УДК 629.37

Демидов Леонид Владимирович
ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»
Россия, Москва
Ассистент преподавателя
E-Mail: del28@mail.ru

Зависимости движения звеньев транспортного средства для перевозки крупногабаритных тяжеловесных грузов и их применение при создании системы управления поворотом колес

Аннотация. В статье приводится некоторые зависимости, характерные для движения звеньев транспортного средства по одинаковой траектории и их применение в системе управления поворотом колес. Также приведена блок-схема работы системы управления. В статье также приведен краткий анализ и сравнение различных видов транспорта и автомобильных транспортных средств для перевозки крупногабаритных тяжеловесных грузов.

Ключевые слова: Крупногабаритный тяжеловесный груз; автомобильный транспорт; транспортное средство; система управления; платформа; маневренность; управляемость; траектория; поворот колес; траектория.

Рост отечественной промышленности создает потребность в новом, все более производительном оборудовании, степень готовности которого подразумевает его сборку и отладку на заводе изготовителе. В этом случае оборудование может обладать значительными массой и габаритами, то есть определяться как крупногабаритный тяжеловесный груз (КТГ), и его доставка к месту использования является довольно сложной задачей.

Перевозимый груз определяется как крупногабаритный в случае, если его размеры превышают: по длине 20 метров, по ширине 2,5 метра, по высоте 4,0 метра [1]. Некоторые примеры грузов такого типа представлены на рисунке .

а *б*

Рис. 1. *Некоторые виды грузов, которые можно отнести к крупногабаритным тяжеловесным грузам*
а – ректификационная колонна; б – электрический трансформатор большой мощности.

Для решения данной задачи могут применяться различные виды транспорта: водный, железнодорожный, воздушный и автомобильный [2]. Каждый из них обладает своими достоинствами и в некоторых случаях может оказаться незаменимым. Однако такие случаи достаточно редки и всегда есть возможность выбрать наиболее оптимальный и доступный из них. Максимальные параметры КТГ для различных видов транспорта приведены в таблице

0

Максимальные параметры КТГ для различных видов транспорта

Параметры КТГ	Транспорт			
	автомобильный	железнодорожный	водный	воздушный
Масса, т	Без ограничений	500,0	Без ограничений	250,0**
Длина, м	177,2*	92,1	290,0	43,0**
Ширина, м	7,5*	4,48	29,0	6,4**
Высота, м	7,5*	5,15	15,6	4,4**
* Условно допускаются к перевозке без реконструкции автомобильных дорог и искусственных сооружений; ** Данные для самолета АН-225 Мария.				

По данным Союза автоперевозчиков крупногабаритных тяжеловесных и опасных грузов (САКТОГ) в настоящее время доля перевозимых автотранспортом грузов подобного рода составляет от 2 до 2.5%, и этот показатель растет ежегодно на 5 - 10%. Это связано с тем, в том числе и с тем, что колесный транспорт позволяет доставить груз непосредственно от изготовителя к заказчику.

В настоящее время в мире для перевозки КТГ используются следующие виды автомобильного транспорта:

1) Автопоезда – тяжеловозы, состоящие из тягача и модульного прицепа или полуприцепа большой грузоподъемности (0);

2) Модульные самоходные платформы [3], способные соединяться друг с другом для увеличения грузоподъемности и увеличения площадки для перевозки груза (0). Также данные платформы способны работать на некотором расстоянии друг от друга при перевозке длинных грузов (0).

Рис. 2. *Автопоезд – тяжеловоз с модульным прицепом*

Рис. 3. *Модульные самоходные платформы, соединенные между собой*

Рис. 4. *Модульные самоходные платформы, работающие на некотором расстоянии*

Модульность конструкции обусловлена различием по форме, габаритам и массе перевозимых грузов. Она позволяет сделать перевозки более рентабельными, а также дает возможность не прибегать к созданию новых транспортных средств при перевозке различных по конструкции грузов.

Стоит отметить, что при значительной длине груза, размеры «цельного» транспортного средства, скомпонованного из отдельных модулей, могут быть довольно существенными (0), что в свою очередь отрицательно сказывается на показателях маневренности. В свою очередь снижение показателей маневренности автопоезда, особенно вписываемости [4], значительно влияет на способность транспортного средства двигаться по маршруту движения, проложенному по дорогам общего пользования, и на заводских территориях.

В случае если груз способен выдержать собственную массу (ректификационная колонна, химический реактор или другой груз подобного рода), то выходом из ситуации может быть размещение груза на нескольких платформах (0). Недостатком подобной схемы перевозки является то, что каждой платформой управляет один оператор, что может негативно сказаться на скорости движения автопоезда и отрицательно повлиять на безопасность перевозки груза из-за необходимости синхронизации действий при совершении поворота ведущей и ведомой платформами.

Устранить данный недостаток возможно при использовании нового типа системы управления, позволяющей осуществить движение ведомой платформы по траектории ведущей и, таким образом, предотвратить недостатки, которые неизбежно появляются при управлении каждой из платформ своим оператором.

Перед рассмотрением теоретических зависимостей необходимо описать принятые обозначения:

S – путь, проходимый ведущим звеном по переходной траектории;

R_1 – радиус кривизны переходной кривой;

R_{1min} – радиус круговой кривой;

$k_п$ – режимный параметр поворота;

V – скорость движения автопоезда;

V_1 – скорость движения ведущего звена;

V_2 – скорость движения ведомого звена;

t – время движения звена автопоезда по определенному участку;

α_1 – угол поворота первого по ходу движения приведенного колеса ряда, расположенного ближе всего к центру поворота;

$\alpha_{1\,max}$ – максимальный угол поворота приведенного колеса ведущей платформы;

α_2 – угол поворота приведенного колеса ведомой платформы;

ψ_1 – курсовой угол поворота ведущего звена;

ψ_2 – курсовой угол поворота ведомого звена;

γ_1 – угол складывания ведущего звена;

γ_2 – угол складывания ведомого звена;

φ – угол сектора окружности кругового движения;

$S_{\text{круг}}$ – длина круговой траектории;

L – длина перевозимого груза;

L_1 L_2 – расстояние от средней точки до оси приведенного колеса платформы;

x – расстояние между приведенными колесами одного ряда по ходу движения;

x_0 – расстояние от центра поворота до переднего колеса передней осевой линии по ходу движения;

y – расстояние между приведенными колесами осевой линии;

n – порядковый номер приведенного колеса одного ряда по ходу движения;

m – порядковый номер приведенного колеса одного ряда перпендикулярно ходу движения;

X_1,Y_1 – координаты основной точки ведущего звена;

X_2,Y_2 – координаты основной точки ведущего звена.

Рассмотрение подробной модели транспортного средства на данном этапе исследования нецелесообразно и для последующих расчетов вводятся следующие допущения [5]:

1. Движение является плоско-параллельным;
2. Увод шин отсутствует;
3. Колеса движутся без проскальзывания;
4. Силовые факторы, как внешние, так и внутренние не рассматриваются;
5. Инерционные составляющие исключаются;
6. Колеса каждой оси колесной опоры приведены к приведенному колесу;
7. Скорость движения является постоянной.

На первом этапе определим зависимости углов поворота приведенных колес одиночной платформы, схема поворота которой представлена на рисунке .

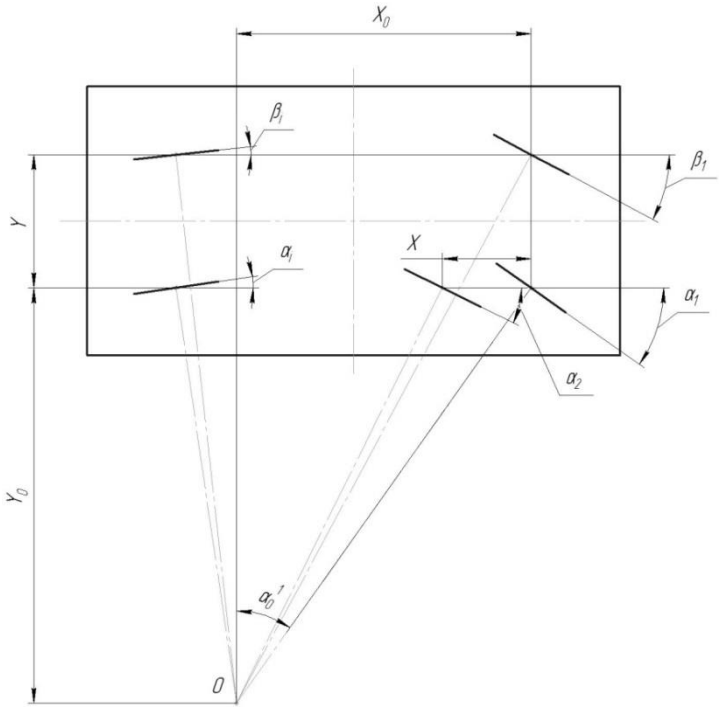

Рис. 5. *Схема поворота одиночной платформы*

Начальным параметром для расчета является угол поворота приведенного колеса передней по ходу осевой линии α_1, расположенный ближе всего к центру поворота. Значения углов поворота всех колес можно будет выразить по следующим формулам:

для приведенных колес первого ряда:

$$\alpha_i = arctg\left[\left(1 - \frac{(n-1)*x}{x_0}\right) * tg\alpha_1\right],$$

Для приведенных колес второго ряда, будет справедливо следующее выражение:

$$\beta_i = arctg\left(\frac{(x_0-(n-1)*x)*tg\alpha_1}{x_0+y*tg\alpha_1}\right),$$

Для платформы с количеством осевых линий равным n и количеством рядов равным m формула для определения поворота любого приведенного колеса будет иметь следующий вид:

$$\gamma_i = arctg\left(\frac{(x_0-(n-1)*x)*tg\alpha_1}{x_0+(m-1)*y*tg\alpha_1}\right).$$

Таким образом, можно определить углы поворота колес в зависимости от геометрических размеров и положения полюса поворота для платформы с любым их количеством.

Для движения ведомого звена по колее ведущего необходимо определить и описать траекторию движения ведущего звена для последующего ее использования при движении ведомого звена. Приведенные далее зависимости позволяют определить параметры транспортного средства в зависимости от типа траектории, по которой оно движется.

Схема движения транспортного средства, состоящего из двух платформ приведена на рисунке .

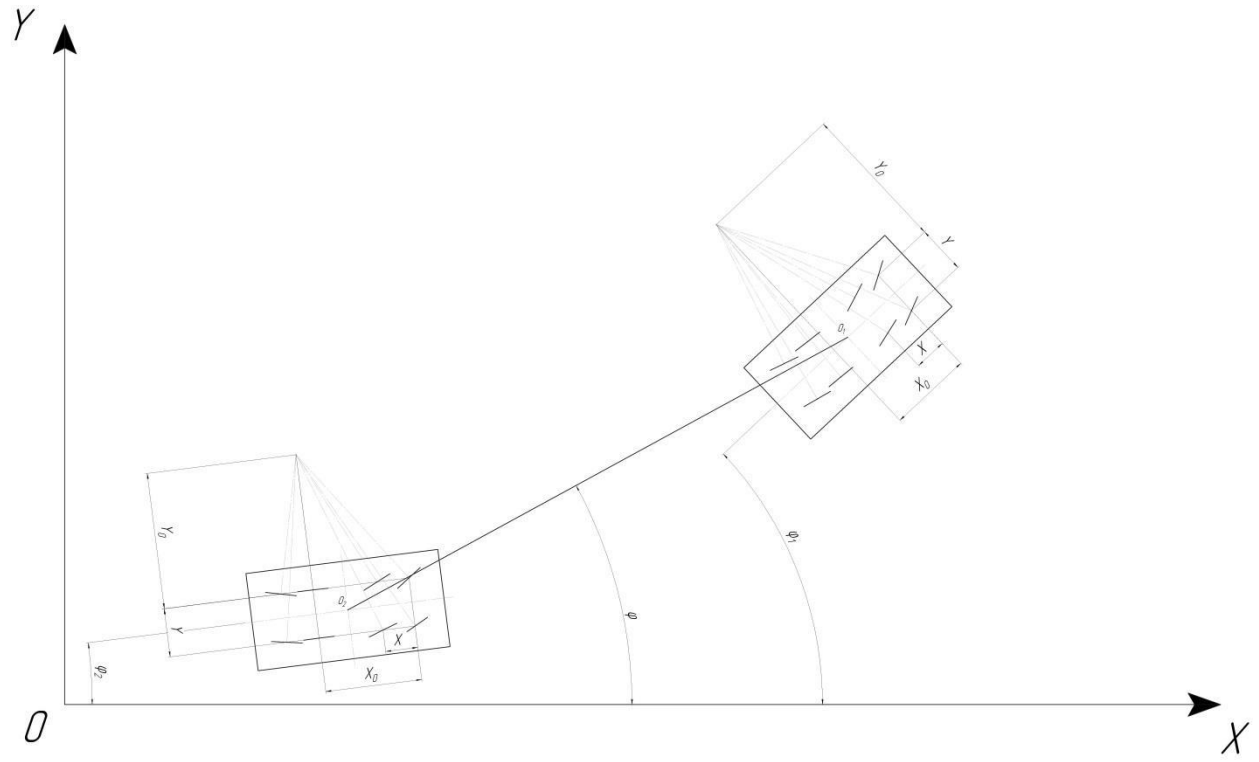

Рис. 6. *Схема движения транспортного средства*

Курсовой угол поворота ведущего звена при движении по переходной траектории можно определить по формуле [4]:

$$\psi_{1\ \text{перех}} = \int \frac{dS_1}{R_1} = \frac{2V}{b}\int tg\alpha\, dt = \frac{2V}{b}\int tg(k_{\text{п}}Vt)\, dt = -\frac{2}{k_{\text{п}}b}\ln(\cos(k_{\text{п}}Vt)).$$

Для входной траектории курсовой угол ведущего звена

$$\psi_{1\ \text{перех}}^{\text{вход}} = -\frac{2}{k_{\text{п}}b}\ln(\cos(k_{\text{п}}Vt)).$$

При этом время движения по переходной траектории можно определить по следующей зависимости:

$$t_1 = \frac{\alpha_{1\,max}}{k_п V}.$$

При круговом движении курсовой угол ведущего звена можно определить по формуле:

$$\psi_{1\,круг} = \psi_{1\,перех} + \varphi.$$

Угол сектора окружности кругового движения будет равен:

$$\varphi = \frac{V(t - \frac{\alpha_{1\,max}}{k_п V})}{R_{1min}}$$

Тогда курсовой угол при движении по круговой траектории будет равен

$$\psi_{1\,круг} = \frac{2}{b}(\left(Vt - \frac{\alpha_{1\,max}}{k_п}\right) tg\alpha_{1\,max} - \frac{1}{k_п}\ln(\cos(\alpha_{1\,max})).$$

При этом время движения по круговой траектории будет находиться в следующих пределах – от $t_1 = \frac{\alpha_{1\,max}}{k_п V}$ до $t_2 = \frac{1}{V}(\frac{\alpha_{1\,max}}{k_п} + S_{круг})$:

$$S_{круг} = \varphi R_{1min}$$

На выходной траектории курсовой угол поворота ведущего звена можно определить по формуле:

$$\psi_{1\,перех}^{вых} = \psi_{1\,круг} + \psi_{1\,перех};$$

$$\psi_{1\,перех} = \frac{2}{k_п b}(\ln\cos(k_п V t) - lncos(\alpha_{1\,max})).$$

$\psi_{1\,перех}$ рассчитывается во временном промежутке от $t = \frac{\alpha_{1\,max}}{k_п V}$ до $t = 0$.

Приращение курсового угла на выходной траектории окончательно будет определяться по формуле:

$$\psi_{1\,перех}^{вых} = \frac{2}{b}(S_{круг} tg\alpha_{1\,max} + \frac{1}{k_п} lncos(k_п V t) - -\frac{2}{k_п} lncos(\alpha_{1\,max})).$$

Для второй платформы курсовой угол ψ_2 будет определяться следующим образом:

На переходной траектории:

$$\psi_{2\,перех}^{вход} = -\frac{2}{k_п b}\ln(\cos\left(k_п V(t - \frac{L_1}{V})\right).$$

Стоит отметить, что при расчетах длина отрезка переходной траектории между основными точками может приниматься равной длине перевозимого груза без существенного влияния на конечный результат. Это видно из графика (0) сравнения длины перевозимого груза и длины отрезков переходной кривой.

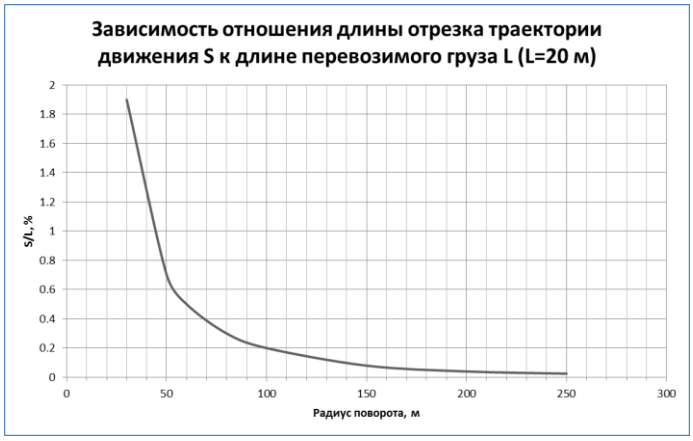

Рис. 7. *Зависимость отношения длины отрезка траектории движения к длине перевозимого груза*

При этом движение по переходной траектории происходит во временных промежутках: от $t_0 = \frac{L_1}{V}$ до $t_1 = \frac{1}{V}(\frac{\alpha_{1\,max}}{k_п} + L_1)$.

На круговой траектории

$$\psi_{2\,круг} = \frac{2}{b}(\left(Vt - \frac{\alpha_{1\,max}}{k_п} + L_1\right) tg\alpha_{1\,max} - \frac{1}{k_п}\ln(\cos(\alpha_{1\,max})).$$

Время движения на переходной траектории будет находиться в диапазоне от $\frac{1}{V}(\frac{\alpha_{1\,max}}{k_п} + L_1)$. до $t_2 = \frac{1}{V}(\frac{\alpha_{1\,max}}{k_п} + L_1 + S_{круг})$.

На выходной траектории:

$$\psi_{2\,перех}^{выход} = \psi_{2\,круг} + \psi_{2\,перех};$$

$$\psi_{2\,перех} = \frac{2}{k_п b}(\ln\cos\left(k_п V(t - \frac{L_1}{V})\right) - \ln\cos(\alpha_{1\,max})).$$

При этом t изменяется в пределах от $t = \frac{1}{V}(\frac{\alpha_{1\,max}}{k_п} + L_1)$ до $t = \frac{L_1}{V}$

Тогда

$$\psi_{2\,перех}^{выход} = \frac{2}{b}(S_{круг} tg\alpha_{1\,max} + \frac{1}{k_п} lncos\left(k_п V\left(t - \frac{L_1}{V}\right)\right) - -\frac{2}{k_п} lncos(\alpha_{1\,max})).$$

Для определения курсового угла перевозимого груза необходимо знать координаты основных точек ведущего и ведомого звеньев:

$$\psi = arctg\frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}.$$

Для их определения воспользуемся известными зависимостями, применяемыми для определения координат на криволинейной траектории:

$$X = \int \cos\psi dS;$$

$$Y = \int \sin\psi dS.$$

С учетом того, что $\psi = -\frac{2}{k_п b}\ln(\cos(k_п V t))$ получим:

$$X = \frac{1}{k_п}\int_0^{\alpha_1 max} \cos(-\frac{2}{k_п b}\ln(\cos\alpha_1))d\alpha_1;$$

$$Y = \frac{1}{k_п}\int_0^{\alpha_1 max} \sin(-\frac{2}{k_п b}\ln(\cos\alpha_1))d\alpha_1.$$

Интегрируя полученные выражения получаем уравнения для определения текущих координат точки транспортного средства:

$$X = \frac{\alpha_1}{k_п} - \frac{{\alpha_1}^5}{10{k_п}^3 b^2} - \frac{{\alpha_1}^7}{42{k_п}^3 b^2} + \frac{{\alpha_1}^9}{22680{k_п}^5 b^4}\left(105 - 147{k_п}^2 b^2\right) + \cdots;$$

$$Y = \frac{{\alpha_1}^3}{3{k_п}^2 b} + \frac{{\alpha_1}^5}{30{k_п}^2 b} + \frac{{\alpha_1}^7}{630{k_п}^4 b^3}\left(4{k_п}^2 b^2 - 15\right) + \frac{{\alpha_1}^9}{45360{k_п}^4 b^3}\left(68{k_п}^2 b^2 - 420\right) + \cdots.$$

Таким образом можно определить координаты основных точек ведущего и ведомого звена и, следовательно, курсовые углы.

Зная курсовые углы звеньев автопоезда можно найти углы складывания. Для данного автопоезда углы складывания могут быть определены следующим образом:

$$\gamma_1 = \psi_1 - \psi;$$

$$\gamma_2 = \psi - \psi_2.$$

Движение самого транспортного средства можно описать также системой из шести линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_1 = \frac{V_1}{L_1}\sin\alpha_1 \\ \dot{X}_1 = V_1\cos\alpha_1\cos\varphi_1 \\ \dot{Y}_1 = V_1\cos\alpha_1\sin\varphi_1 \\ \dot{\psi}_2 = \frac{V_2}{L_2}\mathrm{tg}\alpha_1 \\ \dot{X}_2 = V_2\cos\varphi_2 \\ \dot{Y}_2 = V_2\sin\varphi_2. \end{cases}$$

При этом скорость движения точки закрепления груза можно определить по формуле:

$$V_2 = V_1\frac{\cos\alpha_1\cos\gamma_1}{\cos\gamma_2},$$

А углы складывания:

$$\gamma_1 = \psi_1 - \mathrm{arctg}\frac{(Y_1-Y_2)}{(X_1-X_2)};$$

$$\gamma_2 = \mathrm{arctg}\frac{(Y_1-Y_2)}{(X_1-X_2)} - \psi_2.$$

Вышеприведенные зависимости позволяют описать движение автопоезда на различных типах основных траекторий путем их комбинации в зависимости от типа поворота.

Для дальнейшего проведения исследований были выбраны три основных типа поворота: поворот на 90 градусов, поворот на 180 градусов и S – образный поворот.

Работа системы управления будет происходить следующим образом. Сигналом электронной системе управления о том, что транспортное средство начало движение по криволинейной траектории будет являться изменение угловой скорости поворота осей. Кроме того в точке начала поворота осей необходимо зафиксировать неподвижную систему координат (0), необходимую для расчета траектории движения ведомого звена. После этого координаты переходной траектории могут быть определены по формулам, приведенным выше.

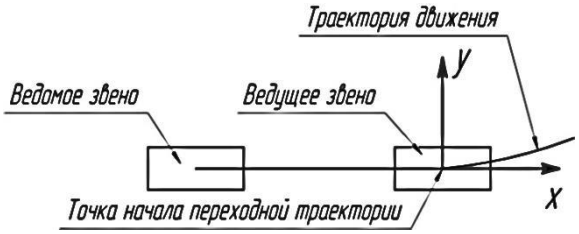

Рис. 8. *Схема к пояснению определения положения неподвижной системы координат*

При движении транспортного средства по круговой траектории расчет координат прекращается, и идет расчет пути движения по круговой траектории. В точке выхода ведущего звена с кругового участка на переходной система управления снова начинает расчет координат по вышеприведенным уравнениям.

Ведомое звено движется следующим образом: после определения точки начала переходной кривой, вычисляется момент времени начала входа движения по ней ведомого звена в зависимости от длины перевозимого груза и скорости движения ведомого звена. Путь, пройденный ведомым звеном можно определить при помощи датчика пройденного пути, связанного с неприводным колесом. Курсовые углы удобно определять при помощи, например, гироскопических датчиков или электронных компасов.

Порядок прохождения ведомым звеном траектории движения следующий. В момент прохождения начальной точки переходной траектории ведущим звеном происходит вычисление координат и курсового угла по вышеприведенным формулам. Момент времени, в который ведомое звено должно начать движение по переходной кривой, определяется исходя из длины перевозимого груза и скорости движения ведомого звена. Датчик на колесе фиксирует длину пройденного пути и сравнивает ее с длиной груза. Как только значения будут совпадать, начинается поворот колес ведомого звена в соответствии с данными, которые пришли с

ведущей платформы. Далее начинается сравнение путей, пройденных ведущей и ведомой платформой, и соответствующий им поворот колес при движении по траектории.

При выходе из поворота углы поворота колесных опор становятся равными нулю. Это служит сигналом микропроцессору, что поворот закончен.

Блок-схема работы системы управления выглядит следующим образом (рис.9):

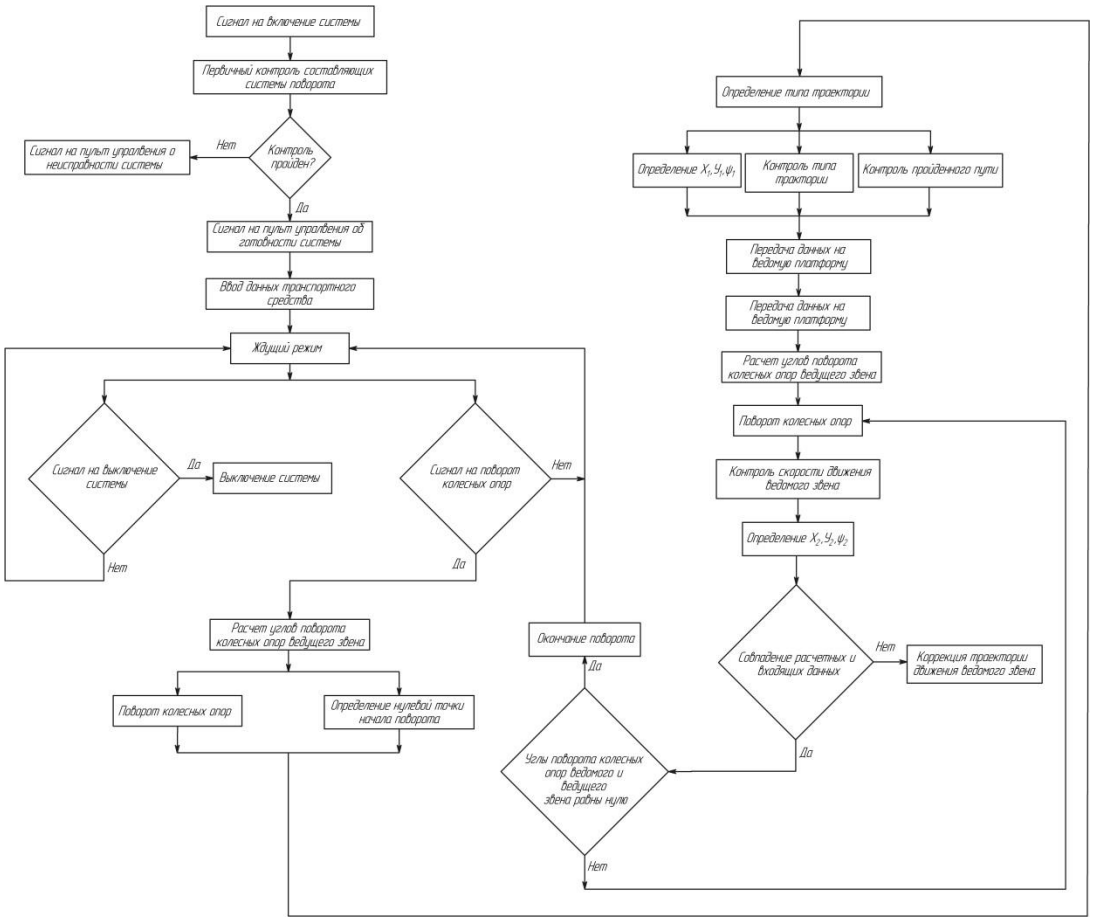

Рис. 9. *Блок-схема работы системы управления поворотом колес транспортного средства*

После включения системы происходит первичный контроль всех систем и при успешном завершении подается сигнал на пульт управления об его успешном завершении. В противном случае подается сигнал об ошибке. Далее происходит ввод данных транспортного средства, в частности длина перевозимого груза. После ввода данных система переходит в ждущий режим, ожидая команды оператора. В данном случае система либо выключается оператором, либо подается сигнал на поворот колес на некоторый угол. При подаче сигнала о повороте колесных опор, микроконтроллер обрабатывает его и выдает сигнал на поворот колес и, параллельно, определяет координаты нулевой точки начала поворота. Далее вычисляется тип траектории по которой движется в данный момент транспортное средство (переходная или круговая). После определения типа траектории происходит расчет параметров ведущего звена, для определения траектории движения основной точки – координат основной точки на плоскости и курсового угла ведущего звена. Также параллельно осуществляется контроль пройденного пути. Далее данные о траектории передаются с микроконтроллера ведущего звена на микроконтроллер ведомого, где происходит расчет параметров поворота и момента начала

поворота ведомого звена. В качестве обратной связи ведомое звено также определяет траекторию движения и сопоставляет ее с полученной от ведущей платформы. При расхождении значения более чем на 5% происходит коррекция траектории ведомого звена. Одновременно происходит контроль скорости движения ведомого звена, чтобы не допустить наезда или отставания ведомого звена от ведущего и чрезмерных нагрузок на перевозимый груз. Как только колеса ведущего звена поворачиваются в положение, соответствующее прямолинейному движению, система определяет данную точку на опорной поверхности и в момент прохождения ее ведомым звеном дает команду на прекращение поворота. Таким образом происходит работа системы управления поворотом колес транспортного средства.

Статья опубликована в рамках Программы стратегического развития ФГБОУ МАДИ на период 2012 – 2016 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобили. Специализированный подвижной состав: Учебное пособие для вузов / Высоцкий М.С. и др.; под общ. ред. М.С. Высоцкого. – Мн.: Выш. шк., 1989. – 240 с.: ил. - ISBN 5-339-00156-3.
2. Белоусов, Б.Н. Прикладная механика наземных тягово – транспортных средств с мехатронными системами . / Б.Н. Белоусов, С.Б. Шухман – М.: Агроконсалт, 2013. –612с.: ил. - ISBN 978-5-906236-01-2.
3. Scheuerle SPMT 3000 [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: http://static.sstorg.ru/files/products_out/4649097.pdf?title=Техника_СПМТ.pdf, свободный. – Заглавие с экрана.
4. Закин, Я.Х. Маневренность автомобиля и автопоезда / Я.Х. Закин. – М.: Машиностроение, 1986. – 136 с.
5. Гладов, Г.И., Петренко, А.М. Специальные транспортные средства. Теория. / Г.И. Гладов, А.М. Петренко, под. ред. Г.И. Гладова. – М.: ИЦК «Академкнига», 2006. – 215 с.: ил. ISBN 5-94628-254-9.

Leonid Demidov
The Moscow state automobile and road technical university
Russia, Moscow
E-Mail: del28@mail.ru

According to the movement of parts of the vehicle for the carriage of heavy cargoes and their application in the construction of the control system by turning the wheels

Abstract. The article provides some dependence, characteristic for the movement of parts of the vehicle on the same trajectory and their application in the control system by turning the wheels. Also shows the block diagram of the control system operation. The article also provides a brief analysis and comparison of different types of transport and motor vehicles for the transport of heavy goods.

Keywords: heavy cargo; road transport; vehicle; control system; platform; agility; manageability; the trajectory; the wheels turn; the trajectory.

REFERENCES

1. Avtomobili. Specializirovannyj podvizhnoj sostav: Uchebnoe posobie dlja vuzov / Vysockij M.S. i dr.; pod obshh. red. M.S. Vysockogo. – Mn.: Vysh. shk., 1989. – 240 s.: il. - ISBN 5-339-00156-3.
2. Belousov, B.N. Prikladnaja mehanika nazemnyh tjagovo – transportnyh sredstv s mehatronnymi sistemami . / B.N. Belousov, S.B. Shuhman – M.: Agrokonsalt, 2013. – 612s.: il. - ISBN 978-5-906236-01-2.
3. Scheuerle SPMT 3000 [Jelektronnyj resurs]. – 2012. – Rezhim dostupa: http://static.sstorg.ru/files/products_out/4649097.pdf?title=Tehnika_SPMT.pdf, svobodnyj. – Zaglavie s jekrana.
4. Zakin, Ja.H. Manevrennost' avtomobilja i avtopoezda / Ja.H. Zakin. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 136 s.
5. Gladov, G.I., Petrenko, A.M. Special'nye transportnye sredstva. Teorija. / G.I. Gladov, A.M. Petrenko, pod. red. G.I. Gladova. – M.: ICK «Akademkniga», 2006. – 215 s.: il. ISBN 5-94628-254-9.