

АГРОРОБОТОТЕХНИКА: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

СОЛОВЬЕВ Дмитрий Александрович, Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова

ЖУРАВЛЕВА Лариса Анатольевна, ФГБНУ ВНИИ «Радуга»

В статье рассматриваются инновационные направления развития лесо- и сельскохозяйственной техники с интеллектуальными системами управления. На примере харвестера с многозвенным манипулятором и шагающим ходовым оборудованием рассмотрена кинематика. Представлены системы уравнений, характеризующие пространственное положение рабочего и ходового оборудования, имеющих большое число степеней свободы. Дана оценка существующих проблем и перспектив развития.

Введение. Инновационным направлением развития многих крупных компаний, производящих лесо- и сельскохозяйственную технику, являются проекты, связанные с разработкой интеллектуальных систем управления, агроботов, автономных робот-платформ с различным рабочим оборудованием и установленных на различные ходовые системы.

Многие машиностроительные гиганты задаются целью создания многофункциональных роботов, автономно работающих и управляемых дистанционно за счет применения облачных технологий с использованием специального программного обеспечения.

Применение роботов позволяет внедрять новые высокоэффективные технологии, в которых человек будет избавлен от тяжелого физического труда, работы в опасных условиях, агрессивных средах и т.д. В результате применения роботов может быть достигнута значительная экономия материальных и трудовых ресурсов, повышение производительности и снижение себестоимости продукции.

Основополагающими идеями при разработке робототехнических средств являются и экологические факторы: снижение повреждения почвы, уменьшение выбросов углекислого газа в атмосферу и т.п.

В настоящее время разработанные и внедренные в лесное и сельское хозяйство робототехнические средства очень разнообразны. Например, компания FlierSystems (Нидерланды) представляет на рынке RoBoPlant – робот для высаживания цветов и пересаживания растений [2].

Компания Autonomous Tractor (Северная Дакота) производит модульный роботизированный трактор без кабины управления [3].

Компания Agrobot (Испания) разработала Agrobot SW6010 и AGSHydro – это гидропонная система выращивания и сбора урожая клубники [4], рис. 1.

Компания Wall-Ye (Франция) рекомендует Wall-Ye 1000 mobile-робот для обрезки растений [5].

В компании EcoRobotix (Швейцария) сконструировали легкие автономные роботы для



Рис. 1. Агробот Agrobot SW6010



сельскохозяйственных работ. Это роботизированная платформа для прополки грядок, работает на основе алгоритмов распознавания сорняков, имеет роботизированные руки и беспроводную связь [6].

Компания Amazone-WerkeGmbH, (Германия) выпускает Amazone-BoschBoniRob – легкий полевой робот, предназначенный для прополки и внесения удобрений [7], рис. 2.

Ведущими производителями систем автоматического вождения сельскохозяйственной техники являются JohnDeere (США), AutonomousTractor-Corporation (США), AGCO Corporation (США) и CNHIndustrial (Нидерланды) [9, 10].

Развиваемые в настоящее время интеллектуальные системы управления позволяют в значительной степени расширить технологические возможности машин, недоступные в совсем не далеком прошлом. Так, например, отделом передовых исследований и разработок компании «Timberjack» в 1999 г. был разработан Харвестер Plusjack, рис. 3. В 1990-х гг. машина так и не была отдана в производство. Со временем «Timberjack» преобразовалась в компанию John Deere [8], ставшей лидером в разработке интеллектуальных систем навигации, управления и программного обеспечения техники.

Машина Харвестер Plusjack отличалась сложностью конструкции и системы управления. Однако, наглядно демонстрировала преимущества бесколесной конструкции: могла работать на любых крутых и неровных поверхностях, двигаться в разных направлениях и разворачиваться на месте. При этом машина практически не оставляет следов своего движения на земле.

Несколько позже, дальнейшее развитие автоматизации и программного обеспечения позволило многим компаниям вернуться к подобным конструктивным решениям, в частности шагающим ходовым системам высокой проходимости.

Равномерное и прямолинейное движение корпуса машины обеспечивается при перемещении по поверхности с неровностями, достигающими величины дорожного просвета машины.

Деформация грунта в дискретных зонах воздействия опорных ходовой системы не создает значительных областей разрушения почвы, как непрерывная колея колесных и гусеничных машин. Эти свойства шагающих ходовых систем и определили области их использования как агрегатов для лесохозяйственных и сельскохозяйственных работ.

В настоящее время считается перспективной использование шагающих машин для транспортировки грузов, расчистки завалов, проведения аварийно-спасательных работ в малоосвоенных районах в условиях бездорожья, а также использования в военных целях.

Цель исследования – повышение технического уровня сельско- и лесохозяйственной техники на основе цифровых, интеллектуально-советующих систем управления, автоматизации и роботизации производства.

Методика исследований. Трудности разработки и внедрения подобных конструкций связаны в первую очередь с необходимостью управления большим числом степеней свободы, обеспечивающих требуемые кинематические и динамические параметры.

Обеспечение заданных эксплуатационных свойств подобной техники требует обоснованной и четко работающей системы управления. По функциям, структуре и алгоритмам систему управления можно разбить на три уровня. Роль высшего первого уровня управления обеспечивает оператор, задавая общую цель работы машины, вид выполняемой работы, основные параметры движения машины, такие как направление движения и скорость.

На втором тактическом уровне система управления на основе заданных оператором па-



Рис. 2. Полевой робот Amazone-BoschBoniRob





Рис. 3. Харвестер Plusjack

раметров движения и задач автоматически формирует траекторию движения рабочего и ходового оборудования.

Нижний третий уровень системы управления с помощью следящих систем и датчиков реализует программные траектории отдельных механизмов и обеспечивает обратную связь.

Прогресс в области автоматизации и цифровизации, появление так называемых интеллектуальных систем управления создали базу для разработок и внедрения многих конструктивных решений. К наиболее сложным задачам, решаемым системой управления агроботов, относятся следующие: обзор и переработка информации об окружающей среде и принятие решения на ее основе.

Например, для организации движения машины с шагающей ходовой системой, система управления должна иметь информацию о возможности постановки опор в ту или иную область не только в зависимости от формы поверхности, уклоне, но и в зависимости от ее физических свойств. Система информационного обеспечения машины должны иметь значительную базу данных и уметь отличить вид поверхности, жесткость, безопасность, определить, например, произойдет ли обвал уступа при постановке на него опоры и т.д.

В целом же робот строится как многоцелевая система с избыточностью, т.е. механизм имеет кинематическую схему, содержащую большее число степеней подвижности, чем то, которое

необходимо для выполнения какой-либо работы, что обеспечивает универсальность.

Результаты исследований. На рис. 4 изображена кинематическая схема манипулятора. Обозначим координаты шарниров в соответствии с осями координат x_i, y_i, z_i . Каждый шарнир имеет одну или две угловые степени свободы.

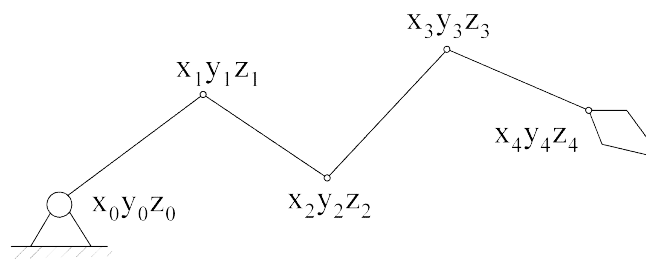


Рис. 4. Кинематическая схема манипулятора

Составим систему алгебраических уравнений с переменными, которые характеризуют пространственное положение шарниров, т.е. координатами шарниров:

$$(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2 = l_i^2, \quad (1)$$

$$i = 0, 1, \dots, n,$$

где l_i – длины соответствующих звеньев манипулятора; n – число звеньев.

В приведенном уравнении число переменных превышает число уравнений связи. Разница между числом переменных n и числом уравнений называется естественной избыточностью системы.



Проблему управления позволяет решить метод избыточных переменных. Если кинематика многозвенного рабочего или ходового оборудования может быть описана конечными уравнениями, то можно определить структуру эквивалентных им дифференциальных уравнений с неопределенными коэффициентами, назначая которые будут заданы разные движения системы.

Конструктивно, манипулятор можно представить из звеньев, длина которых L_i ($i = 1, 2, 3, 4$) изменяется (снабжены гидроцилиндрами), и из звеньев, длина которых a_i , b_i не изменяется. Задавая в качестве изменяемых координат углы α_i , выразим с помощью уравнений Пфаффа:

$$2L_i dL_i + 2a_i b_i \sin \alpha_i d\alpha_i = 0, i = 1, \dots, 4. \quad (2)$$

Координаты области работы манипулятора (т. С, рис. 5) можно представить с помощью уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x_c &= l_1 \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 + l_2 \sin \beta_1 \sin \beta_2 + l_3 \sin \gamma_1 \sin \gamma_2; \\ y_c &= l_1 \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 + l_2 \sin \beta_1 \cos \beta_2 + l_3 \sin \gamma_1 \cos \gamma_2; \\ z_c &= l_1 \cos \alpha_1 + l_2 \cos \beta_2 + l_3 \cos \gamma_1; \end{aligned} \right\} (3)$$

где $\beta_1 = \alpha_1 + \beta_1'$; $\beta_2 = \alpha_2 + \alpha_3$; $\gamma_1 = \alpha_1 + \beta_1'' + \alpha_4$; $\gamma_2 = \alpha_1 + \alpha_3 + \gamma_2''$; $\beta_1' = \text{const}$; $\beta_1'' = \text{const}$; $\gamma_2'' = \text{const}$; $l_1 = \text{const}$; $l_2 = \text{const}$; $l_3 = \text{const}$.

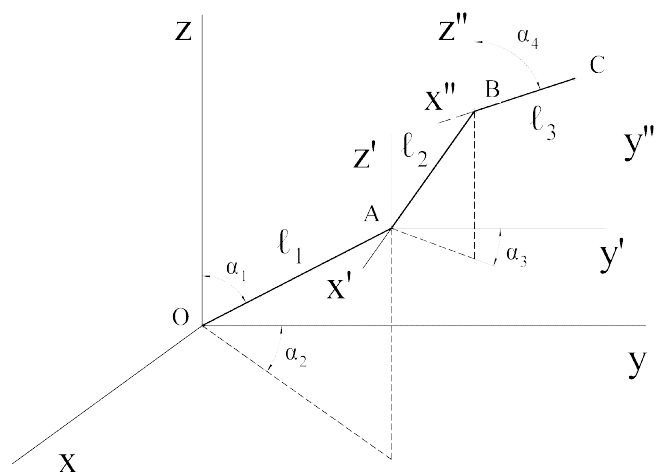


Рис. 5. Расчетная схема манипулятора

После дифференцирования системы уравнений (3) получим уравнения Пфаффа [1]. Задавая скорость шарнира крепления захвата манипулятора (т. С), можно выразить:

$$\sum_{i=1}^4 Q_{ij} da_i - \varphi_j dt = 0, j = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где Q_{ij} – функция α_i ($i = 1, 2, 3, 4$).

Рассмотрим шагающую ходовую систему. Представим ее как кинематическую схему с шестью многозвенными опорами, рис. 6. Если число степеней подвижности многозвенной опоры

равно n , дифференциальные уравнения, описывающие ее движение примут вид:

$$F_j(x_1, \dots, x_n) = 0, j = 1, 2, \dots, m, n \geq m, \quad (5)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_5, t) \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

Принимаемые конструктивные параметры ходовой системы будут ограничиваться общими геометрическими размерами механизма, платформы крепления рабочего оборудования и др.

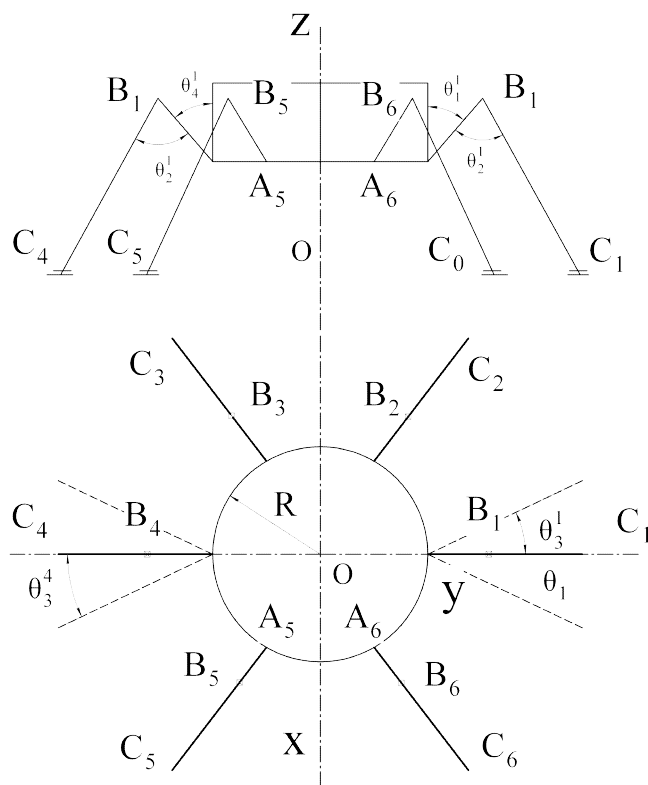


Рис. 6. Расчетная схема манипулятора

С помощью конечных алгебраических уравнений опишем кинематику ходового оборудования. Точки A_i ($i = 1 \dots 6$) – это шарниры крепления звеньев ходового оборудования к платформе. В этих точках имеются две степени свободы – углы θ_1^i и θ_3^i .

В точках B_i ($i = 1 \dots 6$) помещаются третьи шарниры звеньев с одной степенью подвижности с углами θ_2^i ($i = 1, \dots, 6$). Отрезки $A_i B_i = l_1$, $B_i C_i = l_2$ постоянные и одинаковые для всех звеньев.

Определим координаты конечных точек звеньев ходовой системы через углы $\theta_1^i, \theta_2^i, \theta_3^i$. Радиус платформы машины равен R .

Уравнение движения ходовой системы имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} x_{ci} &= x_{Ai} + k_i' [l_1 \sin \theta_1^i + l_2 \sin(\theta_2^i - \theta_1^i)] \sin \theta_3^i, \\ y_{ci} &= y_{Ai} + k_i'' [l_1 \sin \theta_1^i + l_2 \sin(\theta_2^i - \theta_1^i)] \cos \theta_3^i, \\ z_{ci} &= z_{Ai} + l_1 \cos \theta_1^i + l_2 \cos(\theta_2^i - \theta_1^i) \end{aligned} \right\} (7)$$

где коэффициенты k_i' и k_i'' учитывают разницу в расположении шарнира звена ходовой системы.



Учитывая уравнения платформы:

$$\left. \begin{aligned} (x_{A1} - x_{A2})^2 + (y_{A1} - y_{A2})^2 + (z_{A1} - z_{A2})^2 &= R^2, \\ &\dots \\ (x_{A6} - x_{A1})^2 + (y_{A6} - y_{A1})^2 + (z_{A6} - z_{A1})^2 &= R^2, \\ (x_{Ai} - x_0)^2 + (y_{Ai} - y_0)^2 + (z_{Ai} - z_0)^2 &= R^2, \\ ax_{Ai} + by_{Ai} + cz_{Ai} + d, \quad i &= 1, 2, \dots, 6, \end{aligned} \right\} (8)$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты центра платформы; a, b, c, d – параметры плоскости платформы.

Заключение. Задавая координаты этих точек и параметры плоскости можно полностью определить положение платформы. Используя системы уравнений (7) и (8), можно также построить и систему дифференциальных уравнений с неопределенными коэффициентами для построения алгоритмов управления исполнительными приводами шарниров $\theta_1^i, \theta_2^i, \theta_3^i$ ($i = 1, \dots, 6$) с учетом параметров движения платформы, варианта движения и рельефа местности.

Максимальное количество уравнений, описывающих систему составляет 18 с 22 переменными. Если при определении координат x_0, y_0, z_0 учитывать функцию времени, то будем иметь систему с 19 переменными ($\theta_1^i, \theta_2^i, \theta_3^i$ и время t).

Для обеспечения надежности следует планировать несколько вариантов обеспечения движения, и при выходе из строя шарниров или звеньев перестроить алгоритм за счет использования возможностей гибких структур с избыточностью.

Автоматизация и роботизация агропромышленного комплекса – мировой тренд, который с каждым годом набирает обороты. Развитие агроробототехники будет во многом зависеть от объединения разных направлений науки, ее смежных отраслей: науки о материалах, компьютерной техники, электроники, инженерии и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боярчук А.К., Головач Г.П. Дифференциальные уравнения в примерах и задачах: справочное пособие по высшей математике. Т. 5. – 2001. – Режим доступа: <https://obuchalka.org/>.
2. Официальный сайт компании FlierSystems. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso-group.nl/en/>, свободный. (20.04.2020).
3. Официальный сайт компании AutonomousTractor. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autonomoustractor.com/>, свободный. (20.04.2020).
4. Официальный сайт компании Agrobot. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.agrobot.com/>, свободный. (20.04.2020).
5. Официальный сайт компании Wall-Ye [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://wall-ye.com/>, свободный. (20.04.2020).
6. Официальный сайт компании EcoRobotix [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ecorobotix.com/en/>, свободный. (20.04.2020).
7. Официальный сайт компании Amazone-Werke-Gmbh [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://info.amazone.de/frontend.aspx>, свободный. (20.04.2020).
8. Официальный сайт компании JohnDeere [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.deere.com/en/index.html>, свободный. (20.04.2020).
9. Труфляк Е.В. Основные элементы системы точного земледелия. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – 39 с.
10. Труфляк Е.В. Системы параллельного вождения. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – 72 с.

Соловьев Дмитрий Александрович, *д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины»*, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.

410056, г. Саратов, ул. Советская, 60.
Тел.: (74-96-63).

Журавлева Лариса Анатольевна, *д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник*, ФГБНУ ВНИИ «Радуга», Россия.

140483, Московская обл., Коломенский городской округ, пос. Радужный.
Тел.: 89173299812; e-mail: dfz@yandex.ru.

Ключевые слова: агроробот; манипулятор; шагающая ходовая система; звенья; шарниры.

AGROPROMTEHNIKA: PROBLEMS AND PROSPECTS

Soloviev Dmitry Aleksandrovich, *Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the chair “Technosphere Safety and Transport-technological Machines”, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.*

Zhuravleva Larisa Anatolyevna, *Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply Systems “Raduga”. Russia.*

Keywords: agrobot; manipulator; walkingrunningsystem; links; hinges.

The article considers innovative directions of development of forest and agricultural machinery with intelligent control systems. The kinematics is considered on the example of a harvester with a multi-link manipulator and walking running equipment. Systems of equations describing the spatial position of working and running equipment with a large number of degrees of freedom are presented. The assessment of existing problems and development prospects is given.

