

ANALYSIS OF MOVEMENT KINEMATICS AT TURN OF WHEEL TRACTOR WITH SEMI-TRAILER WITH ARTICULATED OPERATED DRAUGHT BAR

Summary

In this article the mathematical description and results of modelling of kinematics of turn of an agricultural tractor train with the semi-trailer with articulated operated draught bar is stated at various modes of turn.

Key words: tractors; semi-trailers; draught bar; kinematics; mathematical model

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ДВИЖЕНИЯ НА ПОВОРОТЕ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА С ПОЛУПРИЦЕПОМ С СОСТАВНЫМ ШАРНИРНЫМ УПРАВЛЯЕМЫМ ДЫШЛОМ

Резюме

В статье изложено математическое описание и результаты моделирования кинематики поворота сельскохозяйственного тракторного поезда с полуприцепом с составным шарнирным управляемым дышлом при различных режимах поворота.

Ключевые слова: тракторы; полуприцепы; дышло; кинематика; математическая модель

1. Введение

Развитие тракторных поездов идет по пути увеличения их удельной, на единицу конструктивной массы, грузоподъемности, снижения материалоемкости, повышения маневренности и допустимых скоростей движения в сцепе с трактором, а также показателей других важнейших свойств [1-4]. В реализации перечисленных путей четко прослеживаются достоинства полуприцепной схемы исполнения грузонесущего звена тракторного поезда перед схемой прицепа со свободным дышлом и схемой полунавесного прицепа [2]. При этом рост грузоподъемности полуприцепов достигается увеличением числа колесных осей тандемной колесной тележки, а повышение маневренности длиннобазовых прицепов – использованием составного («ломающегося») управляемого дышла. Однако многие вопросы динамики движения таких тракторных поездов требуют дальнейшего рассмотрения [1], с целью обоснованного выбора рациональных конструктивных параметров создаваемых новых полуприцепов, системы управления передней поворотной частью дышла, а при необходимости и подвороте колес или в целом колесной тележки полуприцепа.

В статье рассмотрены методические положения моделирования и оценки одного из важнейших свойств тракторных поездов с полуприцепом с составным управляемым дышлом - маневрового.

Рост энергонасыщенности и грузместимости сельскохозяйственных тракторных поездов сопровождается увеличением инерционности тракторных поездов, их длины, при этом стремятся увеличить и скорости движения за счет использования тягачей с переключением передач без разрыва потока мощности или трансмиссий с бесступенчатым изменением передаточного отношения, например, двухпоточных. Все это требует тщательного анализа динамики движения новых по конструктивной схеме тракторных поездов и, в частности, их маневрового свойства.

Цель данной статьи состоит в разработке математического описания и получении результатов моделирования кинематики поворота тракторного поезда с полуприцепом с составным шарнирным управляемым дышлом при различных режимах поворота.

2. Методические положения моделирования маневрового свойства

При создании тракторного транспортно-технологического агрегата на базе колесного трактора обязательным разделом предпроектных исследований является оценка его маневрового свойства. При такой оценке для случая движения МТА по круговой траектории с установившейся скоростью определяются радиусы поворота характерных точек и углы взаиморасположения звеньев агрегата. В качестве обобщающего оценочного параметра маневрового свойства используется, например, фактор маневренности, равный отношению габаритной ширины агрегата к габаритной ширине его круговой поворотной полосы.

Считается, чем ближе значение фактора маневренности к единице, тем лучшими маневровыми свойствами обладает агрегат. Для оценки приспособленности тракторного агрегата к прохождению стесненных проездов на поворотах поверхности движения используется величина ширины габаритной полосы движения при повороте, а для оценки поворотливости агрегата при максимальных углах поворота управляемых колес трактора – минимальный габаритный радиус поворота тракторного агрегата [4].

К оценкам маневренности при статическом повороте в случае необходимости добавляются тракторные оценки фаз неустановившегося движения на повороте: входа в поворот и выхода из него, то есть фазы, которая предшествует периоду кругового поворота и которая следует за ним [3].

Получение тракторных оценок криволинейного движения тракторного поезда производится на основе

общих выражений для характеристик криволинейного движения колесных тракторных агрегатов в функции угла поворота управляемых колес при различных значениях режимного параметра поворота, которые представляют собой систему дифференциальных уравнений и позволяют произвести сравнительную оценку агрегатов с одним тягачом и одним и тем же полуприцепом, но с различными законами управления поворотом «ломающимся» дышлом полуприцепа [2].

На рисунках представлены характерные состояния взаимного расположения звеньев рассматриваемого тракторного агрегата при круговом повороте.

На рисунке 1 обозначена величина e – эксцентриситета траекторий середины заднего моста трактора (т. С) и середины колесной тандемной тележки полуприцепа (т. К). Величина угла θ_0 равна полусумме соответствующих углов поворота правого и левого управляемых колес трактора-тягача, остальные обозначения ясны из рисунка.

При анализе исследуемого МТА представляет практический интерес оценка влияния на показатели маневренного свойства:

- базового расстояния полуприцепа;
- соотношений базовых расстояний трактора и полуприцепа;
- относительной длины ломающейся-поворотной части дышла полуприцепа;
- угла поворота поворотной части дышла полуприцепа;

$$A_0 \cdot \sin \gamma_1 \cdot \cos \gamma_2 + A_0 \cdot \cos \gamma_1 \cdot \sin \gamma_2 = c_0 \cdot \cos \gamma_1 \cdot \cos \gamma_2 - c_0 \cdot \sin \gamma_1 \cdot \sin \gamma_2 + l_1 \cdot \cos \gamma_2 + l_2$$

Сгруппируем подобные:

$$\underbrace{(l_0 \cdot \operatorname{ctg} \theta_0 \cdot \cos \gamma_2 + c_0 \cdot \sin \gamma_2)}_{C_1} \cdot \sin \gamma_1 + \underbrace{(l_0 \cdot \operatorname{ctg} \theta_0 \cdot \sin \gamma_2 - c_0 \cdot \cos \gamma_2)}_{C_2} \cdot \cos \gamma_1 = \underbrace{l_1 \cdot \cos \gamma_2 + l_2}_{C_3}$$

С учетом введенных обозначений получим:

$$C_1 \cdot \sin \gamma_1 + C_2 \cdot \cos \gamma_1 = C_3$$

Решив последнее уравнение, получим величину искомого угла γ_1 .

Схема а) (рисунок 1а):

$$\begin{aligned} \overline{O_0 C} = R_C = l_0 \cdot \operatorname{ctg} \theta_0 \quad \overline{O_0 A} = R_A = \sqrt{R_C^2 + c_0^2} \\ \overline{O_0 K} = R_K = \sqrt{R_A^2 + (l_1 + l_2)^2} = \sqrt{l_0^2 \cdot \operatorname{ctg}^2 \theta_0 + c_0^2 + (l_1 + l_2)^2} \\ \angle \alpha_0 = \operatorname{arctg} \frac{c_0}{l_0 \cdot \operatorname{ctg} \theta_0} \\ \angle (\gamma_1 - \alpha_0) = \operatorname{arctg} \frac{l_1 + l_2}{\sqrt{l_0^2 \cdot \operatorname{ctg}^2 \theta_0 + c_0^2 + (l_1 + l_2)^2}} \\ \angle \gamma_1 = \operatorname{arctg} \frac{c_0}{l_0 \cdot \operatorname{ctg} \theta_0} + \operatorname{arctg} \frac{l_1 + l_2}{\sqrt{l_0^2 \cdot \operatorname{ctg}^2 \theta_0 + c_0^2 + (l_1 + l_2)^2}} \\ e = R_C - R_K = l_0 \cdot \operatorname{ctg} \theta_0 - \sqrt{l_0^2 \cdot \operatorname{ctg}^2 \theta_0 + c_0^2 + (l_1 + l_2)^2} \end{aligned}$$

Схема б) (рисунок 1б):

$$R_C = l_0 \cdot \operatorname{ctg} \theta_0$$

- вылета точки сцепки;
- колеи полуприцепа.

Для определения числовых значений показателей маневренности были получены их аналитические выражения, боковой увод колес не учитывался. Из геометрических соотношений на основании рисунка 1а и рисунка 1б, при введении обозначения радиусов траекторий характерных i -ых точек расчетной схемы тракторного агрегата – R_i , получено:

$$R_A = \overline{AO_0} = \sqrt{l_0^2 \cdot \operatorname{ctg}^2 \theta_0 + c_0^2}$$

$$\angle \alpha_0 = \operatorname{arctg} \frac{c_0}{l_0 \cdot \operatorname{ctg} \theta_0}$$

$$R_{\dot{E}} = \sqrt{l_0^2 + R_K^2}$$

$$R_K = l_0 \cdot \operatorname{ctg} \theta_0 \cdot \cos(\gamma_1 + \gamma_2) + c_0 \cdot \sin(\gamma_1 + \gamma_2) + l_1 \cdot \sin \gamma_2$$

$$\overline{TK} = l_0 \cdot \operatorname{ctg} \theta_0 \cdot \sin(\gamma_1 + \gamma_2) = c_0 \cdot \cos(\gamma_1 + \gamma_2) + l_1 \cdot \cos \gamma_2 + l_2$$

откуда найдем неизвестный угол γ_1 .

Так как известно, что

$$\sin(\gamma_1 + \gamma_2) = \sin \gamma_1 \cdot \cos \gamma_2 + \cos \gamma_1 \cdot \sin \gamma_2$$

$$\cos(\gamma_1 + \gamma_2) = \cos \gamma_1 \cdot \cos \gamma_2 - \sin \gamma_1 \cdot \sin \gamma_2$$

то преобразуем последнее равенство, обозначив

$$l_0 \cdot \operatorname{ctg} \theta_0 = A_0 :$$

$$R_A = \sqrt{R_C^2 + c_0^2} = \sqrt{l_0^2 \cdot \text{ctg}^2 \theta_0 + c_0^2} \quad \angle CAO_\delta = \text{arctg} \frac{R_C}{c_0} = \frac{l_0 \cdot \text{ctg} \theta_0}{c_0}$$

$$\angle \beta_1 = 180^\circ - \gamma_1 - \angle CAO_\delta \quad \angle \alpha_0 = \text{arctg} \frac{c_0}{l_0 \cdot \text{ctg} \theta_0}$$

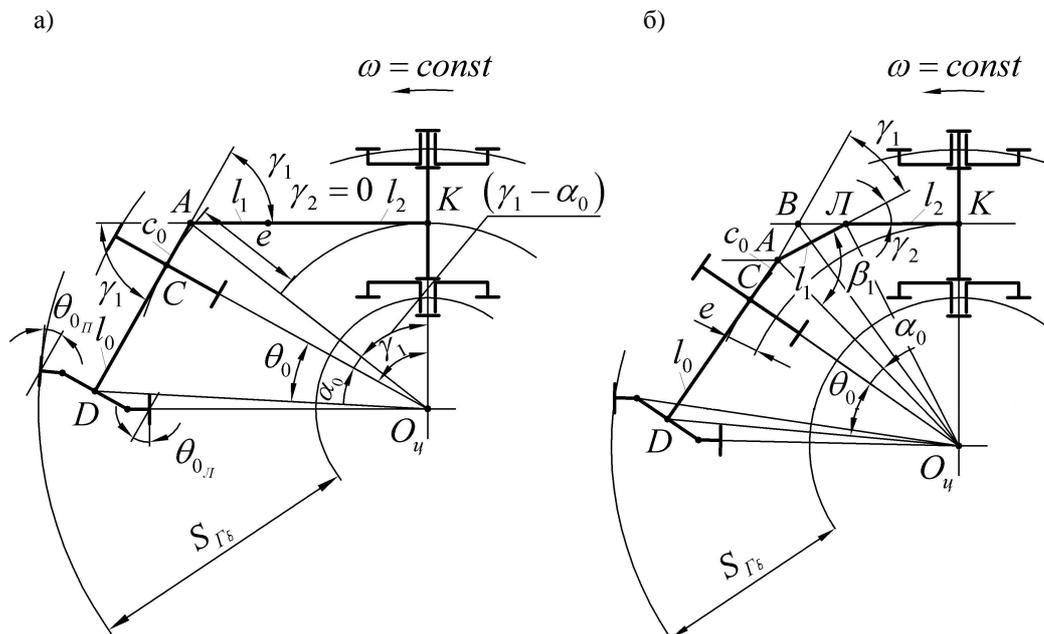


Рисунок 1. Схема тракторного агрегата на повороте: а) угол $\gamma_2 = 0$; б) угол $\gamma_2 > 0$
 Fig. 1. The scheme of the tractor unit on turn: a) corner $\gamma_2 = 0$; b) corner $\gamma_2 > 0$

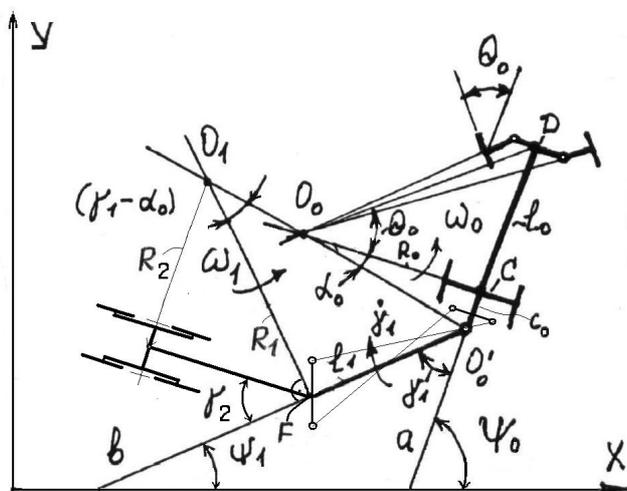


Рисунок 2. Схема неустановившегося поворота трактора с полуприцепом
 Fig. 2. The scheme of unsteady turn of a tractor with the semi-trailer

Приведенные выражения установившегося поворота позволяют исследовать влияние на показатели маневренности конструктивных параметров трактора и полуприцепа с поворотной частью дышла.

Для изучения фаз неустановившегося поворота тракторного агрегата (см. рисунок 2) получено дифференциальное уравнение относительно неизвестной величины – угла складывания γ_1 при изменении угла поворота управляемых колес θ_0 с постоянной скоростью для случаев постоянного угла установки γ_2 поворотной части дышла и управляемого изменения его

с помощью крестообразных связей, показанных на рисунке 2. Вывод уравнения не приводится из-за громоздкости.

Качественный характер изменения тракторных оценок маневрового свойства при входе в поворот и выходе из поворота в зависимости от угла поворота управляемых колес трактора показан на рисунке 3.

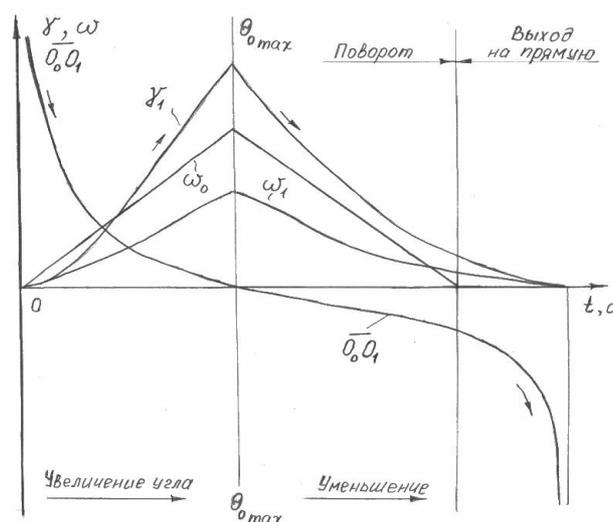


Рисунок 3. Характер изменения величин углов и угловых скоростей при повороте трактора с полуприцепом
 Fig. 3. Character of change of sizes of corners and angular speeds at turn of a tractor with the semi-trailer

Так, например, упомянутое дифференциальное уравнение при $\gamma_2 = 0$ имеет вид:

$$(\gamma_1)'_{\theta_o} = \frac{1}{k_f \cdot R_o(\theta_o)} \cdot \left[1 - \frac{\tilde{N}_o \cdot \sin[\gamma_1 - \alpha_o(\theta_o)]}{\ell_1 \cdot \sin[\alpha_o(\theta_o)]} \right],$$

которое позволяет при его решении одним из известных методов, например, методом Эйлера, получить связь углов θ_o и γ_1 о время криволинейного движения тракторных агрегатов рассмотренных схем. В уравнении $k_f = \frac{\dot{\theta}_o}{v_o}$ режимный параметр поворота,

где v_o - поступательная скорость центра задней оси тягача. Для тракторных агрегатов при малых радиусах поворота в стесненных условиях k_{Π} лежит в диапазоне 0,05...0,15 рад/м.

Начальные значения

$$\frac{d\gamma_1}{dt} = \frac{d\gamma_1}{d\theta_o} = 0; \quad \theta_o(t=0) = 0.$$

$\theta_o(\text{конечное})$ зависит от принятого режимного параметра и для диапазона k_{Π} , характерного для универсально-пропашных тракторов, можно принимать

$$\theta_o(\text{конечное}) \leq 0,58 \text{ рад},$$

так как предельные значения углов поворота управляемых колес или углов складывания, как правило, не превышают этого значения [3].

Шаг интегрирования последнего уравнения можно принять равным

$$\Delta\theta_o \approx 0,02 \text{ рад или } \Delta\theta_o = 1 \text{ град}.$$

Так как при повороте тракторного поезда, например, на 90° водитель вначале поворачивает колеса до некоторого угла $\theta_{o\max}$, а затем поворачивает их до нуля в обратную сторону, то это необходимо учесть при интегрировании дифференциального уравнения.

Приведенные выражения для случая неустановившегося поворота позволяют получить картину изменения характеристик маневра, совершаемого агрегатом:

$$\dot{\gamma}_1, \omega_o, \omega_1, \overline{O_o O_1}, \alpha_o, R_o, R_C, R_D, \overline{O'_o O_1}, R_F, \theta_o$$

в функции времени от начала его совершения, которые имеют следующий вид (см. рис. 3).

3. Результаты моделирования маневренности агрегата

Анализ проведенных вариантов расчетов показывает, что изменения величин, характеризующих фазы неустановившегося поворота, можно представить, как показано на рисунке 3. По расчетным данным для рассматриваемого агрегата с заданными размерами ($l_0 = 2,75$ м; $l_1 = 1,2$ м; $l_2 = 2,5$ м) построены графики, приведенные на рисунках 4, 5. Из графиков следует, что до угла поворота управляемых колес трактора в 11 градусов рост угла складывания полуприцепа относительно трактора отстает, а затем опережает рост угла θ_o , достигая значения в 71,5 градуса при максимальном по технической характеристике трактора-тягача угле $\theta_o = 37$ градусов. Причем после возврата управляемых колес в исходное положение угол γ_1 еще не равен нулю и выход на прямолинейное движение происходит по времени позже, что подтверждает обобщенную картину процесса поворота трактора с полуприцепом (рисунок 3). Однако при максимальных углах γ_1 и $\gamma_2 = 0$ металлоконструкция полуприцепа может соприкоснуться с трактором.

С увеличением угла γ_2 , при установке поворотной части дышла под углом к продольно-вертикальной плоскости, возможность неэксплуатационного контакта металлоконструкций звеньев агрегата будет существовать при меньших углах поворота управляемых колес θ_o .

На рисунках 5 и 6 приведены результаты оценки влияния параметров агрегата на показатели его маневренности при круговом повороте. Из графика на рисунке 5 следует, что до значений угла поворота управляемых колес трактора $\theta_o = 26$ град угол складывания полуприцепа относительно трактора, при $\gamma_2 = 0$ изменяется практически линейно, а затем происходит его прогрессивный рост, по сравнению с углом θ_o .

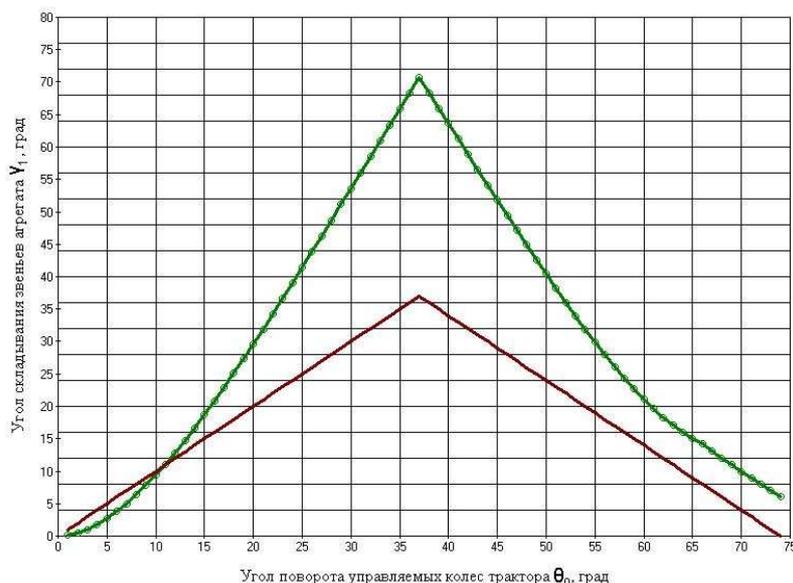


Рисунок 4. Взаимосвязь угла поворота управляемых колес трактора и угла складывания полуприцепа
Fig. 4. Interrelation of a corner of turn of tractor operated wheels and a corner of folding of the semi-trailer

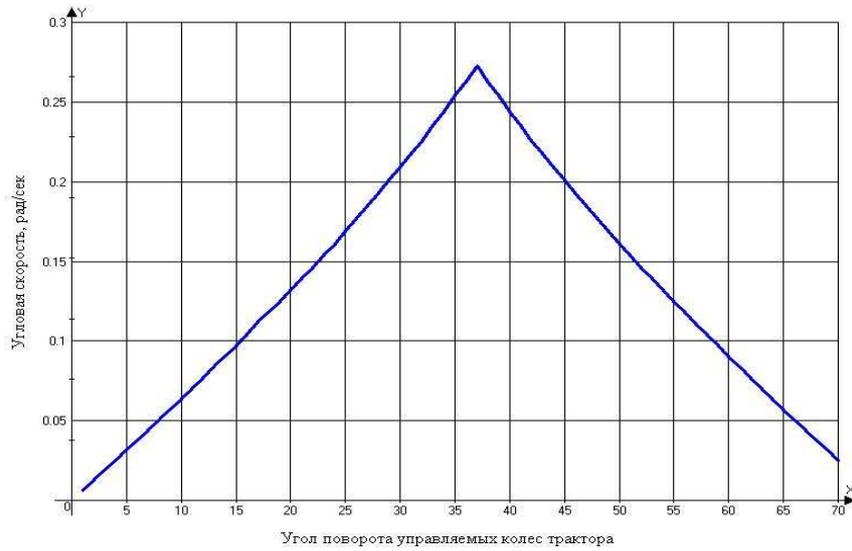


Рисунок 5. Зависимость угловой скорости поворота трактора от угла поворота управляемых колес
 Fig. 5. Dependence of angular speed of turn of a tractor on a corner of turn of operated wheels

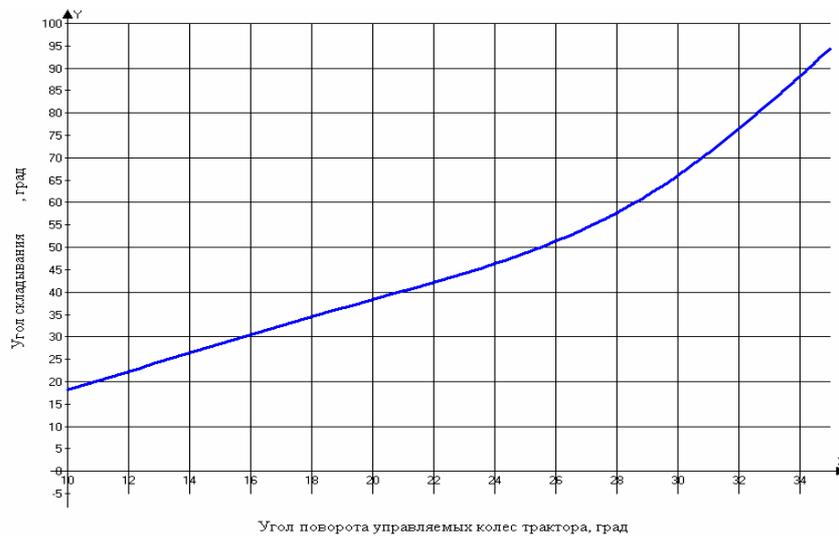


Рисунок 6. Зависимость $\gamma_1=f(\theta_0)$, при $\gamma_2=0$
 Fig. 6. Dependence $\gamma_1=f(\theta_0)$, at $\gamma_2=0$

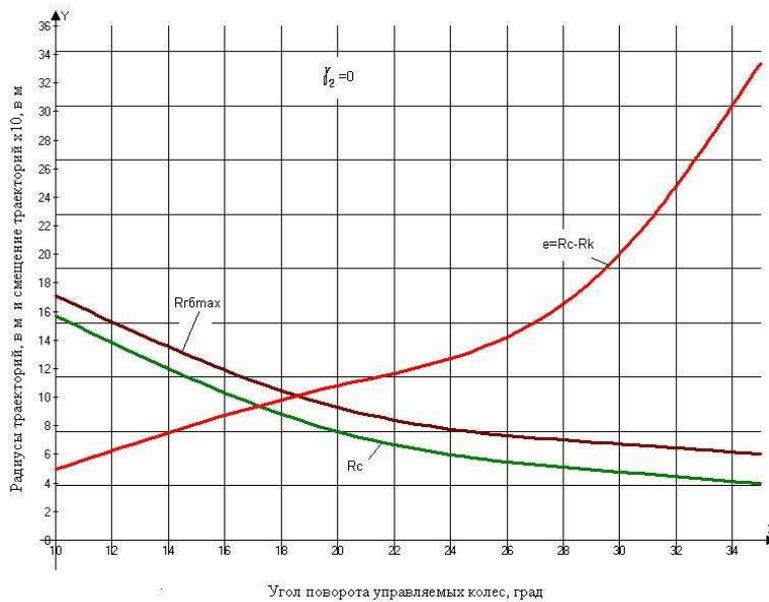


Рисунок 7. Параметры кругового поворота
 Fig. 7. Parameters of circular turn

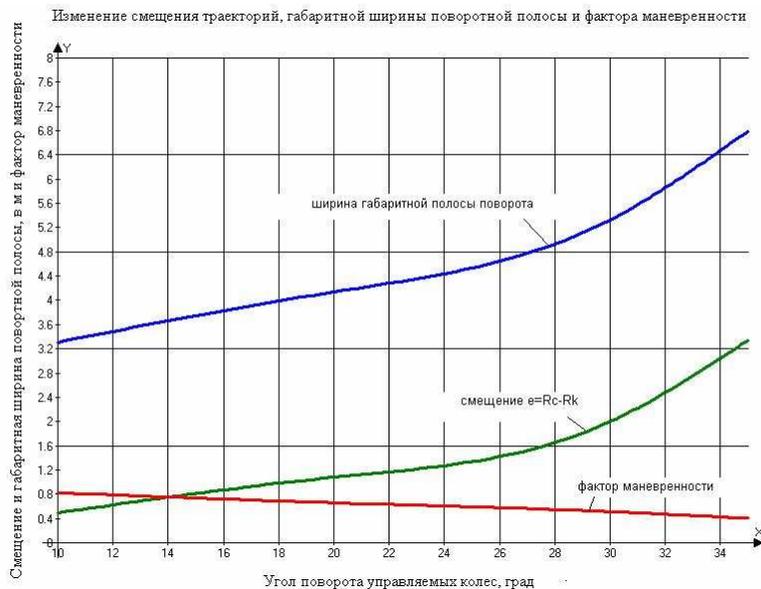


Рисунок 8. Характеристики поворота тракторного агрегата
 Fig. 8. Characteristics of turn of the tractor unit

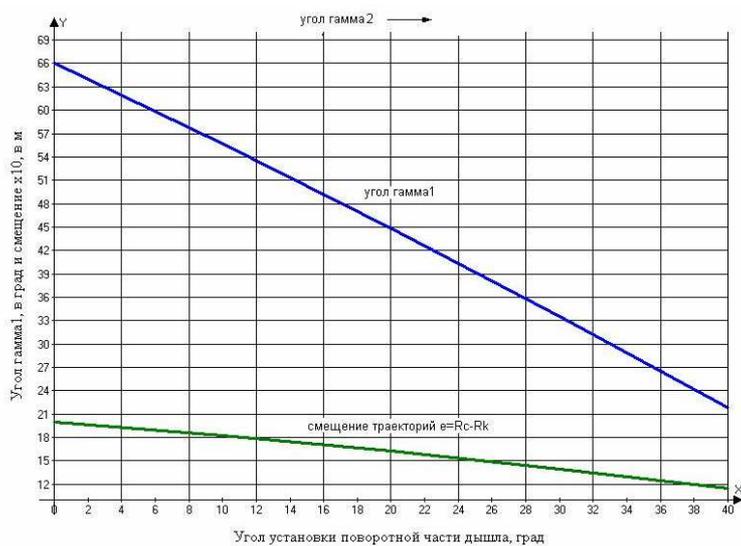


Рисунок 9. Влияние угла установки поворотной части дышла на показатели маневренности
 Fig. 9. Influence of a corner of installation of articulated part of draught bar on hinges operated trailer hitch on manoeuvrability indicators

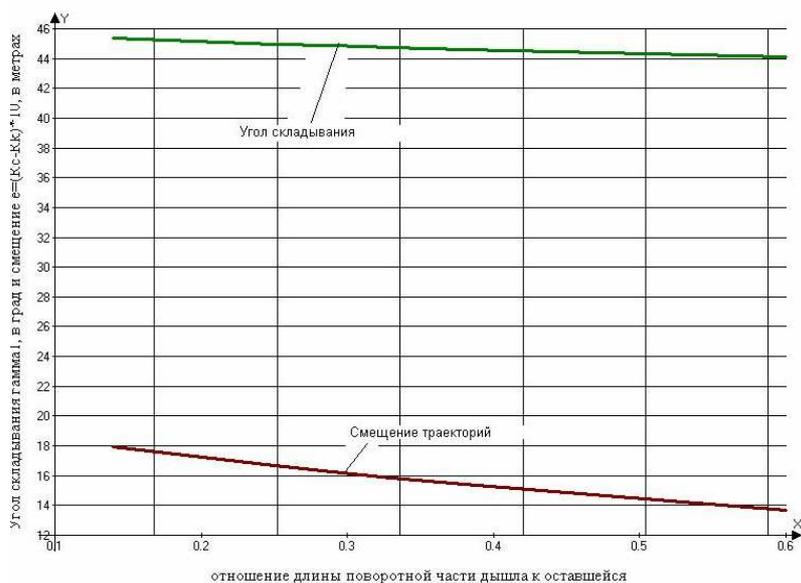


Рисунок 10. Характеристики маневренности МТА при изменении соотношений длин поворотной и неповоротной частей дышла полуприцепа
 Fig. 10. Characteristic of manoeuvrability MTA at change of parities of lengths of rotary and non-rotary parts of the semi-trailer's articulated operated draught bar

Приведенные результаты расчетов по полученным выражениям позволили установить характер влияния различных установок и параметров ломающегося дышла полуприцепа на маневровые свойства тракторного поезда нетрадиционной конструктивной схемы.

4. Заключение

Таким образом, разработана методика моделирования и определения показателей маневрового свойства сельскохозяйственного тракторного поезда с полуприцепом с составным шарнирным управляемым дышлом при различных режимах поворота.

Разработанная методика позволяет решать многие практические задачи исследования маневрового свойства тракторных поездов с прицепами новой конструктивной схемы, с целью выбора на стадии разработки прицепа наилучших параметров как самого прицепа, так и параметров его агрегатирования с предполагаемым тягачем. Изложенный метод применим и при решении обратной задачи кинематики неустановившегося поворота многозвенных автопоездов большой длины с поворотными относительно своих управляемых складывающихся дышел колесными

тележками при обеспечении заданной габаритной полосы движения на повороте. Дальнейшее развитие изложенной математической модели состоит в учете, при необходимости, углов увода колес и переходе от чисто кинематической модели к динамической модели исследуемого агрегата.

5. Литература

- [1] Kinematyka i dynamika agregatów maszynowych. Działy wybrane. //Praca zbiorowa pod red. Eugeniusza Krasowskiego. Ropczyce, 2005, 127 p.
- [2] Tajanowskij G., Tanas W., Tajanowskij A. Operating conditions of wheel drivers of active semi-trailers. // Teka, Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture./Polish Academy of sciences branch in Lublin/ Volume VIII, Lublin, 2008, p. 257-265.
- [3] Tractors: theory/ Guskov V.V., Velev N.N., Atamanov J.E. and other. M.: Engineering, 1988, 376 p.
- [4] Tajanowskij G.A.: The conception and tasks structure system of the analysis and approval of tractors transport units. News of Mogilev State Technical University, No. 1, 2001, - 198 p., page 173-178.