиях эксплуатации при совершении поворота на поворотной полосе на этапе «вход в поворот» на различных скоростях в виде массивов экспериментальных точек; для них получены аппроксимирующие функции явного вида. С помощью параметрических уравнений для тех же условий определены текущие координаты теоретических кривых траекторий кинематического центра трактора и проведены их сравнения с опытными, в результате чего выявлено что как увеличение скорости движения, так и массово-геометрических характеристик приводит к существенному отклонению МТА от рациональной траектории.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** машинно-тракторный агрегат, вход в поворот, траектория, боковое скольжение, устойчивость движения, нелинейная аппроксимация.

## TRAJECTORY OF THE MACHINE-TRACTOR UNIT AT THE BEGINNING OF TURNING

**Alexander N. Belyaev<sup>1</sup>**  
**Vladimir I. Orobinsky<sup>1</sup>**  
**Vladimir P. Shatsky<sup>1</sup>**  
**Tatyana V. Trishina<sup>1</sup>**  
**Irina A. Vysotskaya<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

<sup>2</sup>Military 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

Machine-tractor units (MTU) based on wheeled tractors when performing agricultural operations on a deformable supporting base almost constantly move along a curvilinear trajectory which changes either as a result of external disturbances, or due to fluctuations in the parameters of the tractor and the agricultural machine aggregated with it, which can be a sign of stability violation. The most dynamically loaded mode of operation and a complex element of the MTU kinematics is the beginning of turning section of its curvilinear motion for the purpose of turning on deformable loosening soil, where due to the low adhesion of the tractor wheel tires to the surface, intensive side sliding occurs. At

present, theoretical and practical developments in the study of curvilinear motion are available only for relatively large turning radius and low speeds, as well as for a separate wheeled tractor or a tractor-trailer train designed for transport work. Taking the above mentioned into consideration, it follows that in order to find ways to improve the stability of the MTU movement, it is necessary to analyze various modes of its motion at the beginning of turning section of its curvilinear trajectory on a deformable supporting base. In this regard, this paper presents tabular dependencies of the coordinates of the trajectory of the motion of the kinematic center of a combined mounted unit and a separate tractor determined experimentally in real operating conditions when making a turn on the headland at the stage of the beginning of turning section at different speeds. Tabular dependencies are presented in the form of experimental pixel arrays with explicit approximating functions. Using parametric equations for equal conditions, the current coordinates of the theoretical curves of the trajectories of the kinematic center of the tractor are determined and compared with the experimental ones, as a result of which it is revealed that both an increase in the speed of movement and mass-geometric characteristics lead to a significant deviation of the MTU from the rational trajectory.

KEYWORDS: machine-tractor unit (MTU), beginning of turning, trajectory, sideslipping, stability of motion, nonlinear approximation.

**Д**ля того чтобы машинно-тракторные агрегаты (МТА) были эффективны, высокопроизводительны и конкурентоспособны, они должны соответствовать множеству эксплуатационных требований, из которых одним из наиболее важных является устойчивость движения – свойство трактора, позволяющее ему сохранять в требуемых пределах как положение продольной и вертикальной осей, так и направление движения при отсутствии управляющих воздействий тракториста независимо от скорости движения и действия внешних и инерционных сил различной природы [2].

Колёсные тракторы в составе МТА при выполнении сельскохозяйственных операций практически постоянно движутся по криволинейной траектории, которая непрерывно меняется или в результате действий водителя, или при возникновении каких-либо внешних возмущений, или из-за изменения в процессе движения некоторых характеристик и параметров трактора и агрегируемой с ним сельскохозяйственной машины, что является признаком нарушения его устойчивости. Вращение трактористом рулевого колеса на некоторый угол ещё не означает, что при этом будет обеспечено движение МТА по требуемой траектории. Его действия при этом являются лишь предпосылками к тому, чтобы трактор двигался по траектории, наиболее близкой к заданной [7].

Незначительное отклонение МТА от требуемой рациональной траектории, а его продольной оси – от заданного направления движения за счёт, например, упругости шин вполне допустимо. Но если весь МТА или его отдельные элементы, или оси трактора скользят, то в этом предельном случае имеет место потеря устойчивости в боковом направлении, в том числе занос, как правило, заднего моста трактора.

Наиболее нагруженным режимом работы и сложным элементом кинематики МТА при выполнении сельскохозяйственных операций является его криволинейное движение с целью разворота на поворотной полосе на деформируемой почве, которое к тому же зачастую имеет и различного рода геометрические препятствия, обусловленные в основном особенностями профиля поля.

При этом процесс полного цикла, например беспетлевого кругового поворота, который лежит в основе большинства известных способов поворота, как правило, состоит из трёх участков или же их комбинаций:

1-й участок – «вход в поворот»: радиус кривизны меняется от  $R = \infty$  до  $R = R_T$ ;

2-й участок – «установившийся поворот»: радиус  $R = R_m$  – постоянный;

3-й участок – «выход из поворота»: радиус кривизны меняется от  $R = R_T$  до  $R = \infty$ .

На рыхлой же почве переход колёсного МТА от движения по прямолинейной траектории к движению по окружности постоянного минимально допустимого радиуса  $R_T$  невозможен, ввиду того что на участке «вход в поворот» вследствие малого сцепления шин колёс трактора с деформируемым опорным основанием происходит их интенсивное боковое скольжение. Также при этом из-за возникновения бульдозерного эффекта возрастает сопротивление почвы с внешней стороны колеса и от её смятия, что

является причиной значительного увеличения ширины и глубины колеи, сопротивления движению, динамической нагрузки почвы, трактора и МТА в целом.

Исходя из вышесказанного следует, что для поиска возможных путей уменьшения различных потерь и увеличения при этом запаса силы тяги необходимо проведение анализа режимов криволинейного движения колёсного трактора по рыхлому и деформируемому основанию.

На сегодняшний день как зарубежные, так и отечественные учёные достаточно полно и содержательно изучили и исследовали процесс прямолинейного движения колёсных машин, в том числе и тракторов, по податливой опорной поверхности, но практически не затрагивали вопрос движения по криволинейной траектории. Имеющиеся экспериментальные и теоретические выкладки, как правило, содержат множество допущений и ограничений, из-за чего не могут отражать полной реальной картины взаимодействия эластичной шины колёсного движителя с деформируемым грунтовым основанием и, как следствие, применяться в том числе для оценки и анализа режимов движения машины [1].

В настоящее время как теоретические, так и экспериментальные наработки по изучению криволинейного движения имеются лишь только для сравнительно больших радиусов поворота и малых скоростей или для отдельного колёсного трактора, или тракторного поезда на его базе на транспортных работах. И для них же и разработаны, с определённой долей точности, методы теоретических и экспериментальных исследований [3, 4]. Причём на деформируемой почве отдельный трактор подвергался исследованиям при круговом движении, что не вполне соответствует реальным полевым условиям эксплуатации МТА. Следовательно, вышеупомянутые теоретические и экспериментальные разработки и предпосылки не в полной мере отражают реальную картину криволинейного движения навесного МТА на базе колёсного трактора и не могут быть использованы для оценки его кинематических и динамических параметров, так как носят частный характер, отдельные их положения противоречивы и не подтверждаются на практике.

Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на устойчивость движения колёсных тракторов и различной компоновки навесных агрегатов на его базе, включая комбинированных (с орудиями на фронтальной и задней навесных системах), при повороте с малыми радиусами в условиях реальной эксплуатации, в том числе при неустановившемся режиме поворота – на самом динамически нагруженном участке – «вход в поворот», не исследовалось [1].

Несмотря на то что вопросам качения упругого колеса по деформируемой почве посвящено большое количество исследований, комплексно процессы их взаимодействия не описаны. В состав практически всех моделей входят, как правило, в большом количестве, эмпирические коэффициенты, определение которых крайне затруднено, и громоздкие расчётные зависимости, неудобные для анализа процесса криволинейного движения колёсного трактора, что ограничивает их широкое применение [10]. При этом зачастую в этих моделях множество определяющих факторов или некорректно учитываются, или не учитываются вообще. Попытки учесть их при теоретических исследованиях приводят к искажению законов механики [11, 13], вследствие чего более-менее приемлемая для практических расчётов точность получается лишь при малых углах поворота управляемых колёс и низких скоростях движения. Следовательно, возникает необходимость поиска новых методов, которые могли бы достаточно точно описать различные режимы неустановившегося движения трактора по деформируемой поверхности.

Так как при функциональном проектировании технических систем, наряду с теоретическими, широко применяются экспериментальные факторные математические модели [8], то для решения поставленной задачи нами проведены полевые испытания трактора ЛТЗ-155 и навесного комбинированного широкозахватного МТА на его базе,

составленного по схеме КРШ-8,1 + НП-5,4 + ЛТЗ-155 + КРШ-8,1, в реальных условиях функционирования на поворотной полосе при выполнении кругового беспетлевого поворота с варьированием скорости движения. При этом исходя из выбранных условий экспериментальных исследований и фазовые координаты, и выходные параметры представляют собой случайные процессы, так как их варьирование носит характер, обусловленный случайными внешними возмущающими воздействиями [3, 4].

Для регистрации информации о физических параметрах трактора или МТА, необходимых при разработке математической модели, выбран некоторый интервал дискретизации времени  $t$ , являющийся независимой переменной, и в соответствии с этими промежутками  $t$  зафиксированы величины фазовых координат и выходных параметров. Эти значения представляют собой случайные последовательности некоррелированных чисел, входящие в непрерывные множества. Также важным условием проведения эксперимента является стационарность, кроме математического ожидания, которое можно отфильтровать и применять центрированные значения, и эргодичность исследуемых случайных процессов.

Для получения теоретической экспериментальной факторной математической модели необходимо также выявить её структуру и определить численные значения её параметров. Исходя из этого получены опытные данные кривой траектории поворота МТА, включающие путь, проходимый его кинематическим центром – серединой заднего моста трактора, и курсовой угол поворота остова трактора. В результате обработки экспериментальных измерений с применением одного из программных пакетов комплекса системы компьютерной алгебры Maple [6] получена таблично заданная функция зависимости координат траектории движения кинематического центра трактора  $(x_i, y_i)$ , где количество точек измерения  $i = 1, \dots, N$ .

Например, для комбинированного МТА с задней и фронтальной навесками машин, оборудованного по схеме КРШ-8,1 + НП-5,4 + ЛТЗ-155 + КРШ-8,1, при поступательной скорости движения  $v = 0,68$  м/с, максимальном угле поворота внутреннего по отношению к центру поворота переднего управляемого колеса  $\alpha_{ВНmax} = 32^\circ$ , угловой скорости поворота передних управляемых колёс  $\omega_1 = 0,28$  1/с, угловой скорости поворота задних колёс  $\omega_2 = 0$  1/с, ширине колеи  $B = 1,8$  м и продольной базе трактора  $L = 2,6$  м был получен массив экспериментальных координат траекторий движения  $(x_i, y_i)$  кинематического центра МТА на входном участке поворотной полосы, который приведён в таблице 1.

**Таблица 1. Координаты траектории движения МТА при  $v = 0,68$  м/с**

$x_i, \text{ м}$	0	0	0	0	0,00685	0,0186	0,0314
$y_i, \text{ м}$	0	0,231	0,462	0,673	0,846	1,06	1,21

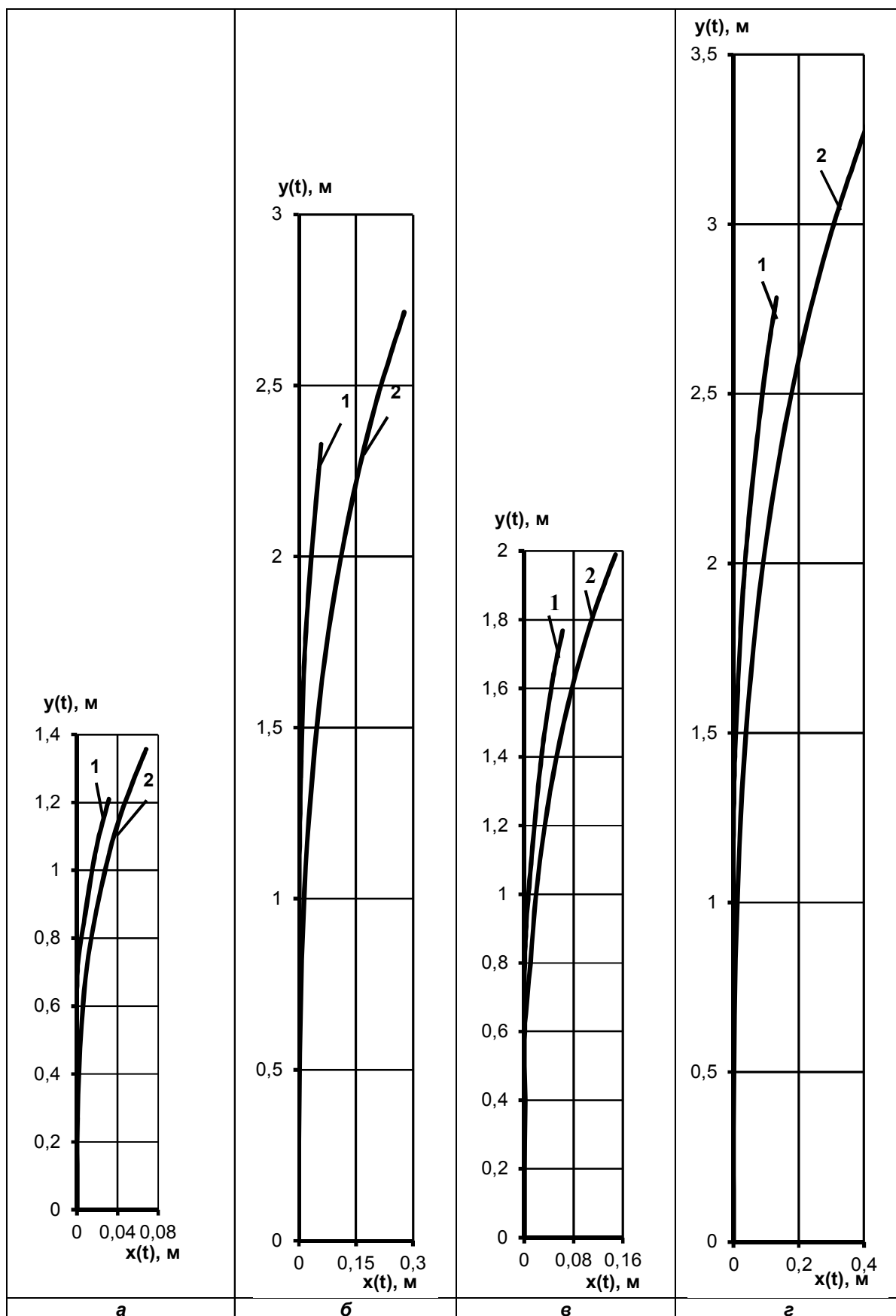
Так как на начальном участке траектории поворота при  $x = 0$  касательная к кривой вертикальна, то из анализа числовых значений координат, представленных в таблице 1, вытекает, что при малых значениях абсциссы  $x$  нелинейная аппроксимация данных её массива позволяет получить функцию явного вида, описываемую формулой [5]

$$y(x) = px^q, \tag{1}$$

где  $p$  и  $q$  – вполне определённые постоянные,  $0 < q < 1$ .

В соответствии с формулой (1) для указанного массива экспериментальных точек была получена следующая аппроксимирующая функция, график которой представлен на рисунке (вариант а, кривая 1):

$$y(x) = 3,47 x^{0,28}.$$



Траектории кинематического центра МТА при входе в поворот:  
 а –  $v = 0,68$  м/с; б –  $v = 1,0$  м/с; в –  $v = 1,37$  м/с; г –  $v = 1,67$  м/с

Для вышеуказанного МТА при  $v = 1,37$  м/с и тех же конструктивных и эксплуатационных характеристиках получены массив опытных координат траекторий движения  $(x_i, y_i)$  на входном участке поворотной полосы (табл. 2) и его аппроксимирующая функция, график которой представлен на рисунке (вариант б, кривая 1):

$$y(x) = 4,87 x^{0,26}.$$

**Таблица 2. Координаты траектории движения МТА при  $v = 1,37$  м/с**

$x_i, \text{ м}$	0	0	0	0,00393	0,0144	0,0327	0,0586
$y_i, \text{ м}$	0	0,4	0,85	1,299	1,699	1,999	2,328

Опытные значения координат траекторий движения  $(x_i, y_i)$  на участке «вход в поворот» для кинематического центра отдельного трактора ЛТЗ-155 при тех же исходных параметрах  $\omega_1 = 0,28$  1/с,  $\omega_2 = 0$  1/с,  $B = 1,8$  м,  $L = 2,6$  м при  $v = 1,0$  м/с и  $v = 1,67$  м/с приведены соответственно в таблицах 3 и 4. Для них получены следующие аппроксимирующие функции:

$$y(x) = 3,98 x^{0,3},$$

$$y(x) = 4,75 x^{0,27},$$

а также построены их графики (вариант в, кривая 1 и вариант г, кривая 1, см. рис.).

**Таблица 3. Координаты траектории движения трактора при  $v = 1,0$  м/с**

$x_i, \text{ м}$	0	0	0	0,00654	0,0264	0,0453	0,0622
$y_i, \text{ м}$	0	0,325	0,751	0,999	1,379	1,619	1,768

**Таблица 4. Координаты траектории движения трактора при  $v = 1,67$  м/с**

$x_i, \text{ м}$	0	0	0	0,0185	0,0451	0,0948	0,132
$y_i, \text{ м}$	0	0,6	1,2	1,729	2,1088	2,546	2,783

Таким образом, используя полученные выборки значений факторов и выходных параметров, можно дать оценку вероятностных характеристик исследуемого случайного процесса, а также разработать вероятностную математическую модель изучаемого объекта.

В работе [12] нами получены в параметрическом виде уравнения для определения текущих координат  $x(t)$  и  $y(t)$  теоретической кривой траектории кинематического центра при равномерном движении колёсного транспортного средства при входе в поворот, соответствующие точке середины заднего моста, также принятой за кинематический центр, как и в рассматриваемом случае:

$$x(t) = v \int_0^t \sin \left[ v \int_0^{t_1} \frac{\sin(\omega_1 \tau + \omega_2 \tau)}{\left[ \frac{B}{2} (tg \omega_1 \tau + tg \omega_2 \tau) + L \right] \cdot \cos \omega_1 \tau \cos \omega_2 \tau} d\tau \right] dt_1; \quad (2)$$

$$y(t) = v \int_0^t \cos \left[ v \int_0^{t_1} \frac{\sin(\omega_1 \tau + \omega_2 \tau)}{\left[ \frac{B}{2} (tg \omega_1 \tau + tg \omega_2 \tau) + L \right] \cdot \cos \omega_1 \tau \cos \omega_2 \tau} d\tau \right] dt_1. \quad (3)$$

Результаты расчётов по формулам (2) и (3) для ранее указанных исходных данных и варьируемых скоростей  $v = 0,68$  м/с,  $v = 1,0$  м/с,  $v = 1,37$  м/с и  $v = 1,67$  м/с представлены графически на рисунке – варианты а, б, в и г, кривые 2. Следует отметить, что так как уравнения (2) и (3) получены для равномерного движения, то теоретическая траектория не зависит от массы агрегата и от силы, затрачиваемой на его передвижение [9].

Как видно из анализа графиков, для всех рассматриваемых случаев значения экспериментальных точек находятся ниже теоретических кривых, максимальные величины абсцисс которых, соответствующие концу рассматриваемого этапа манёвра, в 2,17–4,73 раза, а ординат – на 0,15–0,5 м больше опытных, что является признаком бокового скольжения, вследствие этого, очевидно, значительного отклонения МТА от требуемой траектории входа в поворот.

Нахождение МТА на действительной траектории (см. рис. – варианты а, б, в, г, кривые 1) из-за меньшей её кривизны в сравнении с теоретической (см. рис. – варианты а, б, в, г, кривые 2), не позволяет ему плавно перейти на движение по участку установленного поворота с минимально возможным радиусом и вызывает дополнительное отклонение от рациональной траектории.

Увеличение как скорости движения, так и массово-геометрических характеристик приводит к ужесточению динамических процессов, происходящих при взаимодействии ведущих колёс трактора с деформируемой почвой, и существенно изменяет изучаемые кинематические параметры МТА.

Полученная аналитическая действительная траектория входа в поворот позволяет оценить кинематические характеристики МТА в зависимости от основных конструктивных и эксплуатационных параметров (скорость движения, продольная база, ширина колеи, углы поворотов колёс, масса), а также исследовать движение по заданной траектории [9]. При этом для её построения необходимо иметь лишь экспериментальные координаты траектории движения кинематического центра трактора, что выполнимо при проведении достаточно простых и доступных экспериментальных исследований, в ходе выполнения которых отпадает необходимость поиска большого количества эмпирических зависимостей и коэффициентов, определение которых крайне затруднено.

---

### Библиографический список

1. 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.
2. ГОСТ Р 31507-2012. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. – Введ. 2013–09–01. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 54 с.
3. ГОСТ 25836-83 Тракторы. Виды и программы испытаний. – Введ. 1985–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 2003. – 29 с.

4. ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. – Введ. 2003–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 2001. – 7 с.
5. Дьяконов В.П. Энциклопедия компьютерной алгебры / В.П. Дьяконов. – Москва : ДМК-Пресс, 2009. – 1264 с.
6. Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах / В.П. Дьяконов. – Москва : ДМК-Пресс, 2011. – 800 с.
7. Смирнов Г.А. Теория движения колёсных машин / Г.А. Смирнов. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Машиностроение, 1990. – 352 с.
8. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем / В.П. Тарасик. – Минск : Дизайн ПРО, 1997. – 640 с.
9. Теоретическая механика : учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования / С.В. Болотин, А.В. Карапетян, Е.И. Кугушев, Д.В. Трещев. – Москва : Издательский центр «Академия», 2010. – 432 с.
10. 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.
11. Трояновская И.П. Механика криволинейного движения тракторных агрегатов : монография / И.П. Трояновская. – Челябинск : ЧГАУ, 2009. – 152 с.
12. 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.
13. Troyanovskaya I.P. Model for stationary turn of an arbitrary vehicle / I.P. Troyanovskaya, S.A. Voinash // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 450 (3). – 032035. DOI: 10.1088/1757-899X/450/3/032035.

### 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.

Владимир Иванович Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, зав. кафедрой сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей, декан агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: agroeng.vsau.ru.

Владимир Павлович Шацкий – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой математики и физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: agroeng.vsau.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.

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.

Дата поступления в редакцию 18.09.2020

Дата принятия к печати 24.11.2020

### 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.

Vladimir I. Orobinsky, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Dean of the Faculty of Rural Engineering, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: agroeng.vsau.ru.

Vladimir P. Shatsky, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Mathematics and Physics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia, e-mail: agroeng.vsau.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.

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.

Received September 18, 2020

Accepted after revision November 24, 2020