

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА ПОВОРОТА ТРАКТОРА

Александр Николаевич Беляев¹
Владимир Павлович Шацкий¹
Татьяна Владимировна Тришина¹
Виктор Валентинович Шередекин¹
Ирина Алевтиновна Высоцкая²

¹Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Министерства обороны Российской Федерации

Устойчивость движения и управляемость колесного универсально-пропашного трактора при криволинейном движении на поворотной полосе во многом определяют его производительность и качество выполняемых им сельскохозяйственных операций. Традиционные кинематические способы поворота не в полной мере отвечают предъявляемым к ним требованиям из-за значительного отклонения трактора на поворотной полосе, особенно на участке входа в поворот, от требуемой траектории движения. В связи с этим целью настоящей работы является поиск путей повышения устойчивости и управляемости МТА на базе колесного универсально-пропашного трактора со всеми управляемыми колесами за счёт рационального выбора способа криволинейного движения. В ходе проведения исследований разработана методика определения теоретической траектории движения центра масс трактора при повороте комбинированным способом. Предложено два варианта комбинированного способа поворота трактора. Вариант 1: на участке «вход в поворот» передние и задние управляемые колёса синхронно поворачиваются в одну и ту же сторону относительно остова, при достижении ими максимального угла задние колёса автоматически возвращаются в нейтральное положение, и дальнейший поворот осуществляется передними колёсами. Вариант 2: на участке «вход в поворот» передние и задние управляемые колёса синхронно поворачиваются в одну и ту же сторону относительно остова, при достижении ими максимального угла задние колёса автоматически возвращаются в положение, асинхронное передним, и дальнейший поворот осуществляется передними и задними колёсами. Определены теоретические траектории движения центра масс колесного трактора в виде непрерывной нелинейной функции явного вида при различных вариантах режимов управления поворотом колёс для всех характерных участков кругового беспетлевого поворота. Проведено сравнение характеристик траекторий комбинированных и традиционных способов поворота универсально-пропашного трактора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трактор, комбинированный способ поворота, траектория, управляемость, устойчивость.

ASSESSMENT OF FEASIBILITY OF THE COMBINED METHOD OF THE TRACTOR STEERING MOTION

Alexander N. Belyaev¹
Vladimir P. Shatsky¹
Tatyana V. Trishina¹
Victor V. Sheredekin¹
Irina A. Vysotskaya²

¹Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

²Military 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

The stability of motion and handling of a wheeled universal tractor cultivator during curvilinear motion on the headland largely determine its capacity and the quality of the performed agricultural operations. Traditional kinematic methods of the steering motion do not fully meet the requirements due to the significant deviation of the tractor on the headland from

the required trajectory, especially at the entrance into the turn. In this regard, the purpose of the paper is to find ways and means for improving the stability and handling of the machine-tractor aggregates (MTA) on the basis of all-wheel drive universal tractor cultivator due to the rational choice of the method of curvilinear motion. During the research, a method was developed for determining the theoretical trajectory of the tractor's center of mass of the combined method of steering motion. Two options of the combined method of the tractor steering motion are proposed. Option 1: in the section "the entrance into the turn", the front and rear drive wheels turn synchronously in the same direction above the frame, when they reach the maximum angle, the rear wheels automatically return to the neutral position, and further steering motion is performed by the front wheels. Option 2: in the section "the entrance into the turn", the front and rear drive wheels turn synchronously in the same direction above the frame, when they reach the maximum angle, the rear wheels automatically return to the position asynchronous to the front wheels, and steering motion is performed by the front and rear wheels. The theoretical trajectories of the center of mass of a wheeled tractor are defined as a continuous nonlinear function in an explicit form for various options of control modes of steering motion for all characteristic sections of a circular non-loop steering turn. A comparison of the characteristics of the trajectories of the combined and traditional methods of the machine-tractor aggregates steering motion is made.

KEYWORDS: tractor, combined method of steering motion, trajectory, stability of motion and handling.

В настоящее время одним из самых перспективных направлений развития сельскохозяйственного машиностроения является выпуск универсально-пропашных тракторов и мобильных сельскохозяйственных машин со всеми управляемыми колёсами, в конструкциях систем рулевого управления которых заложена возможность реализации поворота различными кинематическими способами изменения положения управляемых колёс относительно остова машины:

- поворотом передними колёсами;
- асинхронным поворотом передними и задними колёсами;
- синхронным поворотом передними и задними колёсами («крабовый» ход) [12].

«Крабовый ход» – это движение трактора боком, для осуществления которого необходимо поворачивать обе пары колёс в одну сторону. Такой метод перемещения кажется простым, но его качественная и чёткая реализация крайне сложна и доступна только для тракторов, созданных ведущими производителями. Чтобы трактор мог передвигаться «крабом», в нём нужно применить сложнейшую кинематическую схему. Она предполагает использование микропроцессора и специальных датчиков, которые проверяют положение колёс. Также необходимо, чтобы трактор имел шины одинакового размера.

При этом «крабовый ход» имеет следующие неоспоримые преимущества:

- уменьшается, при необходимости, радиус поворота;
- предотвращается сползание трактора, работающего на склонах, смещением всех колёс на некоторый угол в сторону, противоположную направлению сползания;
- улучшается поперечная устойчивость трактора, в том числе на косогорах;
- повышается манёвренность и управляемость и, как следствие, эффективность и производительность трактора, даже в условиях ограниченного пространства.

Выбор того или иного варианта управления колёсами и, следовательно, способа поворота универсально-пропашного трактора осуществляется в соответствии с конкретной агротехнологической ситуацией, исходя из условий сохранения управляемости и устойчивости движения и обеспечения возможности возврата машинно-тракторного агрегата (МТА) к входу в междурядья культур со смещением на величину ширины захвата сельскохозяйственных машин и орудий, входящих в состав МТА [1].

Криволинейное движение колёсного универсально-пропашного трактора поворотом передних колёс и поворотом передних и задних колёс в разные стороны в условиях реальной эксплуатации на поворотной полосе на рыхлой почве сопровождается сильной деформацией шин, их износом, большими потерями мощности, чрезмерным уплотнением почвы, значительным отклонением от требуемой траектории, ухудшением, а иногда и потерей управляемости. Также при высоких скоростях движения колёсного универсально-пропашного трактора может возникнуть занос задней оси трактора [10], а при повороте передними и задними колёсами в одну сторону («крабом») возврат в междурядья невозможен [1, 6].

Так как экспериментальные исследования по оценке влияния конструктивных и эксплуатационных параметров колёсных машин на изменение кинематических характеристик при криволинейном движении представляют собой трудоёмкий и достаточно дорогостоящий процесс, требуют проведения большого объёма опытов и определения многих параметров, в том числе в условиях реальной эксплуатации, то, очевидно, наиболее приемлемым является аналитическое описание процесса движения на повороте методами математического моделирования [8, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

В связи с этим целью настоящей работы стал поиск путей повышения устойчивости и улучшения управляемости машинно-тракторного агрегата на базе колёсного универсально-пропашного трактора со всеми управляемыми колёсами за счёт рационального выбора способа криволинейного движения, при этом в круг задач проведённого исследования входила разработка методики определения теоретической траектории центра масс трактора при повороте комбинированным способом.

Объектом исследования являлся процесс криволинейного движения машинно-тракторного агрегата на базе универсально-пропашного трактора со всеми управляемыми колёсами [5], а предметом исследования – закономерности изменения траектории центра масс трактора при повороте комбинированным способом.

Рассмотрены два варианта комбинированного способа поворота универсально-пропашного трактора. Вариант 1: на участке «вход в поворот» передние и задние управляемые колёса синхронно поворачиваются в одну и ту же сторону относительно остова, при достижении ими максимального угла задние колёса автоматически возвращаются в нейтральное положение, и дальнейший поворот осуществляется передними колёсами (рис 1, а). Вариант 2: на участке «вход в поворот» передние и задние управляемые колёса синхронно поворачиваются в одну и ту же сторону относительно остова, при достижении ими максимального угла задние колёса автоматически возвращаются в положение, асинхронное передним, и дальнейший поворот осуществляется передними и задними колёсами (рис 1, б) [1, 7].

В работе [6] получен закон движения центра масс трактора крабовым ходом при постоянных значениях поступательной скорости v и угловых скоростей поворота колёс переднего и заднего мостов $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ относительно остова в поперечной плоскости. Анализ траектории движения показал, что при этом трактор совершает поступательное движение, которое можно исследовать как движение точки по окружности радиусом $R_1 = \frac{v}{\omega}$.

$$R_1 = \frac{v}{\omega}.$$

Принимая при комбинированном способе время входа в поворот t_1 , согласно [6], получаем координаты точки его окончания (участок I на рисунке 1, а, б)

$$x_{\max 1} = \frac{v}{\omega} (1 - \cos \omega t_1);$$

$$y_{\max 1} = \frac{v}{\omega} \sin \omega t_1.$$

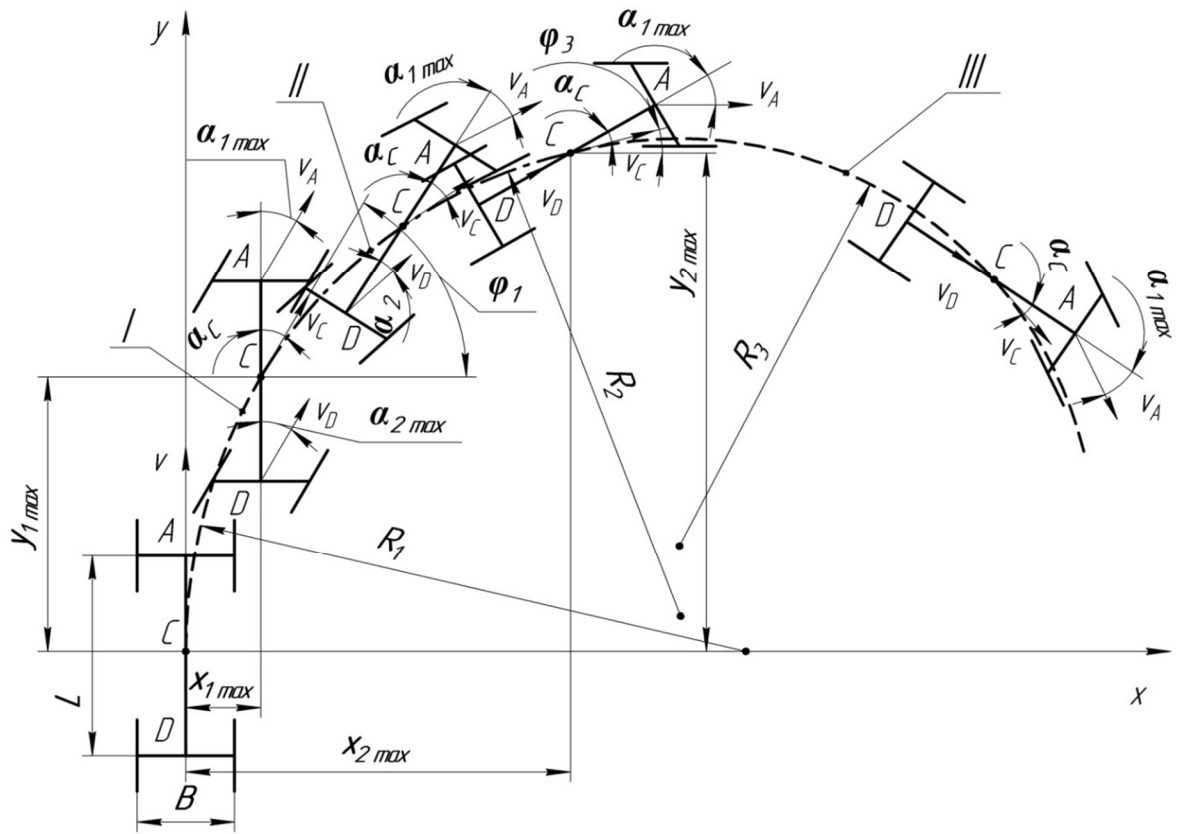
Например, при $v = 1$ м/с, $\omega = 0,28$ 1/с и $t_1 = 2$ с получим $x_{\max 1} = 0,55$ м и $y_{\max 1} = 1,9$ м.

В этой точке колёса повёрнуты на максимальные углы $\alpha_{\max 1} = \alpha_{\max 2}$, а угол наклона касательной к траектории определяется по формуле

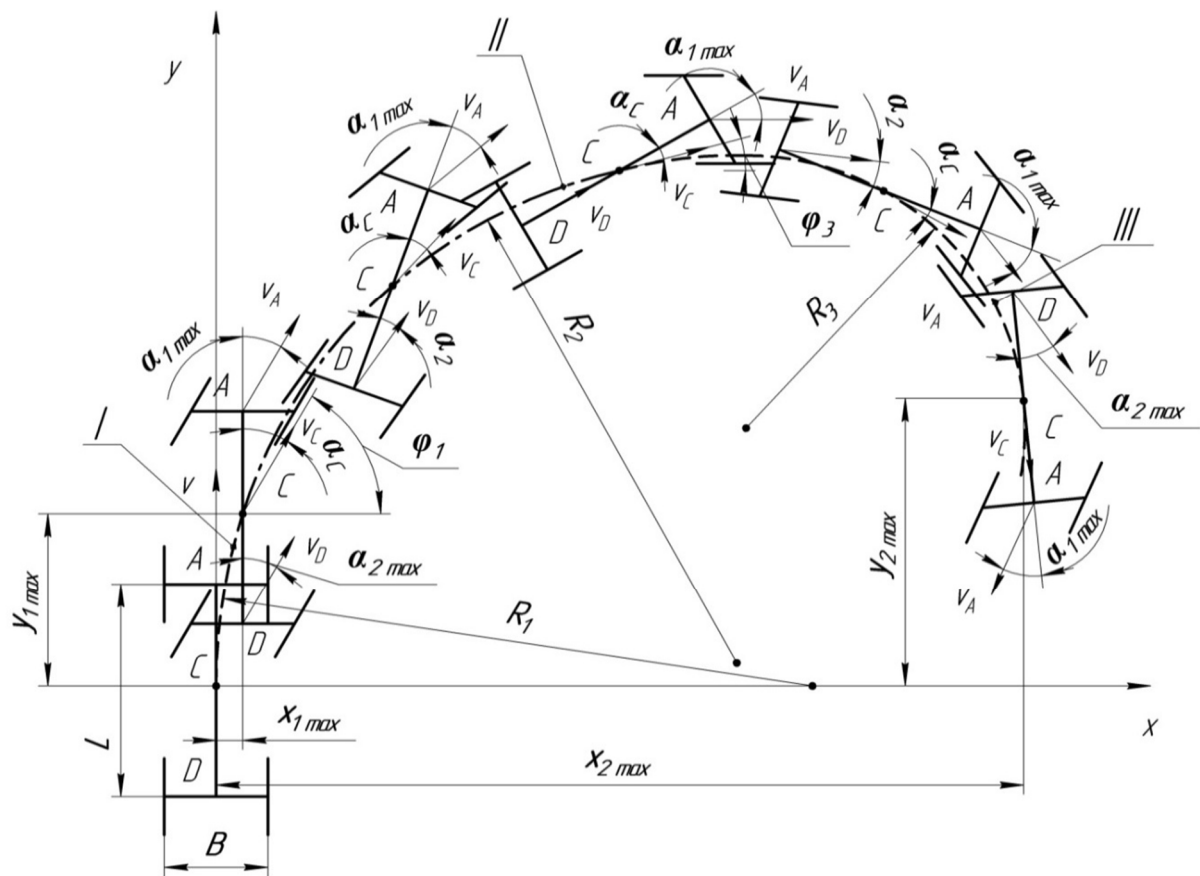
$$\varphi_1 = \arctg [y'(x_{\max 1})],$$

где y' – производная функции $y(x)$ [4].

С этого момента задние колёса универсально-пропашного трактора начинают поворачиваться в обратную сторону и «приходят» за время t_2 в положение, определённое конструкцией системы рулевого управления трактора: или вариант 1, или вариант 2 (рис. 1, а, б).



a



б

Рис. 1. Комбинированный способ поворота

В работах [1, 13] получены уравнения для определения текущих координат траектории центра масс трактора на участке входа в поворот при совершении им кругового беспетлевого поворота:

$$x(t) = v \int_0^t \sin \left[v \int_0^{t_2} \frac{\sin(\omega_1 \tau + \omega_2 \tau)}{\left[\frac{B}{2} (tg \omega_1 \tau + tg \omega_2 \tau) + L \right] \cdot \cos \omega_1 \tau \cos \omega_2 \tau} d\tau \right] dt_2; \quad (1)$$

$$y(t) = v \int_0^t \cos \left[v \int_0^{t_2} \frac{\sin(\omega_1 \tau + \omega_2 \tau)}{\left[\frac{B}{2} (tg \omega_1 \tau + tg \omega_2 \tau) + L \right] \cdot \cos \omega_1 \tau \cos \omega_2 \tau} d\tau \right] dt_2, \quad (2)$$

где L – база трактора, м;

B – расстояние между осями шкворней рулевой трапеции трактора, м.

Используем формулы (1) и (2) для определения траектории движения на участке II (рис. 1, а, б).

Будем считать, что поворот задних колёс в противоположную сторону конечному их положению на первом участке начинается в момент времени $t_2 = 0$. Тогда текущие координаты теоретической траектории центра масс трактора на участке II равны

$$x(t) = v \int_0^t \sin \left[v \int_0^{t_2} \frac{\sin(\alpha_{\max 1} - (\alpha_{\max 2} - \omega_2 \tau))}{\left[\frac{B}{2} (tg \alpha_{\max 1} - tg(\alpha_{\max 2} - \omega_2 \tau)) + L \right] \cdot \cos \alpha_{\max 1} \cdot \cos(\alpha_{\max 2} - \omega_2 \tau)} d\tau \right] dt_2; \quad (3)$$

$$y(t) = v \int_0^t \cos \left[v \int_0^{t_2} \frac{\sin(\alpha_{\max 1} - (\alpha_{\max 2} - \omega_2 \tau))}{\left[\frac{B}{2} (tg \alpha_{\max 1} - tg(\alpha_{\max 2} - \omega_2 \tau)) + L \right] \cdot \cos \alpha_{\max 1} \cdot \cos(\alpha_{\max 2} - \omega_2 \tau)} d\tau \right] dt_2. \quad (4)$$

Так как внутренний интеграл в уравнениях (3) и (4)

$$v_n(\tau) = \frac{\sin(\alpha_{\max 1} - (\alpha_{\max 2} - \omega_2 \tau))}{\left[\frac{B}{2} (tg \alpha_{\max 1} - tg(\alpha_{\max 2} - \omega_2 \tau)) + L \right] \cdot \cos \alpha_{\max 1} \cdot \cos(\alpha_{\max 2} - \omega_2 \tau)}, \quad (5)$$

при переменном верхнем пределе интегрирования t_2 может иметь сингулярность подынтегральной функции [4] (в связи с чем он не берётся в программах компьютерной математики [3]), воспользуемся частным решением (3), (4) и (5).

Рассмотрим вариант 1 управления колёсами (рис. 1, а) на участке II. При следующих начально-исходных конструктивно-эксплуатационных параметрах: $L = 2,6$ м, $B = 1,8$ м, $v = 1$ м/с, $\alpha_{\max 1} = 32^\circ = 0,56$ рад, $\alpha_{\max 2} = 32^\circ = 0,56$ рад, $\omega_1 = 0$ с⁻¹, $\omega_2 = -0,56$ с⁻¹, $t_2 = 1$ с [1, 5] имеем:

$$x(t) = v \int_0^t \sin \left[v \int_0^{t_2} \frac{\sin(0,56\tau)}{\left[\frac{B}{2} (\operatorname{tg}0,56 - \operatorname{tg}(0,56 - 0,56\tau)) + L \right] \cdot \cos 0,56 \cdot \cos(0,56 - 0,56\tau)} d\tau \right] dt_2; \quad (6)$$

$$y(t) = v \int_0^t \cos \left[v \int_0^{t_2} \frac{\sin(0,56\tau)}{\left[\frac{B}{2} (\operatorname{tg}0,56 - \operatorname{tg}(0,56 - 0,56\tau)) + L \right] \cdot \cos 0,56 \cdot \cos(0,56 - 0,56\tau)} d\tau \right] dt_2; \quad (7)$$

$$v_n(\tau) = \frac{\sin(0,56\tau)}{\left[\frac{B}{2} (\operatorname{tg}0,56 - \operatorname{tg}(0,56 - 0,56\tau)) + L \right] \cdot \cos 0,56 \cdot \cos(0,56 - 0,56\tau)}. \quad (8)$$

Полиномная аппроксимация функции (8) при этом имеет следующий вид [2] (рис. 2):

$$v_n(\tau) = 0,3\tau - 0,17\tau^2 + 0,095\tau^3 - 0,024\tau^4. \quad (9)$$

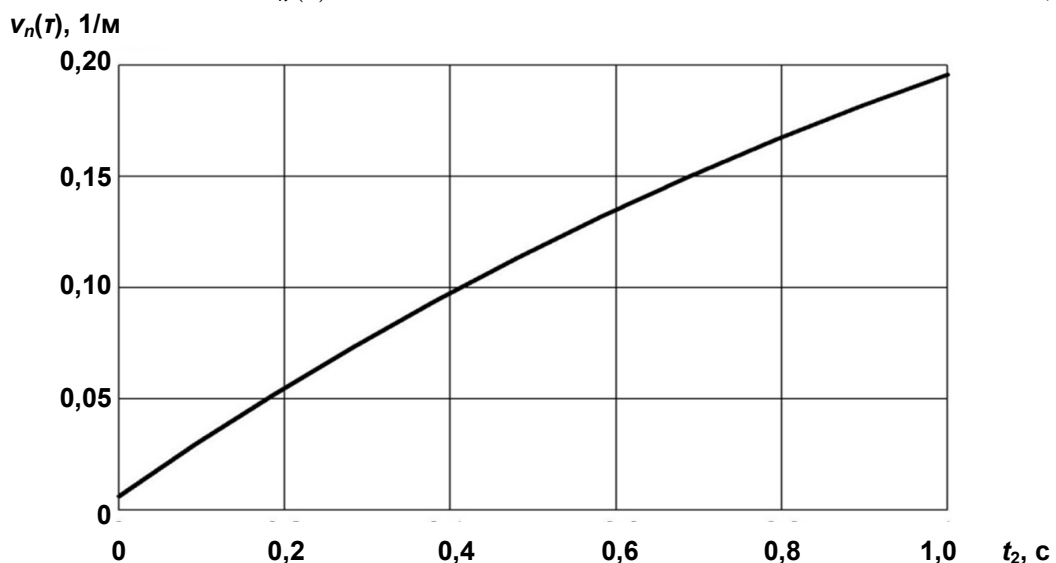


Рис. 2. Графическое представление функции (9)

Для определения траектории движения на втором и третьем участках необходимо проведение преобразования координат, заключающееся в параллельном переносе осей координат соответственно поэтапно или в конец первого участка, или в конец второго участка с поворотом их на определённый угол [4, 9].

Для исследуемого второго участка движения вариантом 1 с интервалом времени $t \in [0, t_2]$, при $t_2 = 1$ с, по формулам (6) и (7) составляем двумерный массив точек (x'_{2i} , y'_{2i}). Для гладкой «склейки» первого и второго участков траектории производим поворот системы координат на угол $\varphi_2 = \pi/2 - \varphi_1$ по формулам:

$$x_{2i} = x'_{2i} \cos \varphi_2 + y'_{2i} \sin \varphi_2;$$

$$y_{2i} = -x'_{2i} \sin \varphi_2 + y'_{2i} \cos \varphi_2.$$

Полученный массив аппроксимируется функцией $q_2(x)$ [2, 3], проходящей через точку с координатами (0, 0), после чего проводится её параллельный перенос в точку с координатами $(x_{\max 1}, y_{\max 1})$

$$q_3(x) = q_2(x - x_{\max 1}) + y_{\max 1}.$$

Для рассматриваемого случая [2, 3]

$$q_3(x) = ((94,84 - (x - 8,868)^2)^{1/2}) - 3,16.$$

Тогда кусочно-гладкая функция первого и второго участков движения имеет вид [2, 3]

$$f_{1,2} = y(x); \quad x \leq x_{\max 1}; \quad q_3(x), \quad x > x_{\max 1}.$$

Координаты точки окончания второго участка $(x_{\max 2}, y_{\max 2})$ определяются по формулам (6) и (7), а угол наклона касательной к траектории в этой точке

$$\varphi_3 = \arctg[f'_{1,2}(x_{\max 2})].$$

Так как движение на участке III происходит при постоянном угле поворота передних колёс, которое характеризуется постоянным радиусом кривизны R_3 (при указанных выше параметрах – это окружность радиуса $R_3 = 5,061$ м [1, 5]), то на данном этапе траектория – уравнение окружности $q_4(x)$ указанного радиуса R_3 , проходящей через точку $(x_{\max 2}, y_{\max 2})$, имеющую в ней касательную под углом φ_3 .

Окончательно имеем непрерывную нелинейную кусочно-гладкую функцию для всех трёх исследуемых участков движения (рис. 3 – кривая 1) [2, 3]. На рисунке 3 (кривая 1) принято, что на участке выхода из поворота траектория зеркально повторяет траекторию входа в поворот передними управляемыми колёсами [13].

$$f_{1,2,3}(x) = \begin{cases} f_{1,2}(x); & x \leq x_{\max 2}; \\ q_4(x); & x > x_{\max 2}. \end{cases} \quad (10)$$

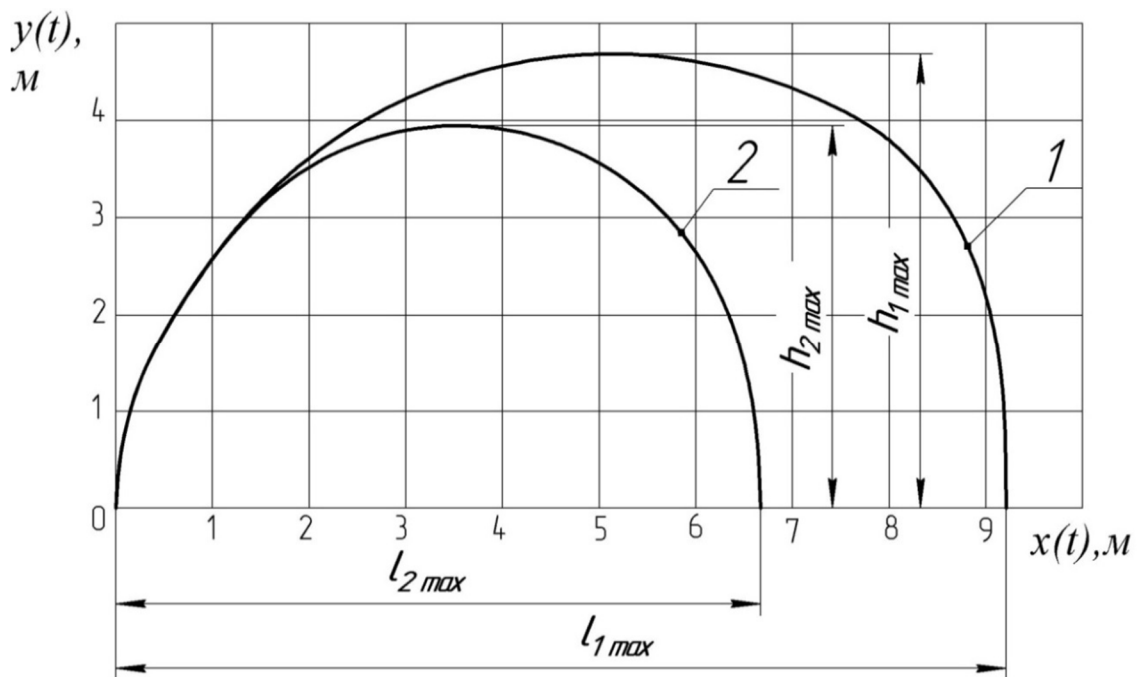


Рис. 3. Траектории движения центра масс трактора при комбинированном способе поворота: 1 – вариант 1 управления колёсами; 2 – вариант 2 управления колёсами

Рассмотрим вариант 2 движения трактора на участке II. При указанных выше параметрах будем считать, что движение на участке II начинается также в момент времени $t_2 = 0$, но заканчивается в момент времени $t_2 = 2$ с. Из формул (6) и (7) следует, что по истечении этого времени задние колёса повернутся в крайнее положение, противоположное данному.

Так же, как и в первом случае при $t \in [0, t_2]$, с использованием формул (6) и (7) составляется двумерный массив точек траектории движения по варианту 2 на участке II (x'_{2i}, y'_{2i}) . Далее, на третьем участке, движение происходит при постоянном угле поворота передних и задних колёс и при принятых параметрах при этом варианте поворота колёс – это окружность радиуса $R_3 = 2,98$ м.

Повторяя предложенный выше алгоритм, получаем кусочно-гладкую функцию всех участков движения [2, 3]

$$f_{1,2,3}(x) = \begin{cases} \sqrt{12,75 - (x - 3,57)^2}; & x \leq 0,545; \\ -0,985 + \sqrt{34,04 - (x - 5,62)^2}; & 0,545 < x \leq 1,365; \\ 0,968 + \sqrt{8,88 - (x - 3,54)^2}; & x > 1,365. \end{cases} \quad (11)$$

Результаты расчётов по формулам (11) представлены на рисунке 3 (кривая 2), где принято, что на участке выхода из поворота траектория зеркально повторяет траекторию входа в поворот передними и задними управляемыми колёсами [13].

При принятых начальных данных для варианта поворота 1 (10) получили максимальную абсциссу поворота $l_{1\max} = 9,21$ м, максимальную ординату поворота $h_{1\max} = 4,69$ м и длину траектории поворота $S_{1\max} = 14,82$ м, а для варианта 2 (11) $l_{2\max} = 6,7$ м, $h_{2\max} = 3,95$ м и $S_{2\max} = 11,49$ м (рис. 3).

Согласно (2) при повороте передними управляемыми колёсами имеем $l_{\max} = 10,2$ м, $h_{\max} = 5,93$ м, $S_{\max} = 17,84$ м, а при повороте передними и задними колёсами – $l_{\max} = 6,07$ м, $h_{\max} = 3,8$ м, $S_{\max} = 11,26$ м.

Так как при повороте передними колёсами в сравнении с вариантом 1 комбинированного способа увеличиваются абсцисса, ордината и длина траектории поворота соответственно на 9,7%, 20,9 и 16,9%, то, очевидно, что наиболее рациональным с точки зрения обеспечения лучшей устойчивости и управляемости является комбинированный способ поворота.

В сравнении с вариантом 2 комбинированного способа при повороте передними и задними колёсами те же параметры уменьшаются на 9,4%, 3,8 и 2,0%. Однако теоретически выявленное незначительное преимущество традиционного способа поворота в условиях реальной эксплуатации на рыхлой почве не даёт желаемого результата, так как особенно на участке «вход в поворот» возрастает момент сопротивления повороту вследствие наличия одновременно с качением проскальзывания в направлении продольной оси трактора из-за нагребания грунта колёсами, что приводит не только к ухудшению, но, в некоторых случаях, и к потере устойчивости и управляемости [1]. Следовательно, для достижения требуемых устойчивости и управляемости МТА необходим выбор того или иного способа его движения на повороте, соответствующего конкретному эксплуатационному процессу.

Таким образом, разработанная методика расчёта позволяет определить характеристики теоретической траектории криволинейного движения трактора при различных законах управления режимами поворотов колёс и другими эксплуатационными и конструктивными параметрами.

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. Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчётах : анализ функциональных зависимостей и обработка данных, линейная алгебра, оптимизация и регрессии, пакеты расширения специального назначения, компьютерная алгебра и математический анализ / В.П. Дьяконов. – Москва : ДМК-Пресс, 2011. – 799 с.
3. Дьяконов В.П. Энциклопедия компьютерной алгебры / В.П. Дьяконов. – Москва : ДМК-Пресс, 2009. – 1264 с.
4. Кудрявцев В.А. Краткий курс высшей математики : учеб. пособие для вузов / В.А. Кудрявцев, Б.П. Демидович. – 7-е изд. – Москва : Наука, 1978. – 624 с.
5. Обоснование параметров и конструкции универсально-пропашного трактора повышенной эффективности / К.Н. Виноградов, А.С. Дурманов, Н.И. Киселев и др. – Воронеж : Изд-во Воронежского гос. ун-та, 1978. – 164 с.
6. Определение теоретической траектории движения трактора при повороте «крабом» / А.Н. Беляев, В.И. Оробинский, В.П. Шацкий и др. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 13, № 1 (64). – С. 42–49.
7. Пат. 2705413 Российская Федерация, МПК В62D 7/14, А01В 69/00 (2006.01). Способ поворота транспортного средства со всеми управляемыми колёсами / А.Н. Беляев, Д.Г. Козлов, И.А. Высоцкая, Т.В. Тришина; заявитель и патентообладатель А.Н. Беляев, Д.Г. Козлов, И.А. Высоцкая, Т.В. Тришина. – № 2019100113 ; заявл. 09.01.2019 ; опубл. 07.11.2019, Бюл. № 31. – 7 с.
8. Смирнов Г.А. Теория движения колёсных машин / Г.А. Смирнов. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Машиностроение, 1990. – 352 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. Федоренко В.Ф. Тенденции машинно-технологической модернизации сельского хозяйства за рубежом (по материалам международной выставки «Agritechnica-2015» / В.Ф. Федоренко, В.Я. Гольяпин, Н.П. Мишуров. – Москва : Росинформагротех, 2016. – 217 с.

13. Computation of Vehicle Motion Path upon Entering Turn / A.N. Belyaev, V.G. Kozlov, I.A. Vysotskaya, T.V. Trishina // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). – 2019. – Vol. 9, No. 1. – Pp. 4527–4531.
14. Karogal I. Independent Torque Distribution Strategies for Vehicle Stability Control : Technical Paper / I. Karogal, B. Ayalew // SAE World Congress & Exhibition. – 2009. – 01. – 0456. DOI: 10.4271/2009-01-0456.
15. Mammari S. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering / S. Mammari, V.B. Baghdassarian // Proceedings of the American Control Conference. – 2000. – Vol. 1 (6). – Pp. 105–109. DOI: 10.1109/ACC.2000.878782.
16. Mokhiamar O. Active wheel steering and yaw moment control combination to maximize stability as well as vehicle responsiveness during quick lane change for active vehicle handling safety / O. Mokhiamar, M. Abe // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2002. – Vol. 216 (2). – Pp. 115–124. DOI:10.1243/0954407021528968.
17. Orozco A.R. Evaluation of an Active Steering System / A.R. Orozco // Master's Degree Project. – Sweden, 2004. – 41 p.
18. Osborn R.P. Independent Control of All-Wheel-Drive Torque Distribution / R.P. Osborn, T. Shim // Vehicle System Dynamics. – 2006. – Vol. 44 (7). – Pp. 529–546. DOI: 10.1080/00423110500485731.
19. Ryu J.-C. Estimation of vehicle roll and road bank angle / J.-C. Ryu, J.C. Gerdes // Proceedings of the 2004 American Control Conference. – 2004. – Vol. 3. – Pp. 2110–2115. DOI:10.23919/acc.2004.1383772.
20. 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, проректор по заочному и дополнительному образованию ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: aifkm_belyaev@mail.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.

Виктор Валентинович Шередекин – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: viktor_scher@mail.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 06.05.2020

Дата принятия к печати 11.06.2020

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Alexander N. Belyaev, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Head of the Dept. of Applied Mechanics, Vice Rector for the Correspondence and Additional Education, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: aifkm_belyaev@mail.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, Russia, Voronezh, 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, Russia, Voronezh, e-mail: tata344@rambler.ru.

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

Irina A. Vysotskaya, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lecturer, the Dept. of Mathematics, 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, Russia, Voronezh, e-mail: i.a.trishina@gmail.com.

Received May 06, 2020

Accepted after revision June 11, 2020