ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. АГРОИНЖЕНЕРИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-42

DEVELOPMENT OF METHODS FOR AUTOMATIC CONTROL OF MANIPULATOR DRIVES OF MOBILE ROBOT-WEEDER WITH PARALLEL-SERIAL STRUCTURE

A. G. Ivanov¹, N. S. Vorob'yeva¹, V. V. Zhoga^{2,3},
V.E. Pavlovsky⁴, E. V. Pavlovsky⁴

¹Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia

²Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

³Center for Technologies in Robotics and Mechatronics Components, Innopolis University,
Innopolis, Russia

⁴Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences), Moscow, Russia.

Received 13.08.2020

Submitted 25.10.2020

The article was prepared with the financial support of RFBR grant no. 19-48-340013 r_a.19-31-50031 mol_nr.

Summary

The article presents the results of calculating the program movement of the working part of the robot - weeder from the starting point to the specified end point for a certain time. The results of mathematical modeling confirmed the efficiency of the proposed algorithm for controlling the actuators of the manipulation mechanism. The algorithm works perfectly even in the presence of initial perturbations.

Abstract

Introduction. The article considers the development of a control algorithm for the actuating links of a manipulator with a parallel-serial structure. **Object.** The calculation scheme of the mechanism of movement of the working part of the mobile robot-weeder is presented. **Materials and methods.** The authors suggest a two-stage procedure for resolving the problem of controlling the robot operating part motion into a set neighborhood of the final state for a set time. The first stage covers the process of solving the problem of defining the manipulator generalized coordinates at the set coordinates of the operating part. The problem solution is of an optimization nature. The second stage proceeds with the resolving of the problem of defining the laws of the setting action formation for the actuating drives responsible for the operating part motion in the set point neighborhood. The programmed path correction is done in such a way that at any specific time it moves through a set position of the operating part while the deviations from the final state of actuating links change according to the solution of the formed differential equation. **Results and conclusions.** A kinematic algorithm for manipulator position stabilization in a given final state is synthesized. The control efforts change laws are obtained. The results of numerical modeling confirming the efficiency of the proposed algorithm on the example of a specific manipulator are presented. Mathematical modeling showed that the proposed algorithm allows the manipulator grip motion along the program path with an error not exceeding 1%. The algorithm also functions properly in the presence of initial disturbances.

Key words: robot-weeder, manipulator with a parallel-spatial structure, positioning, control system, mathematical model of dynamics.

Citation. Ivanov A. G., Vorob'yeva N. S., Zhoga V. V., Pavlovsky V.E., Pavlovsky E. V. Development of methods for automatic control of manipulator drives of mobile robot-weeder with parallel-serial structure. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2020. 4(60). 449-459. (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-42.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 621.865.8:631.316.43

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА-ПРОПОЛЬЩИКА

А. Г. Иванов¹, ассистент

Н. С. Воробьева¹, кандидат технических наук, доцент

В. В. Жога^{2,3}, доктор физико-математических наук, профессор

В. Е. Павловский⁴, доктор физико-математических наук, профессор

Е. В. Павловский⁴, старший программист

¹Волгоградский государственный аграрный университет, г. Волгоград

²Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

³Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Университет Иннополис,
г. Иннополис, республика Татарстан

⁴Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва

Дата поступления в редакцию 13.08.2020

Дата принятия к печати 25.10.2020

*Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта
РФФИ № 19-48-340013 р_а, 19-31-50031 мол_нр.*

Актуальность. Статья посвящена разработке алгоритма управления исполнительными звеньями манипуляционного механизма параллельно-последовательной структуры мобильного робота-пропольщика. **Объект.** Представлена расчетная схема механизма перемещения рабочего органа мобильного робота-пропольщика. **Материалы и методы.** Предлагается двухэтапная процедура решения задачи управления перемещением рабочего органа робота в заданную окрестность конечного состояния за заданное время. Сначала решается задача определения обобщенных координат манипулятора при заданных координатах рабочего органа. Решение этой задачи носит оптимизационный характер. Затем решается задача определения законов формирования задающих воздействий для исполнительных приводов, обеспечивающих перемещение рабочего органа в окрестность заданной точки. Коррекция программной траектории производится таким образом, чтобы в каждый момент времени она проходила через заданное положение рабочего органа и отклонения от конечного состояния исполнительных звеньев изменялись в соответствии с решением сформированного дифференциального уравнения. **Результаты и выводы.** Синтезирован кинематический алгоритм перемещения рабочего органа манипулятора в заданное положение. Получены законы изменения управляющих усилий. Приводятся результаты численного моделирования, подтверждающие работоспособность предложенного алгоритма на примере конкретного манипулятора. В результате расчета выявлено, что ошибка позиционирования рабочего органа по разработанному алгоритму не превышает 1 %. Наличие начальных возмущений не оказывает влияние на работу разработанного алгоритма.

Ключевые слова: роботы-пропольщики, манипуляторы параллельно-пространственной структуры, система управления манипуляторами.

Цитирование. Иванов А. Г., Воробьева Н. С., Жога В. В., Павловский В. Е., Павловский Е. В. Синтез алгоритма управления приводами манипулятора параллельно-последовательной структуры мобильного робота-пропольщика. *Известия НВ АУК.* 2020. 4(60). 449-459. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-42.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. В сельскохозяйственном производстве одной из сложных операций является борьба с сорняками [7, 8]. Как правило, борьба с сорняками на открытом грунте

Робот функционирует следующим образом. С помощью системы контроля и управления робот движется по рядкам с растениями. При движении датчик компьютерного зрения обнаруживает сорную растительность и определяет их координаты. Бортовой компьютер составляет карту сорняков и строит маршрут перемещения рабочего органа. После чего рабочий орган перемещается между сорняками, срезая их и взрывляя почву рядом с ними.

Figure 1 – Mobile weeding robot

Figure 2 – The design scheme of the mechanism for moving the working body of the weeding robot. Top view

Материалы и методы. Для реализации описанной технологии необходимо разработать алгоритмы формирования системы управления передвижения рабочего органа мобильного робота-пропольщика. Система управления должна обеспечивать перемещение

рабочего органа в заданную точку рабочей зоны с необходимой точностью. Рассматриваются перемещения манипулятора в горизонтальной плоскости. Требования к перемещениям определяются технологией выполняемой операции: параметрами мобильности, приемистости, погрешностью позиционирования рабочего органа и временем выполнения операции. Обобщенными координатами манипуляционного механизма являются длины линейных приводов $q_1 = l_1(t)$, $q_2 = l_2(t)$, $q_3 = l_3(t)$. Перемещение рабочего органа из известного начального положения [1] с координатами (x_{40}, y_{40}) в заданное конечное положение (x_4, y_4) обеспечивается изменением длин $l_i(t)$, $(i = 1 \div 3)$ исполнительных звеньев манипулятора [10]. Задача решается в два этапа. Сначала решается задача позиционирования: для заданных конечных координат (x_4, y_4) точки крепления вертикального актуатора (рисунок 2) требуется найти обобщенные координаты манипулятора l_i^{op} , $(i = 1 \div 3)$. Поскольку количество декартовых координат точки крепления исполнительного механизма равно двум, а количество обобщенных координат манипуляционного механизма равно трем, маневренность манипуляционного механизма равна единице. То есть конечному положению актуатора с рабочим органом соответствует бесконечное множество конфигураций манипулятора. Таким образом, решение этой задачи носит оптимизационный характер.

На втором этапе необходимо определить законы изменения обобщенных координат манипулятора $l_i(t)$, $(i = 1 \div 3)$ при перемещении точки крепления рабочего органа из начальной в окрестность назначенной точки. В качестве управляющих параметров принимаем ускорения изменения обобщенных координат $\ddot{l}_i(t)$, $(i = 1 \div 3)$.

Конструкция манипулятора обеспечивает голономные связи между координатами точки $O_4(x_4, y_4)$, длинами исполнительных звеньев и геометрическими параметрами манипулятора:

$$l_2 = \sqrt{(y_4 - l_1)^2 + (AC + x_4)^2}, \quad l_3 = \sqrt{(y_4 - l_1)^2 + (BC - x_4)^2}. \quad (1)$$

Конфигурация манипулятора определяется из условия минимума квадратичной функции - критерия обобщенной энергии:

$$\Phi = c_1 \cdot \Delta l_1^2 + c_2 \cdot \Delta l_2^2 + c_3 \cdot \Delta l_3^2,$$

с ограничениями в виде неравенств:

$$l_{i\min} \leq l_i^{op} \leq l_{i\max}, \quad (2)$$

где $\Delta l_1 = (l_{1k} - l_{10})$, $\Delta l_2 = \sqrt{(y_4 - l_{1k})^2 + (AC + x_4)^2} - \sqrt{(y_{40} - l_{10})^2 + (AC + x_{40})^2}$, $\Delta l_3 = \sqrt{(y_4 - l_{1k})^2 + (BC - x_4)^2} - \sqrt{(y_{40} - l_{10})^2 + (BC - x_{40})^2}$ – изменения длин исполнительных звеньев; начальная конфигурация манипулятора l_{i0} , $(i = 1 \div 3)$; c_1, c_2, c_3 – весовые коэффициенты, значения которых пропорциональны нагрузкам на исполнительные звенья; $l_{i\min}, l_{i\max}$ – минимальное и максимальное допустимые значения длин исполнительных звеньев манипулятора (рисунок 2); l_i^{op} – оптимальное значение длины.

В процессе работы манипуляционного механизма, выбирая значения весовых коэффициентов, можно получить наиболее благоприятное значение критерия. В приве-

денном ниже примере расчета весовые коэффициенты приняты равными единице.

Целевая функция Лагранжа имеет вид:

$$\Phi^* = \sum_{i=1}^3 c_i (l_{ik} - l_{i0})^2 + \lambda_{2i-1} (u_{2i-1}^2 + l_i - l_{2i-1, \max}) + \lambda_{2i} (u_{2i}^2 + l_{i \min} - l_i), \quad (3)$$

где u_i^2 – вспомогательные функции; λ_i – множители Лагранжа.

Необходимые условия экстремума функции (3) записываются в форме:

$$\frac{\partial \Phi^*}{\partial l_i} = c_1 \frac{\partial (l_{1i} - l_{10})^2}{\partial l_i} + c_2 \frac{\partial (l_{2i} - l_{20})^2}{\partial l_i} + c_3 \frac{\partial (l_{3i} - l_{30})^2}{\partial l_i} + \lambda_1 - \lambda_2 = 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{2i-1} &= 0, \text{ при } l_i^{op} < l_{i \max}; \lambda_{2i} = 0, \text{ при } l_i^{op} > l_{i \min}, \\ \lambda_{2i-1} &> 0, \text{ при } l_i^{op} = l_{i \max}; \lambda_{2i} > 0, \text{ при } l_i^{op} = l_{i \min} \end{aligned} \quad (5)$$

Так как функция Лагранжа (3) выпуклая, а множители $\lambda_{2i-1} \geq 0$, $\lambda_{2i} \geq 0$, то необходимые условия (4), (5) являются достаточными.

Так как манипулятор обладает большой жесткостью, то декартовые координаты точки крепления актуатора с рабочим органом определяются через длины исполнительных звеньев с большой точностью:

$$x_4 = \frac{l_3^2 - l_2^2}{4AC}, \quad y_4 = l_1 + \sqrt{l_2^2 - \left(\frac{l_3^2 - l_2^2}{4AC} \right)^2 + \frac{l_3^2 - l_2^2}{2} - AC^2}. \quad (6)$$

Ниже излагается метод синтеза алгоритма системы управления для законов изменения длин исполнительных звеньев [2, 11, 12].

Требования по точности управления предъявляются только к конечной точке, не накладывая ограничений на траекторию перемещения характерной точки, которая может изменяться в процессе перемещения рабочего органа из-за внешних возмущений. Считаем, что для каждого исполнительного звена известны контуры управления, замкнутые по обобщенным координатам $l_i(t)$, $i = 1 - 3$. В этом случае решение задачи сводится к определению законов формирования задающих воздействий $l_i(t)$ для исполнительных приводов, обеспечивающих перемещение рабочего органа в окрестность заданной точки на плоскости, которой соответствуют длины исполнительных звеньев $l_i(\tau) = l_i^{op}$, $i = 1 - 3$. Принимаем, что на траектории движения [3] отклонения от конечного состояния исполнительных звеньев $\Delta l_i(t) = l_i^{op} - l_i(t)$ изменяются в соответствии с решением дифференциального уравнения:

$$\Delta \ddot{l}_i(t) + a_{1i} \Delta \dot{l}_i(t) + a_{2i} \Delta l_i(t) = 0, \quad (7)$$

где a_{1i} , a_{2i} – постоянные положительные числа.

Законам формирования задающих воздействий $l_k(t)$ исполнительных приводов, определяемых уравнениями (7), соответствуют дифференциальные уравнения:

$$\ddot{l}_i(t) + a_{i1} \dot{l}_i(t) + a_{i2} l_i(t) = a_{i2} l_i^{op}, \quad (8)$$

при начальных условиях, описывающих состояние манипулятора при $t_0 = 0$:

$$l_i(0) = l_{i0}, \quad \dot{l}_i(0) = \dot{l}_{i0}. \quad (9)$$

Общее решение уравнения (8) имеет вид:

$$l_i(t) = l_i^0 + C_{1i}e^{p_{1i}t} + C_{2i}e^{p_{2i}t}, \quad (10)$$

где корни p_{1i}, p_{2i} – корни соответствующего характеристического однородного уравнения.

Постоянные интегрирования находим из (8) с учетом (9):

$$C_{1i} = \frac{\Delta l_i(0)p_{2i} + \dot{l}_{i0}}{(p_{1i} - p_{2i})}, \quad C_{2i} = -\frac{\Delta l_i(0)p_{1i} + \dot{l}_{i0}}{(p_{1i} - p_{2i})}, \quad \Delta l_i(0) = l_i^{op} - l_i(0). \quad (11)$$

Коэффициенты уравнений (8) определяются через корни характеристического уравнения:

$$a_{1i} = -(p_{1i} + p_{2i}), \quad a_{2i} = p_{1i}p_{2i}.$$

Для обеспечения требования $l_i(t) \rightarrow l_i^{op}$ при $t \rightarrow \infty$ корни характеристического уравнения отрицательные разные. Значения корней характеристического уравнения следует выбирать из допустимых параметров мобильности манипулятора (предельно допустимые скорости перемещения захвата в рабочей зоне) и требуемого времени τ попадания в назначенную точку с необходимой погрешностью.

Закон изменения длин исполнительных звеньев (10) является программным. Чтобы построить закон управления с обратными связями, необходимо вычислять требуемое ускорение по текущим значениям обобщенных координат:

$$\ddot{l}_i(t) = a_{i2}l_i^{op} - a_{i1}\dot{l}_i(t) - a_{i2}l_i(t). \quad (12)$$

Таким образом, в выражениях (11) необходимо считать текущие значения обобщенных координат – начальными. Обратная связь в контурах управления приводными двигателями осуществляется по переменным $l_i(t), \dot{l}_i(t)$. Значения этих переменных используются при вычислении выражений, входящих в выражение (12). На рисунке 3 приведена структурная схема системы управления.

Рисунок 3 – Структурная схема системы управления

Figure 3 – Control system structural diagram

Основные архитектурные особенности системы управления обусловлены механической конструкцией робота, характером программных движений и кругом решаемых задач.

Функционально система управления может быть разделена на два уровня. Верхний уровень обеспечивает общее планирование движения, обработку показаний прием-

ника GPS и навигацию, связь с пультом удаленного управления и телеметрии по протоколу Wi-Fi, реализует систему технического зрения.

В основу верхнего уровня положен микрокомпьютер Raspberry Pi 3 Model B. Этот микрокомпьютер основан на процессоре Broadcom BCM2837 с четыре 64-битными ядрами ARM Cortex A-53, работающими на частоте 1.2 ГГц, имеет 1 Гб оперативной памяти, порты USB, RS-232, I2C и GPIO, встроенный блок Wi-Fi. Использование в системе управления полноценного микрокомпьютера вместо микроконтроллера позволяет реализацию достаточно сложных алгоритмов управления, поддержку WiFi и построение системы технического зрения. В то же время Raspberry Pi отличается низким энергопотреблением, что существенно в автономном мобильном роботе, и невысокой ценой при достаточной производительности.

Нижний уровень системы управления обеспечивает непосредственное управление исполнительными механизмами робота-пропольщика.

Исполнительные механизмы робота-пропольщика разделены на две группы (рисунок 4). Первую составляют линейные актуаторы, используемые в конструкции манипулятора, а вторую – серводвигатели, обеспечивающие горизонтальное перемещение робота.

Исходя из различных предназначений исполнительных механизмов выбраны разные виды обратной связи. Для двух ходовых степеней свободы используется обратная связь на оптических энкодерах, позволяющая реализовать одометрическую навигацию в дополнение к GPS для повышения точности движения. Для четырех приводов манипулятора выбрана обратная связь на потенциометрах. Это решение обусловлено тем, что инкрементные оптические энкодеры измеряют относительные приращения, но не позволяют сразу узнать абсолютное положение; это оптимально для ходовых приводов, но неприемлемо для манипулятора, который необходимо контролировать именно по абсолютному положению.

Рисунок 4 – Функциональная схема системы управления

Figure 4 – Functional diagram of the control system

Управление исполнительными механизмами построено на двух однотипных че-

тырехканальных контроллерах приводов. Каждый из контроллеров построен на двух микроконтроллерах Microchip PIC16F73, имеющих по два генератора ШИМ для управления двигателями. Обратная связь реализована на четырех микросхемах Avago HCTL-2017 счетчиков для оптических квадратурных энкодеров. Таким образом, каждый контроллер обеспечивает четыре полных канала управления приводами с обратной связью. Кроме этого, каждый контроллер имеет восемь линий GPIO (цифрового ввода-вывода общего назначения) и пять линий аналогового ввода; с их помощью реализуется обратная связь приводов на потенциометрах, а не на оптических энкодерах.

Рисунок 5 – Блок управления приводами

Figure 5 – Drive control unit

Для подключения контроллеров к управляющему компьютеру используется шина собственной разработки, основанная на RS-232, но отличающаяся электрически и использующая дополнительный протокол [4, 6].

Блок управления приводами показан на рисунке 5, контроллеры управления – это две верхние платы. Нижняя плата – четырехканальный силовой ключ, регулирующий напряжения и токи двигателей в соответствии с поступающими от контроллера сигналами направления и ШИМ цифрового уровня.

Сенсорная система состоит из двух основных компонент: одна жестко привязана к исполнительным устройствам, а вторая, выполняющая большую часть функций глобальной навигации и пространственной ориентации, а также технического зрения и связана с блоком управления верхнего уровня.

Программы верхнего уровня включают следующие основные модули: систему навигации, опрашивающую приемник GPS и объединяющую данные GPS и одометрических датчиков; систему технического зрения; систему управления манипулятором, реализующую описанные в работе алгоритмы для точного позиционирования рабочего органа; систему управления движением; систему планирования верхнего уровня.

Результаты и обсуждение. Численный пример реализации алгоритма управления. В начальный момент времени рабочий орган манипулятора находился в точке с

координатами $x_{40} = -90\text{ мм}$, $y_{40} = 350\text{ мм}$. Расстояние между осями точек крепления актуаторов $AC = BC = 140\text{ мм}$. Этим координатам соответствуют длины исполнительных звеньев $l_{10} = 0\text{ мм}$, $l_{20} = 355$, $l_{30} = 419\text{ мм}$. Задав координаты конечной точки $x_4 = 110\text{ мм}$, $y_4 = 510\text{ мм}$ в результате применения алгоритма позиционирования получили $l_1^{op} = l_1^0 = 106,5\text{ мм}$, $l_2^{op} = l_2^0 = 466\text{ мм}$, $l_3^{op} = l_3^0 = 395\text{ мм}$.

На рисунках. 5, 6 приведены результаты расчетов при перемещении рабочего органа из положения, определяемого координатами, $x_{40} = -90\text{ мм}$, $y_{40} = 350\text{ мм}$ в точку с координатами $x_4 = 110\text{ мм}$, $y_4 = 510\text{ мм}$ по законам (10): начальная скорость $\dot{l}_{i0} = 0$;

$$l_i(t) = l_i^0 + \frac{\Delta l_{i0}}{p_{1i} - p_{2i}} \left(p_{2i} e^{p_{1i} t} - p_{1i} e^{p_{2i} t} \right), \quad \Delta l_i(t) = l_i^0 - l_{i0}, \quad p_{1i} = -12, \quad p_{2i} = -20$$

$$\Delta l_{10} = 106,5\text{ мм}, \quad \Delta l_{20} = -11\text{ мм}, \quad \Delta l_{30} = -24\text{ мм}.$$

Рисунок 5 – Законы изменения скоростей исполнительных

Figure 5 – The laws of change in executive speeds

Рисунок 6 – Законы изменения программных усилий приводов исполнительных приводов

Figure 6 – Laws of change of software efforts of drives of actuators

Из графиков (рисунки 5, 6) видно, что в течение $\tau = 0.5\text{ с}$ захватное устройство стабилизируется в заданном положении. Отклонения от заданного положения не превышающие 0,1 %, а скорости и ускорения практически равны нулю. Траектория точки незначительно отличается от прямой. Программную траекторию при отклонении обобщённых координат манипулятора не имеет смысла стабилизировать, так как в любой текущий момент времени происходит построение новой программной траектории, которая соответствует конечной точке [5]. На рисунке 6 представлены законы изменения движущих сил, полученные в результате решения уравнений (6-10) [9].

Выводы. Решена задача позиционирования манипулятора и задача слабого терминального управления. Коррекция программной траектории производится таким образом, чтобы в каждый момент времени она проходила через текущее положение рабочего органа. С течением времени рабочий орган попадает в конечную область целевой точки. С помощью кинематических параметров манипулятора, строится алгоритм управляющих напряжений. В результате расчета выявлено, что ошибка позиционирования рабочего органа по разработанному алгоритму не превышает 1 %. Наличие начальных возмущений не оказывает влияния на работу разработанного алгоритма.

Библиографический список

1. Воробьева Н. С., Жога В. В., Несмиянов И. А. Отслеживание приводами манипулятора параллельно-последовательной структуры программных перемещений рабочего органа // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 2. С. 154-165.
2. Добриборщ Д., Колюбин С. А. Адаптивное управление роботом манипулятором с параллельной кинематической схемой // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. № 9(60). С. 850-857.
3. Колюбин С. А., Заводовский О. Д. Энергоэффективное траекторное управление манипуляторами с избыточным числом степеней свободы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. № 2(61). С. 141-147.
4. Павловский В. Е., Павловский В. В. Модульная микроконтроллерная система управления роботами РОБОКОН-1 // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2012. № 86. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-86>.
5. Распределенная система управления погрузочным манипулятором параллельно-последовательной структуры / И. А. Несмиянов [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2017. № 1(45). С. 260-266.
6. Система управления манипулятора сельскохозяйственного назначения / И. А. Несмиянов [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2014. № 3(35). С. 226-231.
7. Agbots: Weeding a field with a team of autonomous robots / W. McAllister, D. Osipychev, A. Davis, G. Chowdhary // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. V. 163. № 104827.
8. Crop and Weeds Classification for Precision Agriculture Using Context-Independent PixelWise Segmentation / M. Fawakherji, A. Youssef, D. Bloisi, A. Pretto, D. Nardi // Proceedings - 3rd IEEE International Conference on Robotic Computing, IRC. 2019. № 8675654. P. 146-152.
9. Dynamic model of end-effector actuator used for mobile robotic weeder / A. G. Ivanov, V. V. Zhoga, V. E. Pavlovsky, N. S. Vorob'yeva // International Conference of Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering" (ToPME-2019). Moscow, 2019.
10. On the unstable operating modes of manipulator electric drives / I. A. Nesmiyanov, V. V. Zhoga, V. N. Skakunov, N. S. Vorob'eva, V. V. Dyashkin-Titov, V. S. Bocharnikov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. V. 46 (3). P. 232-239.
11. Robotic weed control using automated weed and crop classification / X. Wu, S. Aravecchia, Ph. Lottes, C. Stachniss, C. Pradalier. 2020. fhal-02484462f.
12. Steward B., Jingyao G., Lie T. The use of agricultural robots in weed management and control // Robotics and automation for improving agriculture, edited by John Billingsley. Volume 44 of Burleigh Dodds Series in Agricultural Science Series. Cambridge, UK: Burleigh Dodds Science Publishing, 2019.

Conclusion. Solutions to the positioning task of the manipulator and the problem of weak terminal control. Thus, at each moment of time, it passes through the current position of the working body. The working body falls into the final area. Using the kinematic parameters of the manipulator, an algorithm of control stresses is constructed. As a result of the calculation, it was revealed that the positioning error of the working body according to the developed algorithm does not exceed 1%. The presence of initial disturbances does not affect the operation of the developed algorithm.

Reference

1. Vorobyova N. S., Zhoga V. V., Nesmiyanov I. A. Tracking by manipulator drives of the parallel-sequential structure of program movements of the working body // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems. 2019. № 2. P. 154-165.
2. Dobriborsch D., Kolyubin S. A. Adaptive control of a robot by a manipulator with a parallel kinematic scheme // Izvestiya of higher educational institutions. Instrumentation. 2017. No. 9 (60). P. 850-857.

3. Kolyubin S. A., Zavadovsky O. D. Energy-efficient trajectory control of manipulators with an excessive number of degrees of freedom // Izvestiya of higher educational institutions. Instrumentation. 2018. № 2(61). P. 141-147.
4. Pavlovsky V. E., Pavlovsky V. V. Modular microcontroller robot control system RO-BOCON-1 // Preprints of the Institute of Applied Mathematics M. V. Keldysh. 2012. No. 86. 32 p. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-86>.
5. Parallel-serial distributed loader control system / I. A. Nesmiyanov [et al.] // Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex: science and higher professional education. 2017. № 1(45). P. 260-266.
6. Control system of an agricultural manipulator / I. A. Nesmiyanov [et al.] // Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex: science and higher professional education. 2014. No. 3 (35). P. 226-231.
7. Agbots: Weeding a field with a team of autonomous robots / W. McAllister, D. Osipychev, A. Davis, G. Chowdhary // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. V. 163. № 104827.
8. Crop and Weeds Classification for Precision Agriculture Using Context-Independent PixelWise Segmentation / M. Fawakherji, A. Youssef, D. Bloisi, A. Pretto, D. Nardi // Proceedings - 3rd IEEE International Conference on Robotic Computing, IRC. 2019. № 8675654. P. 146-152.
9. Dynamic model of end-effector actuator used for mobile robotic weeder / A. G. Ivanov, V. V. Zhoga, V. E. Pavlovsky, N. S. Vorob'yeva // International Conference of Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering" (ToPME-2019). Moscow, 2019.
10. On the unstable operating modes of manipulator electric drives / I. A. Nesmiyanov, V. V. Zhoga, V. N. Skakunov, N. S. Vorob'yeva, V. V. Dyashkin-Titov, V. S. Bocharnikov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. V. 46 (3). P. 232-239.
11. Robotic weed control using automated weed and crop classification / X. Wu, S. Aravecchia, Ph. Lottes, C. Stachniss, C. Pradalier. 2020. fhal-02484462f.
12. Steward B., Jingyao G., Lie T. The use of agricultural robots in weed management and control // Robotics and automation for improving agriculture, edited by John Billingsley. Volume 44 of Burleigh Dodds Series in Agricultural Science Series. Cambridge, UK: Burleigh Dodds Science Publishing, 2019.

Authors Information

Ivanov Aleksey Gennadievich, assistant of the department "Mechanics" Volgograd State Agrarian University (400002, Volgograd, Universitetsky Prospekt 26), tel. +7 (8442) 41-18-49. E-mail: leha_2106@list.ru

Vorob'yeva Natalia Sergeevna, head of the department "Mechanics" Volgograd State Agrarian University (400002, Volgograd, Universitetsky Prospekt 26), candidate of technical sciences, tel. +7 (8442) 41-18-49.

Zhoga Viktor Viktorovich, Professor, Department of Theoretical Mechanics, Volgograd State Technical University (400005, Volgograd, pr. Lenin 28, building 401), doctor of physical and mathematical sciences, tel. (8442) 24-81-13, 24-80-99.

Pavlovsky Vladimir Evgenievich, professor of IPM named after M.V. Keldysh RAS (125047, Moscow, Miusskaya pl., 4.), Doctor of Physical and Mathematical Sciences.

Pavlovsky Evgeny Vladimirovich, Senior Programmer, IPM named after M.V. Keldysh RAS (125047, Moscow, Miusskaya pl., 4.).

Информация об авторах

Иванов Алексей Геннадьевич, ассистент кафедры «Механика» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (400002, г. Волгоград, Университетский проспект, 26), тел. +7 (8442) 41-18-49.

Воробьева Наталья Сергеевна, заведующий кафедрой «Механика» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (400002, г. Волгоград, Университетский проспект, 26), кандидат технических наук, тел. +7 (8442) 41-18-49.

Жога Виктор Викторович, профессор кафедры «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (400005, Волгоград, пр. им. Ленина 28, к.401), доктор физико-математических наук, тел. (8442) 24-81-13, 24-80-99.

Павловский Владимир Евгеньевич, профессор ИПМ им. М.В.Келдыша РАН (125047, Москва,

******* ИЗВЕСТИЯ *******

**НИЖНЕВОЛЖСКОГО АГРОУНИВЕРСИТЕТСКОГО КОМПЛЕКСА:
НАУКА И ВЫСШЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ**

№ 4 (60), 2020

Миусская пл., д.4.), доктор физико-математических наук.

Павловский Евгений Владимирович, старший программист ИПМ им. М.В.Келдыша РАН
(125047, Москва, Миусская пл., д.4.).