

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОЛЕСНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

MODELING THE MOVEMENT CONTROL OF A WHEELED AGRICULTURAL MACHINE IN REAL TIME

А.С. НЕНАЙДЕНКО
В.И. ПОДДУБНЫЙ, д.т.н.
А.И. ВАЛЕКЖАНИН, к.т.н.

Алтайский государственный технический университет
 им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия,
 nenaydenko.a.s@mail.ru

A.S. NENAJDENKO
V.I. PODDUBNYJ, DSc in Engineering
A.I. VALEKZHANIN, PhD in Engineering

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia,
 nenaydenko.a.s@mail.ru

В АлтГТУ им. И.И. Ползунова проводятся исследования, целью которых является разработка системы управления движением для колесных сельскохозяйственных машин. Одним из наиболее важных этапов при этом является апробация разработанных алгоритмов управления. Целесообразным представляется замена полевых испытаний моделированием движения в режиме реального времени, позволяющим существенно снизить финансовые и временные затраты. Разработанный алгоритм управления условно можно разделить на глобальное и локальное регулирование. Глобальное регулирование должно по отклонению от задаваемой траектории определять угол поворота управляемых колес (или угла слома рамы), обеспечивающий движение по задаваемой траектории. Входными параметрами являются задаваемая траектория движения, текущие координаты машины и проекции скорости на неподвижные оси. Локальное регулирование обеспечивает реализацию задаваемого значения угла поворота управляемых колес. На вход программы локального регулирования подаются значения задаваемого и текущего углов поворота колес и направление вращения электродвигателя подруливающего устройства. Алгоритм определения необходимого угла поворота колес основывается на методике прогнозирования положения колесной машины через задаваемое время прогноза. При испытаниях в режиме реального времени колесная машина заменяется ее математической моделью, полученной с использованием дифференциальных уравнений плоского движения. Комплекс аппаратуры обеспечивает регистрацию и генерацию необходимых параметров для работы системы управления в реальном времени. Испытания были проведены на экспериментальном стенде «рулевое управление – передняя подвеска автомобиля». Передние управляемые колеса поворачивались электромеханическим подруливающим устройством на угол, обеспечивающий движение по задаваемой траектории. Моделировалось движение по прямолинейной и криволинейной траекториям с учетом возмущений со стороны опорной поверхности и без них. При движении по криволинейной траектории отклонения от задаваемой траектории не превышает 0,3 метра при скорости движения 3,33 м/с. По результатам экспериментов было установлено, что реализованный алгоритм управления обеспечивает движение по задаваемой траектории с достаточной степенью точности.

Ключевые слова: точное земледелие, система управления движением, колесная машина, дифференциальные уравнения движения, математическая модель, моделирование в режиме реального времени.

The research, which purpose is the development of a motion control system for wheeled agricultural machines, is conducted in Polzunov Altai State Technical University. One of the most important steps in this case is the testing of the developed control algorithms. It is advisable to replace the field trials by real-time motion modeling, which allows to significantly reduce financial and time costs. The developed control algorithm can be conditionally divided into global and local regulation. Global regulation must determine the angle of rotation of the steered wheels (or the angle of the frame break) by a deviation from the specified trajectory, which ensures the motion along the specified trajectory. Input parameters are the specified path of motion, the current coordinates of the machine and the projection of speed on fixed axes. Local control provides the implementation of the set value of the angle of rotation of the steered wheels. To the input of the local adjustment program is given the values of the set and current angles of rotation of the wheels and the direction of rotation of the electric motor of the maneuvering device. The algorithm for determining the required angle of rotation of the wheels is based on the method of predicting the position of the wheeled vehicle through the predetermined forecast time. In real-time tests, the wheeled vehicle is replaced by its mathematical model, obtained using the differential equations of plane motion. The complex of equipment provides registration and generation of the necessary parameters for the operation of the control system in real time. The tests were carried out on the experimental stand «steering – front suspension of the vehicle». The front steerable wheels were rotated by an electromechanical maneuvering device to an angle providing movement along a given trajectory. The motion along rectilinear and curvilinear trajectories was modeled taking into account perturbations from the side of the support surface and without them. When moving along a curvilinear trajectory, the deviation from the specified trajectory does not exceed 0,3 meters at a speed of 3,33 m/s. Based on the results of the experiments, it was established that the implemented control algorithm ensures motion along a given trajectory with a sufficient degree of accuracy.

Keywords: precise agriculture, motion control system, wheeled vehicle, differential equations of motion, mathematical model, real-time modeling.

Введение

Информационные технологии находят широкое применение во многих областях деятельности человека. В агропромышленном комплексе страны ИТ-технологии используются в системах точного земледелия при создании аппаратной составляющей подруливающих устройств и систем автопилотирования. Применение систем точного земледелия позволяет существенно повысить эффективность использования сельскохозяйственных машин, снизить расход топлива, удобрений, уменьшить утомляемость водителя. При этом стоит отметить отсутствие на российском рынке таких отечественных систем, а импортное оборудование отличается высокой стоимостью и в силу определенных причин [1] не всегда может быть использовано на отечественной сельхозтехнике.

В АлтГТУ им. И.И. Ползунова проводятся исследования, целью которых является разработка системы управления движением колесной машины для отечественной сельскохозяйственной техники, не уступающей по своим характеристикам импортным подруливающим системам и автопилотам, а также имеющей более приемлемую стоимость для сельхозпроизводителей.

Одним из наиболее важных этапов при создании системы управления является апробация разработанных алгоритмов управления движения. Обычно она осуществляется экспериментально в полевых условиях. Следует отметить, что полевые испытания связаны со значительными финансовыми и временными затратами. В последнее время в конструкторско-исследовательской работе широко используется идеология моделирования движения механических систем в режиме реального времени. Суть ее заключается в том, что большая часть механической системы, за исключением исследуемого узла, описывается механико-математической моделью. При симуляции движения в режиме реального времени исследуемый узел посредством измерительной аппаратуры, блоков ЦАП, АЦП взаимодействует с моделью системы. Таким образом, текущие значения силовых и кинематических параметров исследуемого узла передаются в математическую модель. Соответственно, дорогостоящие экспериментальные исследования механической системы можно заменить испытаниями в лабораторных условиях.

Цель исследования

Целью исследования является разработка алгоритма управления движением колесной машины в режиме реального времени, а также проверка его работоспособности в лабораторных условиях.

Для достижения этой цели необходимо составить математическое описание алгоритма управления движением колесной машины, программно реализовать его взаимодействие с ранее разработанной математической моделью колесной машины, апробировать в среде Matlab, разработать программное обеспечение, обеспечивающее симуляцию движения в режиме реального времени, и пользовательский интерфейс с аппаратной составляющей системы управления движением, провести испытания на экспериментальном стенде.

Программно-аппаратная схема взаимодействия элементов системы управления

Одной из важных задач при создании системы управления является разработка алгоритма управления, обеспечивающего движение сельскохозяйственной машины по задаваемой траектории, и его программно-аппаратная реализация. Алгоритм управления условно можно разбить на две части – глобальное и локальное регулирование. Схема взаимодействия программно-аппаратных частей разрабатываемой системы управления представлена на рис. 1.

Локальное регулирование обеспечивает реализацию текущего задаваемого значения угла поворота управляемых колес. На вход программы управления поворотом колес поступают значения задаваемого угла поворота, текущее значение угла поворота колес и направление вращения электродвигателя (определяется по сигналам напряжений с трех датчиков Холла, установленных в двигателе). На основании этих параметров с помощью алгоритма ПИД-регулирования происходит расчет величины управляющего напряжения, которое необходимо передать на электродвигатель для реализации необходимого угла поворота, а также определяется текущее направление вращения двигателя. Реализация локального регулирования подробно изложена в работе [2].

Глобальное регулирование должно по отклонению от задаваемой траектории определять угол поворота управляемых колес (или угла слома рамы), обеспечивающий движение

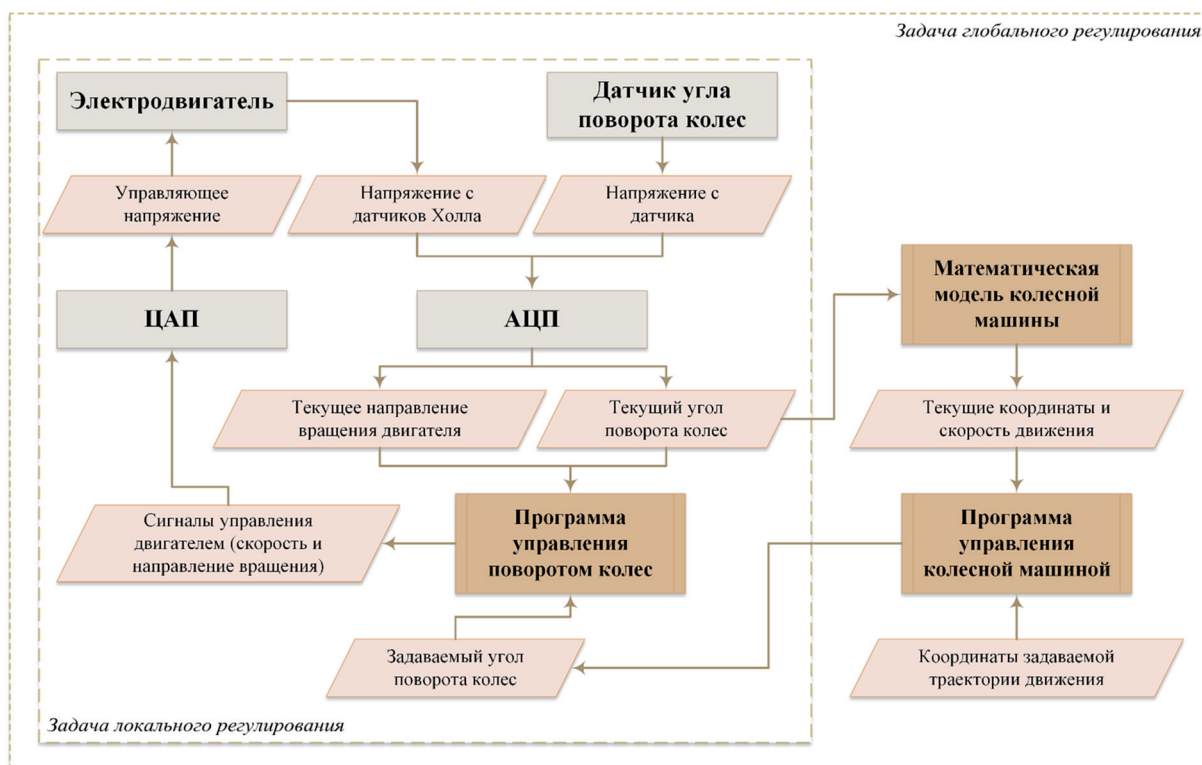


Рис. 1. Схема взаимодействия программно-аппаратных частей системы управления

по задаваемой траектории. На вход программы управления движением сельскохозяйственной машины поступают координаты задаваемой траектории движения, текущие координаты и проекции скорости на неподвижные координатные оси. Происходит вычисление необходимого угла поворота колес, который в свою очередь передается в программу локального регулирования. Текущие координаты и проекции скорости «поставляет» математическая модель колесной машины при симуляции движения в режиме реального времени.

Алгоритм управления движением

Алгоритм основывается на методике, изложенной в работах [3, 4]. Рассмотрим схему перемещения автомобиля из точки M_0 в M_1 относительно неподвижной системы координат YOX (рис. 2).

Прогнозируемое расстояние M_0M определяется следующим выражением:

$$M_0M = \sqrt{V_{x_0}^2 + V_{y_0}^2} t_{\text{прогноза}},$$

где V_{x_0} и V_{y_0} – проекции скоростей направляющей точки на соответствующие оси X и Y ; $t_{\text{прогноза}}$ – прогнозируемое время движения из точки M_0 в M_1 .

Для определения поперечного смещения MM_1 необходимо знать координаты точек M_1

и M . Координаты прогнозируемого положения M определяются через текущие координаты направляющей точки x_0 в y_0 и проекции скорости V_0 :

$$x_M = x_0 + V_{x_0} t_{\text{прогноза}};$$

$$y_M = y_0 + V_{y_0} t_{\text{прогноза}}.$$

Координаты точки M_1 определяются из совместного решения уравнения траектории и уравнения перпендикуляра MM_1 . Уравнение перпендикуляра MM_1 будет иметь следующий вид:

$$y = -\frac{V_{x_0}}{V_{y_0}} x + y_M + \frac{V_{x_0}}{V_{y_0}} x_M.$$

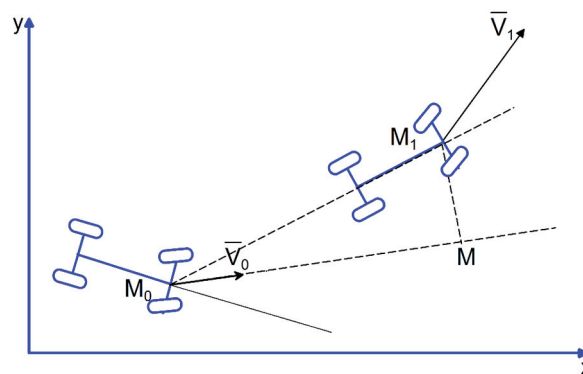


Рис. 2. Схема перемещения колесной машины между двумя точками

Величина поперечного смещения определяется выражением:

$$MM_1 = \sqrt{(x_{M_1} - x_M)^2 + (y_{M_1} - y_M)^2}.$$

Текущее значение необходимого угла поворота управляемых колес определяется по величине бокового отклонения и знаку векторного произведения $\overline{M_0M}$ и $\overline{M_0M_1}$:

$$\alpha = \frac{k MM_1 \text{sign}(\overline{M_0M} \cdot \overline{M_0M_1})}{M_0 M},$$

где k – коэффициент усиления (рекомендованные значения от 0,5 до 1).

Механико-математическая модель колесной машины

Для того чтобы провести испытания разработанных алгоритмов управления локального и глобального регулирования в лабораторных условиях, не прибегая при этом к полевым испытаниям, ранее была получена и апробирована в пакете Matlab механико-математическая модель колесной машины на основе дифференциальных уравнений плоского движения и кинематических соотношений автомобиля.

Полученные уравнения выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_O &= -F_{\text{сопр.А}} \cos(\varphi + \alpha - \partial_A) - F_{\text{бок.А}} \sin(\varphi + \alpha) - \\ & F_{\text{сопр.В}} \cos(\varphi + \alpha - \partial_B) - F_{\text{бок.В}} \sin(\varphi + \alpha) + \\ & + F_{\text{движ.С}} \cos(\varphi - \partial_C) - F_{\text{бок.С}} \sin \varphi + \\ & + F_{\text{движ.Д}} \cos(\varphi - \partial_D) - F_{\text{бок.Д}} \sin \varphi; \\ m\ddot{y}_O &= -F_{\text{сопр.А}} \sin(\varphi + \alpha - \partial_A) + F_{\text{бок.А}} \cos(\varphi + \alpha) - \\ & - F_{\text{сопр.В}} \sin(\varphi + \alpha - \partial_B) + F_{\text{бок.В}} \cos(\varphi + \alpha) + \\ & + F_{\text{движ.С}} \sin(\varphi - \partial_C) - F_{\text{бок.С}} \cos \varphi + \\ & + F_{\text{движ.Д}} \sin(\varphi - \partial_D) - F_{\text{бок.Д}} \cos \varphi; \\ I_O \ddot{\varphi} &= -F_{\text{сопр.А}} \cos(\alpha - \partial_A) \frac{L}{2} - F_{\text{сопр.А}} \sin(\alpha - \partial_A) \times \\ & \times h_a + F_{\text{бок.А}} \cos(\alpha) h_a - F_{\text{бок.А}} \sin(\alpha) \frac{L}{2} + F_{\text{сопр.В}} \cos \times \\ & \times (\alpha - \partial_B) \frac{L}{2} - F_{\text{сопр.В}} \sin(\alpha - \partial_B) h_a + \\ & + F_{\text{бок.В}} \cos(\alpha) h_a + F_{\text{бок.А}} \sin(\alpha) \frac{L}{2} - F_{\text{движ.С}} \cdot \end{aligned}$$

Схема действующих на автомобиль силы, которые участвуют в уравнениях, представлена на рис. 3.

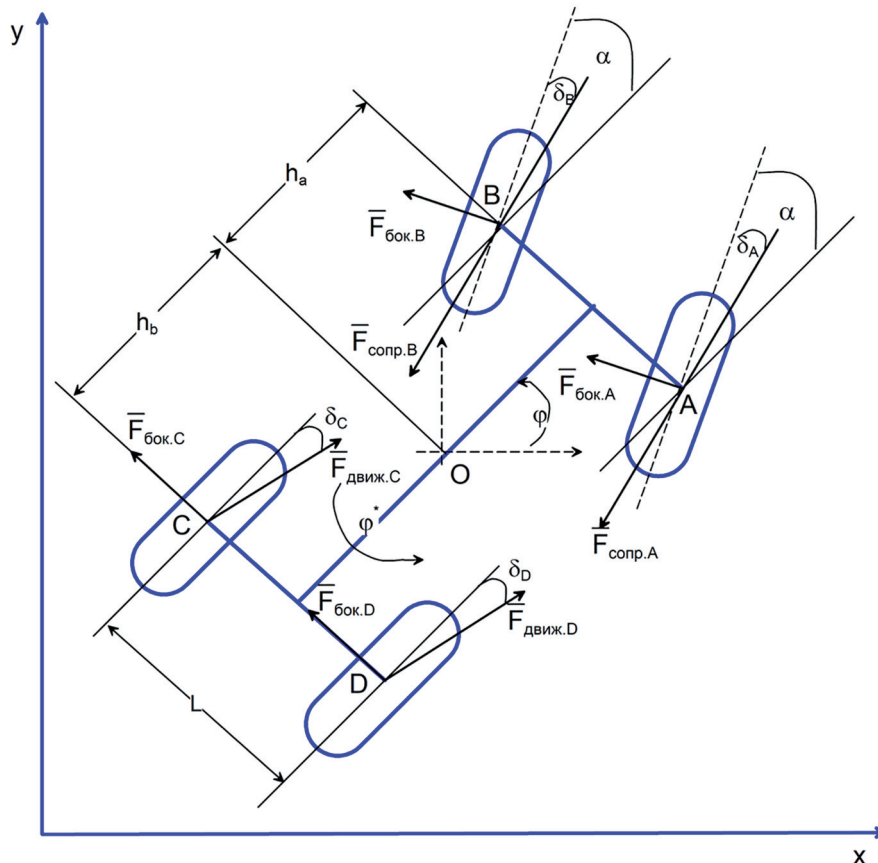


Рис. 3. Силы, действующие на автомобиль

На схеме и в уравнениях используются следующие обозначения:

h_a, h_b – расстояние от передней и задней оси до центра масс;

α – угол поворота управляемых колес;

L – ширина колеи;

$\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}$ – угол поворота продольной оси в горизонтальной плоскости, угловая скорость и ускорение, соответственно;

$\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D$ – углы увода колес;

$\vec{F}_{бок.A}, \vec{F}_{бок.B}, \vec{F}_{бок.C}, \vec{F}_{бок.D}$ – боковые силы;

$\vec{F}_{сопр.A}, \vec{F}_{сопр.B}$ – силы сопротивления;

$\vec{F}_{движ.C}, \vec{F}_{движ.D}$ – движущие силы;

m – масса автомобиля;

I_O – момент инерции автомобиля относительно центра масс.

Полученная модель заменяет реальную колесную машину в виде дифференциальных уравнений движения, а также представляет возможным провести эксперимент без использования навигационного приемника. При интегрировании уравнений в реальном времени система глобального регулирования по отклонениям машины от задаваемой траектории определяет необходимое значение текущего угла поворота управляемых колес, обеспечивающего задаваемое движение.

Испытания на экспериментальном стенде в режиме реального времени

Полученный алгоритм управления движением колесной машины был сначала опробован в среде Matlab [5], а в дальнейшем апробирован на экспериментальном стенде в лабораторных условиях [6]. Для этого на языках программирования C++ и C# была разработано специальное программное обеспечение, обеспечивающее взаимодействие всех аппаратных блоков системы, модулей локального и глобального регулирования, а также реализована механико-математическая модель в режиме реального времени.

Для приближения эксперимента к реальным условиям в механико-математическую модель колесной машины были введены возмущения, действующие со стороны грунта на колеса.

На рис. 4 и 5 представлены комплект экспериментального оборудования и аппарата для проведения испытаний.

На рис. 6 представлены результаты моделирования движения по прямой траектории с временем прогнозирования $t_{\text{прогноза}} = 0,5$ сек., а



Рис. 4. Экспериментальный стенд с комплектом оборудования



Рис. 5. Крепление датчика угла поворота колес

на рис. 7 – по произвольной кривой с режим маневром перестроения с временем прогнозирования $t_{\text{прогноза}} = 0,3$ сек. Скорость движения в обоих случаях составляла 3,33 м/с (12 км/ч), а коэффициент усиления $k = 0,5$.

Выводы

1. Анализируя графики результатов проведенных экспериментов, можно сделать вывод, что рассогласование с задаваемой траекторией для движения по прямой, даже при действии

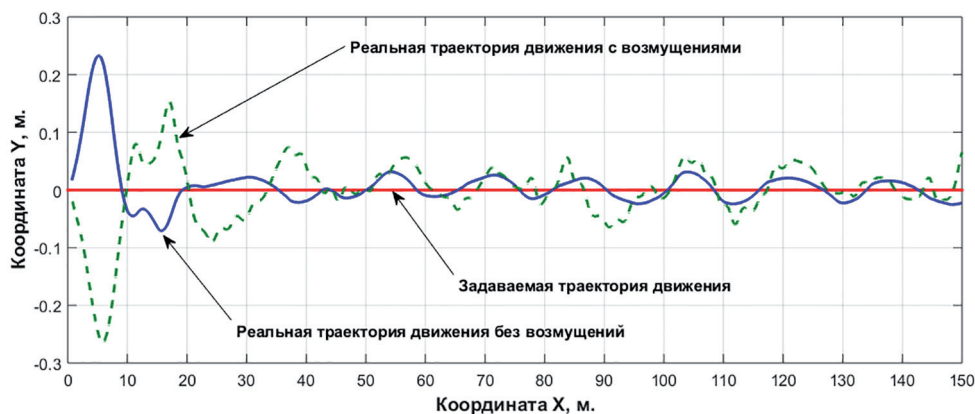


Рис. 6. Результаты моделирования движения по прямой линии

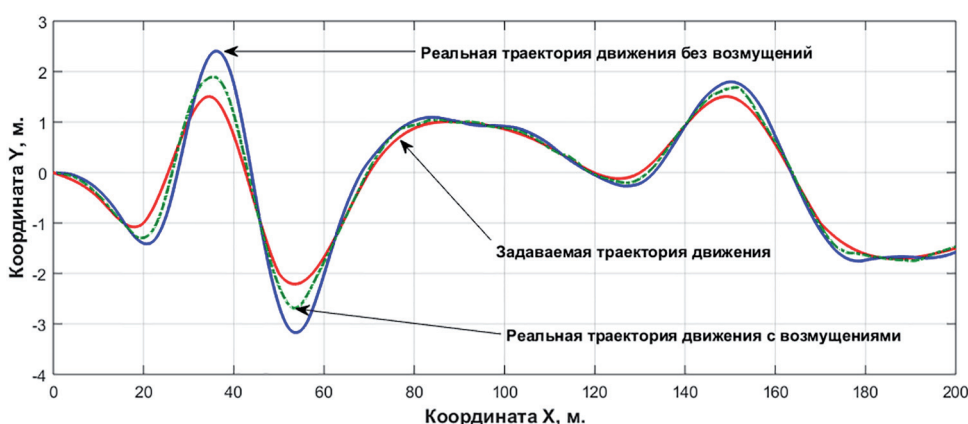


Рис. 7. Результаты моделирования движения по произвольной траектории

возмущений, не превышает 0,1 м (не считая момент старта движения, где эта погрешность объективно выше и лежит в пределах 0,3 м).

2. При движении по криволинейной траектории погрешность возрастает в местах при резком изменении направления движения. При этом, как и в первом случае, возмущения со стороны опорной поверхности не оказывают значительного влияния на отклонения от траектории. При плавных перестроениях погрешность находится в пределах 0,2...0,3 м.

3. Предложенный алгоритм управления обеспечивает движение по задаваемой траектории с достаточной степенью точности. В ближайшей перспективе предполагается апробация разработанного алгоритма управления в реальных полевых условиях с последующим его уточнением.

Литература

1. Березовский, Е., Захаренко А., Полин В. Внедрение технологий точного земледелия: опыт Тимирязевской академии // Аграрное обозрение. 2009. № 4. С. 12–17.
2. Поддубный В.И., Ненайденко А.С., Валекжанин А.И. Разработка ПИД-регулирования для реализации задаваемого закона изменения угла поворота колес сельскохозяйственной машины // Ползуновский вестник. 2017. № 1. С. 63–67.
3. Моделирование динамики автомобилей. Режим доступа: http://www.universalmecanism.com/download/80/rus/gs_um_automotive.pdf (дата обращения 18.01.2018).
4. Павлюк А.С., Поддубный В.И. Теоретические основы управляемого движения колесных машин. Барнаул: Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова, 2010. 239 с.
5. Дьяконов, В.П. Матлаб 6.5+Simulink 4/5. М.: СОЛОН-Пресс, 2002. 768 с.
6. Поддубный В.И., Куприянов С.Е., Шестаков В.Ю. Лабораторные испытания электромеханической системы управления движением колесной сельскохозяйственной машиной // Горизонты образования. 2014. Вып. 16. Тезисы XI всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» – секция «Наземные транспортные машины». 2014 г. http://edu.secna.ru/media/f/transport_sistem_tez_2014.pdf.