

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5402

УДК 630*307

Статья

Имитационная модель рабочего процесса манипулятора при удалении нежелательной растительности вместе с корневой системой в лесных насаждениях

Попиков Пётр Иванович

доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), popikovpetr@yandex.ru

Бухтояров Леонид Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), vglta-mlx@yandex.ru

Платонов Алексей Александрович

кандидат технических наук, доцент, Ростовский государственный университет путей сообщения (Российская Федерация), paa7@rambler.ru

Вакула Елена Юрьевна

старший преподаватель, Военный учебно-научный центр «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (Российская Федерация), vakula.lena2012@yandex.ru

Получена: 22 октября 2020 / Принята: 1 декабря 2020 / Опубликовано: 9 декабря 2020

Аннотация: Одной из актуальных проблем, возникающих при выращивании долговременных лесных культур, является вопрос своевременного и качественного выполнения их осветлений. Срезание или вырубание нежелательной древесно-кустарниковой поросли ручным или механизированным способом зачастую приводит к продолжению существования удаляемой растительности. Одним из способов уничтожения нежелательной растительности, обеспечивающим невозобновление её произрастания на очищаемой территории, является способ удаления нежелательной поросли вместе с корневой системой, осуществляемый, например, путём воздействия на неё рабочего органа, закреплённого на конце стрелы манипулятора многофункциональной машины. С учётом ранее полученных авторами статьи результатов по моделированию сферического рабочего пространства машин с манипуляторными установками авторы в данной статье (с целью определения оптимальных значений конструктивных и технологических

параметров манипулятора с размещённым на его конце рабочим органом) разработали математическую модель процесса воздействия указанных технических средств на нежелательную поросль, обеспечивающую высокие характеристики производительности и качества работы как самого манипулятора, так и рабочего органа. Выполненное в данном исследовании моделирование было основано в целом на методах классической механики. Для обоснования кинематических параметров манипулятора и рабочего органа авторами разработан ряд расчётных схем с указанием положений выдернутой поросли в нескольких системах координат, в т.ч. координат характерных точек нежелательной поросли с аргументацией особенностей их принятия. Также указаны точки приложения внешних сил (движущих моментов и моментов сопротивления движению, сил тяжести элементов манипулятора), действующих на манипулятор и рабочий орган. Авторами составлен ряд дифференциальных уравнений движения элементов манипулятора (платформы, поворотной стойки, корпуса и штока), зависящих от времени, приведён график рабочего процесса манипулятора с указанием начальных параметров и номинальных значений перемещений. На основании разработанной математической модели для ряда начальных условий рассчитаны траектории и построены графики движения характерных точек манипулятора и поросли, показаны направления дальнейшего применения найденных управляющих воздействий.

Ключевые слова: нежелательная поросль, удаление, манипулятор, моделирование, дифференцирование, траектория движения

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5402

Article

Simulation model of the manipulator workflow when removing uncontrolled vegetation along with the root system in forest plantations

Petr Popikov

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), popikovpetr@yandex.ru

Leonid Bukhtoyarov

Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), vgltta-mlx@yandex.ru

Alexey Platonov

Ph. D. in engineering, associate professor, Rostov State Transport University (Russian Federation), paa7@rambler.ru

Elena Vakula

senior lecturer, Military educational and scientific center «Air Force Academy named after professor N. Ye. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin» (Russian Federation), vakula.lena2012@yandex.ru

Received: 22 October 2020 / Accepted: 1 December 2020 / Published: 9 December 2020

Abstract: One of the urgent problems that arises when growing long-term forest stands is the problem of timely and high-quality sapling thinning. Manual or mechanized cutting or clearing of uncontrolled trees and shrubs often results in their survival. One of the methods for destruction of such vegetation that protects the cleared areas from its regeneration is a method for removing uncontrolled underwood including the root system that is performed by using a working body attached to the end of the manipulator arm of a multifunctional machine. The authors take into account the results previously obtained when modeling the spherical working space of machines with manipulator installations. To determine the optimal values of the design and technological parameters of the manipulator with a working body located at its end the authors have developed a mathematical model describing the process of these technical means influence on the uncontrolled underwood, providing high performance and quality characteristics of both the manipulator itself and the working body. This modeling was based in general on the methods of classical mechanics. To substantiate the kinematic parameters of the manipulator and the working body the authors have developed a number of design

schemes indicating the positions of the pulled out underwood in several coordinate systems. These coordinates included the characteristic points of the uncontrolled underwood with substantiation of the features of their adoption, points of application of external forces (driving moments and moments of resistance movement, gravity of the manipulator elements) acting on the manipulator and the working body. The authors have compiled a number of time-dependent differential equations of the movement of the manipulator elements (platform, rotary rack, body and rod); the graph of the manipulator workflow indicates the initial parameters and nominal displacement values. Based on the developed mathematical model for a number of initial conditions, the authors have calculated the trajectories, constructed the graphs of the movement of the characteristic points of the manipulator and the underwood, and proposed the directions of further application of the obtained control actions.

Keywords: uncontrolled underwood, removal, manipulator, modeling, differentiation, trajectory of movement

1. Введение

Одним из приёмов выращивания полноценных и долговременных лесных культур [1], [2] является осветление, в процессе которого регулируют густоту и улучшают условия роста деревьев главной породы. Осветление проводят в насаждениях, начиная с 3...5 и до 10 лет, а при зарастании междурядий порослью второстепенных лиственных пород необходимость осветления культур появляется уже на втором году после посадки. Особенно это характерно для зоны смешанных лесов, где обилие тепла, плодородные почвы и достаточное количество осадков приводят к массовому появлению поросли осины и берёзы. Поэтому, если своевременно не проводить осветление, то, как отмечают многие учёные [3], [4], лесные культуры гибнут.

Для срезания поросли могут применяться кусторезы ручные и тракторные с пассивными и активными рабочими органами [5]. В частности, определённое применение находят кусторезы с рабочими органами активного действия [6—8] фрезерного типа, к которым относятся тракторные кусторезы КОГ-2.3, КОМ-2.3, КОН-2.3, КО-1.5 и др. Однако после срезания этими (а также иными) кусторезами поросль продолжает развиваться, что снижает сроки очередного проведения осветления. Поскольку поросль разнообразна по своим параметрам (диаметр, высота) и физико-механическим свойствам (сопротивление изгибу, жёсткость стволика), то доля уничтожаемой поросли составляет всего лишь 30...40 %. В соответствии с этим нам представляется актуальным проведение дополнительных исследований, направленных на устранение имеющихся недостатков в существующих способах и средствах удаления нежелательной растительности.

2. Материалы и методы

Одним из способов уничтожения нежелательной растительности, обеспечивающим невозобновление её произрастания на очищаемой территории, является способ удаления нежелательной поросли вместе с корневой системой [9] и переработкой в щепу каждого удаляемого экземпляра древесно-кустарниковой растительности. Подобные воздействия на нежелательную поросль способствуют уменьшению ручного труда работников лесных предприятий, сокращению затрат на вывоз и последующую утилизацию порубочных остатков, уменьшению (вплоть до полного исключения) необходимости повторной обработки ранее очищенных площадей и, в целом, повышению качества осветления лесных культур.

В соответствии с указанным способом воздействие на нежелательную поросль осуществляется рабочим органом, закреплённым, например, на конце стрелы манипулятора (рисунок 1) многофункционального транспортного средства. Рассматриваемый в данной работе манипулятор представляет собой платформу 1 с поворотными стойкой 2 и корпусом 3, внутри него возвратно-поступательно перемещается шток 4. На конце штока установлено рабочее оборудование 5 (в данном случае — клещевой захват).

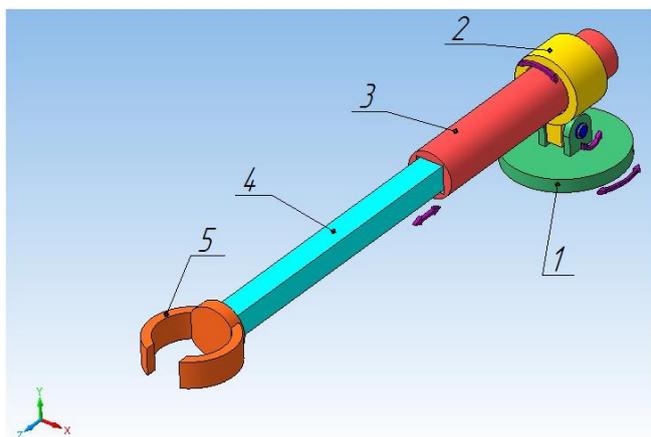


Рисунок 1. Малозвенный манипулятор с рабочим оборудованием

Figure 1. Manipulator with a small number of links and working equipment

Отметим, что на современном этапе развития науки и техники одним из основных этапов разработки наукоёмкой продукции является моделирование сложных систем или процессов [10], [11], поскольку современная технология является чрезвычайно сложным техническим объектом. В целом вопросами моделирования работы машин с манипуляторными установками занимался целый ряд как отечественных (например, [12—15]), так и зарубежных [16—18] учёных, однако нами было выявлено недостаточное изучение вопроса моделирования рабочего процесса малозвенного манипулятора с закреплённым на конце его стрелы рабочим органом. С учётом полученных нами результатов по моделированию сферического рабочего пространства машин с манипуляторными установками [19] для определения оптимальных значений конструктивных и технологических параметров рассматриваемого в данной работе манипулятора с размещённым на его конце рабочим органом необходимо разработать математическую модель процесса воздействия указанных технических средств на нежелательную поросль, обеспечивающего высокие характеристики производительности и качества работы как самого манипулятора, так и рабочего органа [20], [21]. Выполненное в данном исследовании моделирование было основано, в целом, на методах классической механики [22—24].

3. Результаты

Для обоснования кинематических и динамических параметров манипулятора нами была разработана математическая модель рабочего процесса удаления нежелательной поросли с его корневой системой. На рисунке 2 приведена расчётная схема манипулятора для определения его кинематических параметров.

Характерными точками на данной схеме являются точки *A* и *B* — точки, связанные с удаляемой нежелательной порослью, при этом в качестве точки *A* нами был принят верх

основного ствола нежелательной растительности, а в качестве точки B — начало её корневой системы.

Рассматриваем координаты крайних точек A и B выдернутой с корнем поросли в системе координат при повороте растительности на угол (рисунок 3).

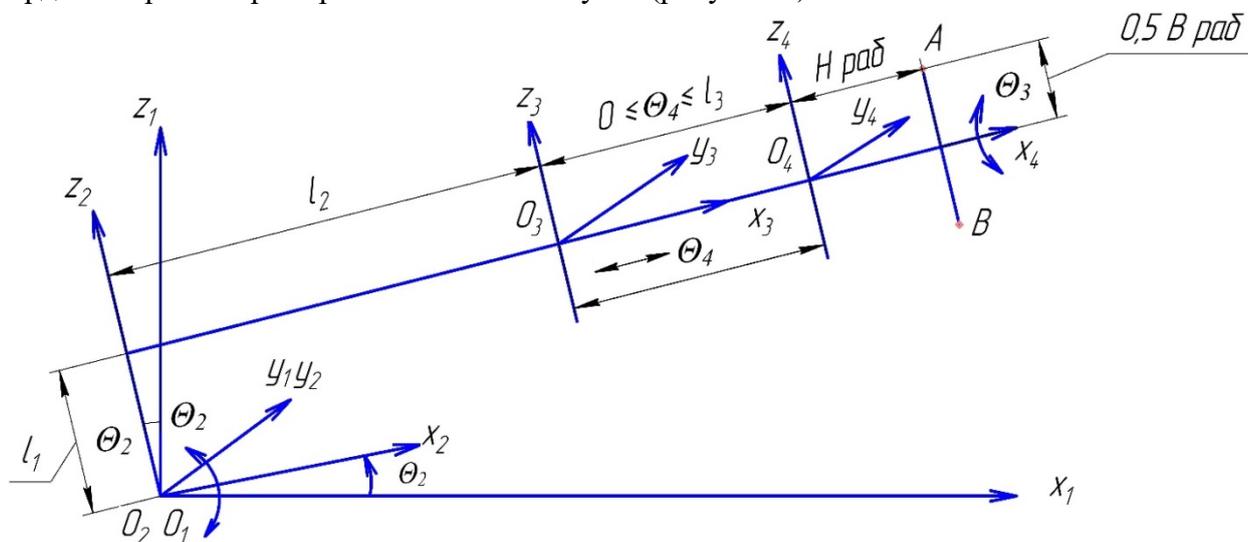


Рисунок 2. Расчётная схема манипулятора для определения кинематических параметров

Figure 2. Design diagram of the manipulator for determining the kinematic parameters

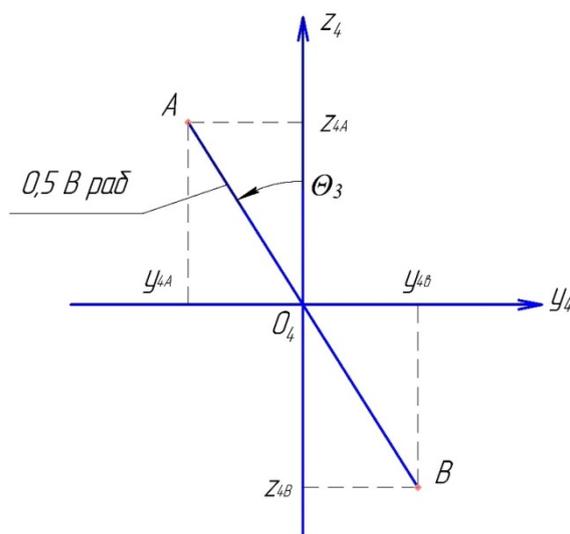


Рисунок 3. Положение выдернутой поросли в системе координат ZOY

Figure 3. The position of the pulled out underwood in the ZOY coordinate system

При этом положительное направление вращения Θ_3 принимаем против часовой стрелки со стороны положительного направления оси x_4 ($\omega_4 > 0$):

$$\begin{cases} X_{4A} = H_{pab} = H \\ Y_{4A} = -0,5 \cdot B \cdot \sin \Theta_3 \\ Z_{4A} = 0,5 \cdot B \cdot \cos \Theta_3 \end{cases} \quad \begin{cases} X_{4B} = H \\ Y_{4B} = 0,5 \cdot B \cdot \sin \Theta_3 \\ Z_{4B} = -0,5 \cdot B \cdot \cos \Theta_3 \end{cases} \quad (1)$$

При переносе начала координат из точки O_4 в точку O_2 :

$$\begin{cases} X_{2A} = H + l_2 + \Theta_4 \\ Y_{2A} = -0,5 \cdot B \cdot \sin \Theta_3 \\ Z_{2A} = 0,5 \cdot B \cdot \cos \Theta_3 + l_1 \end{cases} \quad \begin{cases} X_{2B} = H + l_2 + \Theta_4 \\ Y_{2B} = 0,5 \cdot B \cdot \sin \Theta_3 \\ Z_{2B} = -0,5 \cdot B \cdot \cos \Theta_3 + l_1 \end{cases} \quad (2)$$

Рассматриваем координаты точек A и B выдернутой поросли относительно осей координат $x_1 y_1 z_1$ (рисунок 4). Очевидно, координаты относительно оси y_1 не изменятся. Рассмотрим координаты относительно осей $x_1 O_1 z_1$:

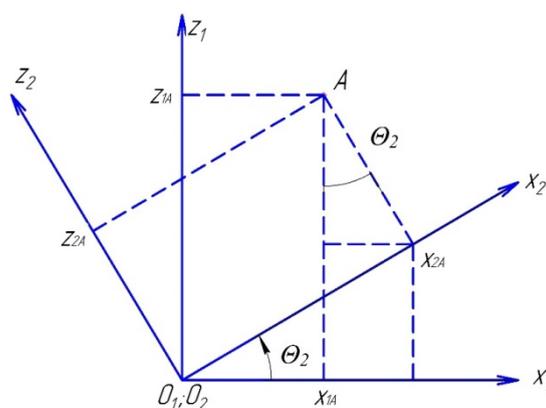


Рисунок 4. Координаты точек A и B выдернутой поросли относительно осей координат $x_1 y_1 z_1$

Figure 4. Coordinates of points A and B of the pulled out underwood relative to the coordinate axes $x_1 y_1 z_1$

$$\begin{aligned} X_{1A} &= X_{2A} \cdot \cos \Theta_2 - Z_{2A} \cdot \sin \Theta_2 \\ Z_{1A} &= X_{2A} \cdot \sin \Theta_2 + Z_{2A} \cdot \cos \Theta_2 \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, имеем:

$$\begin{cases} X_{1A} = (H + l_2 + \Theta_4) \cdot \cos \Theta_2 - (0,5 \cdot \cos \Theta_3 + l_1) \cdot \sin \Theta_2 \\ Y_{1A} = -0,5 \cdot \sin \Theta_3 \\ Z_{1A} = (H + l_2 + \Theta_4) \cdot \sin \Theta_2 + (0,5 \cdot \cos \Theta_3 + l_1) \cdot \cos \Theta_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} X_{1B} = (H + l_2 + \Theta_4) \cdot \cos \Theta_2 - (l_1 - 0,5 \cdot \cos \Theta_3) \cdot \sin \Theta_2 \\ Y_{1B} = -0,5 \cdot \sin \Theta_3 \\ Z_{1B} = (H + l_2 + \Theta_4) \cdot \sin \Theta_2 + (l_1 - 0,5 \cdot \cos \Theta_3) \cdot \cos \Theta_2 \end{cases} \quad (5)$$

Рассматриваем поворот системы координат $x_1y_1z_1$ относительно оси z_1 на угол Θ_1 . Определяем координаты точек A и B выдернутой поросли в системе координат $x y z$ (рисунок 5). Очевидно, координаты z не изменятся. Рассмотрим координаты относительно осей x и y .

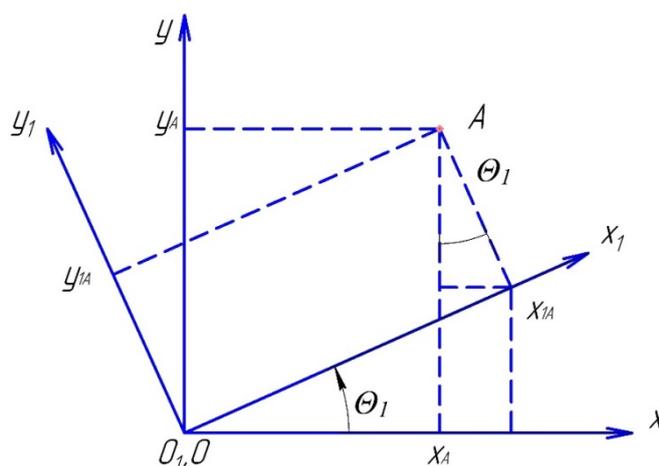


Рисунок 5. Координаты точек A и B выдернутой поросли в системе координат $x y z$

Figure 5. The coordinates of points A and B of the pulled out underwood in the coordinate system $x y z$

$$\begin{cases} X_A = X_{1A} \cdot \cos \Theta_1 - Y_{1A} \cdot \sin \Theta_1 \\ Z_A = X_{1A} \cdot \sin \Theta_1 + Y_{1A} \cdot \cos \Theta_1 \end{cases} \quad (6)$$

Аналогичные выражения можно получить и для точки B выдернутой поросли. Окончательно имеем:

$$\begin{cases} X_A = [(H + l_2 + \Theta_4) \cdot \cos \Theta_2 - (l_1 + 0,5 \cdot \cos \Theta_3) \cdot \sin \Theta_2] \cdot \cos \Theta_1 + \\ + 0,5 \cdot B \cdot \sin \Theta_3 \cdot \sin \Theta_1 \\ Y_A = [(H + l_2 + \Theta_4) \cdot \cos \Theta_2 - (l_1 + 0,5 \cdot \cos \Theta_3) \cdot \sin \Theta_2] \cdot \sin \Theta_1 - \\ - 0,5 \cdot B \cdot \sin \Theta_3 \cdot \cos \Theta_1 \\ Z_A = (H + l_2 + \Theta_4) \cdot \cos \Theta_2 - (l_1 + 0,5 \cdot \cos \Theta_3) \cdot \cos \Theta_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} X_B = [(H + l_2 + \Theta_4) \cdot \cos \Theta_2 - (l_1 - 0,5 \cdot \cos \Theta_3) \cdot \sin \Theta_2] \cdot \cos \Theta_1 - \\ - 0,5 \cdot B \cdot \sin \Theta_3 \cdot \sin \Theta_1 \\ Y_B = [(H + l_2 + \Theta_4) \cdot \cos \Theta_2 - (l_1 - 0,5 \cdot \cos \Theta_3) \cdot \sin \Theta_2] \cdot \sin \Theta_1 + \\ + 0,5 \cdot B \cdot \sin \Theta_3 \cdot \cos \Theta_1 \\ Z_B = (H + l_2 + \Theta_4) \cdot \sin \Theta_2 + (l_1 - 0,5 \cdot \cos \Theta_3) \cdot \cos \Theta_2 \end{cases} \quad (8)$$

На основании математической модели, описывающей движение характерных точек манипулятора и поросли, рассчитаем траектории их движения для следующих условий: скорости звеньев $\omega_1 = 0,628 \text{ c}^{-1}$, $\omega_2 = 0,105 \text{ c}^{-1}$, $\omega_3 = 0$, $V_4 = 0,1 \text{ м/с}$ (рисунки 6 и 7). Время моделирования $t = 5 \text{ с}$. Высота поворотной колонны 2 м, длина стрелы 2 м, длина рукояти 1,1 м, высота поросли 1 м.

Таблица. Исходные значения координат точек для расчёта

Table. The initial values of the coordinate points to calculate

№ п/п	Обозначение точек	Координаты точек		
		X, мм	Y, мм	Z, мм
1	O_1	0	0	0
2	O_2	0	0	1850
3	O_3	1624	0	969
4	O_4	2085	0	719
5	A	2213	0	1006
6	B	2152	0	3

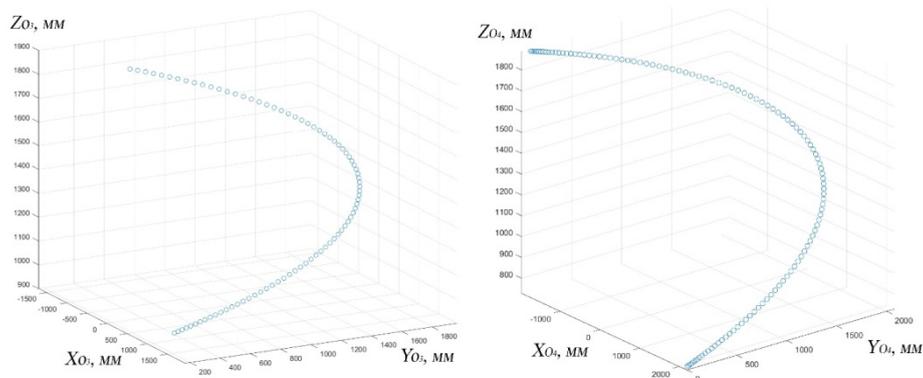


Рисунок 6. Траектории движения точек O_3 , O_4 манипулятора

Figure 6. Trajectories of movement of manipulator points O_3 , O_4

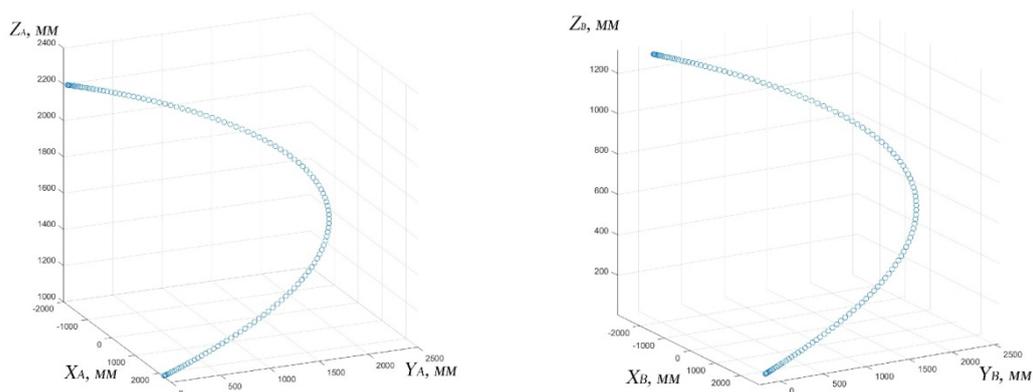


Рисунок 7. Траектории движения точек *A* и *B* поросли

Figure 7. Trajectories of movement of underwood points *A* and *B*

4. Обсуждение и заключение

1. На основании полученной имитационной модели манипулятора были установлены траектории движения характерных точек звеньев манипулятора и крайних точек выдернутой поросли.

2. Найденные управляющие воздействия могут быть использованы как входные параметры для моделирования манипулятора в других средах и для создания устройства, автоматизирующего работу оператора манипулятора.

Список литературы

1. *Бартенев И. М., Шаталов В. Г.* Технология и механизация выращивания защитных лесных насаждений: Учеб. пособие. Воронеж: ВПИ, 1991. 66 с.
2. *Мельчанов В. А., Фремон Т. В., Эрреро Х.* Защитная роль лесных насаждений по берегам рек и водохранилищ: [Монография]. М.: РИАМА, 2008. 170 с.
3. Лесные культуры: Учебник / А. Р. Родин, С. А. Родин, Е. А. Калашникова, С. Б. Васильев; Под ред. В. Ф. Никитина. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. 210 с.
4. *Редько Г. И., Мерзленко М. Д., Бабич Н. А.* Лесные культуры: в 2 ч.: Учебник / отв. ред. Г. И. Редько. М.: Изд-во Юрайт, 2019. Ч. 1. 197 с.
5. *Бартенев И. М., Драналюк М. В., Попиков П. И., Бухтояров Л. Д.* Конструкции и параметры машин для расчистки лесных площадей: [Монография]. М.: Флинта-Наука, 2007. 208 с.
6. *Бухтояров Л. Д.* Разработка конструкции и обоснование параметров инерционно-рубящего рабочего органа кустореза для удаления лесной поросли: Дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2004. 189 с.
7. *Малюков С. В.* Проведение испытаний кустореза с упорами-улавливателями порослевин в полевых условиях // Лесотехнический журнал. 2011. № 4. С. 93—97.
8. *Булавиццева А. Д.* Обоснование параметров активного навесного кустореза для линейных объектов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Йошкар-Ола, 2013. 18 с.

9. Патент на изобретение RU 2642180 С1, 24.01.2018. Способ удаления нежелательной растительности с полосы отвода железных дорог / Платонов А. А., Зимарин С. В., Вакула Е. Ю. Заявка № 2016148090 от 07.12.2016.
10. Попиков П. И. Повышение эффективности гидрофицированных машин при лесовосстановлении на вырубках. Воронеж, 2001. 156 с.
11. Драпалюк М. В., Полев В. С. Моделирование рубящих элементов цепного кустореза // Лесной журнал. 2010. № 6. С. 94—98.
12. Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование: [Монография] / И. М. Бартнев, З. К. Емтыль, А. П. Татаренко, М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, Л. Д. Бухтояров. М.: Флинта-Наука, 2011. 408 с.
13. Иванов А. В. Манипулятор как многопараметрический объект управления // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2007. № 181. С. 116—120.
14. Chizhikov V. I., Kurnasov E. V., Petrov A. B. Robot manipulator control with efforts stabilization in capture of object with fuzzy geometrical characteristic // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). «Lecture Notes in Mechanical Engineering». 2019. P. 823—837. DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1_88.
15. Fedorushkov A. B., Kuzmenko D. N., Lazarev E. A. Selection of concept and determination of the main parameters for manipulator of dual-arm manipulator system of planetary rover // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10, no. 20. P. 9706—9712.
16. Theodoridis D. C., Boutalis Y. S., Christodoulou M. A. A New adaptive neuro-fuzzy controller for trajectory tracking of robot manipulators // International Journal of Robotics and Automation. 2011. Vol. 26, no. 1. P. 64—75. DOI: 10.2316/Journal.206.2011.1.206-3401.
17. Yuan P., Su F., Shi Z. Y., Wang T. M., Chen D. D. Autonomous path planning solution for industrial robot manipulator using backpropagation algorithm // Advances in Mechanical Engineering. 2015. Vol. 7, no. 12. P. 15619768. DOI: 10.1177/1687814015619768.
18. Zhang Y., Li W., Liao B., Guo D., Peng C. Analysis and verification of repetitive motion planning and feedback control for omnidirectional mobile manipulator robotic systems // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2014. Vol. 75, no. 3-4. P. 393—411. DOI: 10.1007/s10846-014-0022-0.
19. Платонов А. А. Элементы математической модели образования сферического рабочего пространства манипуляторными машинами // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. № 1. С. 48—55. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-01-48-55.
20. Грязин В. А. Интерактивный подход в моделировании манипуляторов транспортно-технологических машин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2013. № 205. С. 109—117.
21. Лазуткина Н. А. Техническая реализация управления переносным движением манипулятора // Фундаментальные исследования. 2015. № 9-3. С. 476—480.
22. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений: Учеб. пособие. М.: Наука, 1976. 279 с.
23. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления: Учебник для вузов / Под ред. А. Б. Лурье. Л.: Колос. Ленингр. отд-ние, 1979. 312 с.
24. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1998. 319 с.

References

1. Bartenev I. M., Shatalov V. G. *Technology and mechanization of growing protective forest plantations*: Textbook. allowance. Voronezh, VPI, 1991. 66 p. (In Russ.)

2. Melchanov V. A., Fremon T. V., Herrero H. *Protective role of forest plantations on the banks of rivers and reservoirs*. Moscow, RIAMA, 2008. 170 s. (In Russ.)
3. Rodin A. P., Rodin S. A., Kalashnikov E. A., Vasiliev S. B.; Ed. by V. F. Nikitin. *Forest cultures: Textbook*. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman, 2020. 210 p. (In Russ.)
4. Redko G. I., Merzlenko M. D., Babich N. A. *Forest cultures: 2 hours: Textbook / Ed. by G. I. Redko*. Moscow, Yurayt Publishing House, 2019. Part 1, 197 p. (In Russ.)
5. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V., Popikov P. I., Bukhtoyarov L. D. *Designs and parameters of machines for clearing forest areas*. Moscow, Flinta-Nauka, 2007. 208 p. (In Russ.)
6. Bukhtoyarov L. D. *Design development and justification of the parameters of the inertial-chopping working body of the brush cutter for removing forest growth*. Diss. ... cand. tech. sciences: 05.21.01. Voronezh, 2004. 189 p. (In Russ.)
7. Malyukov S. V. Carrying out tests of a brush cutter with stops-catchers of lumps in the field. *Forestry journal*, 2011, no. 4, pp. 93—97. (In Russ.)
8. Bulavintseva A. D. *Justification of the parameters of the active mounted hedgecutter for linear objects: abstract of thesis*. Diss. ... cand. tech. sciences: 05.21.01. Yoshkar-Ola, 2013. 18 p. (In Russ.)
9. Platonov A. A., Zimarin S. V., Vakula E. Yu. *Method for removing unwanted vegetation from the railroad right-of-way*. Patent for invention RU 2642180 C1. Application No. 2016148090 dated 12/07/2016, 2018. (In Russ.)
10. Popikov P. I. *Increasing the efficiency of hydraulic machines in reforestation in clearings*. Voronezh, 2001. 156 p. (In Russ.)
11. Drapalyuk M. V., Polev V. S. Modeling of chopping elements of a chain brush cutter // *Forest Journal*, 2010, no. 6, pp. 94—98. (In Russ.)
12. Bartenev I. M., Emtyl Z. K., Tatarenko A. P., Drapalyuk M. V., Popikov P. I., Bukhtoyarov L. D. *Hydromanipulators and forestry technological equipment*. Moscow, Flinta-Nauka, 2011. 408 p. (In Russ.)
13. Ivanov A. V. Manipulator as a multi-parameter control object. *Bulletin of the Saint-Petersburg Forestry Academy*, 2007, no. 181, pp. 116—120. (In Russ.)
14. Chizhikov V. I., Kurnasov E. V., Petrov A. B. Robot manipulator control with efforts stabilization in capture of object with fuzzy geometrical characteristic. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. «Lecture Notes in Mechanical Engineering», 2019, pp. 823—837. doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_88.
15. Fedorushkov A. B., Kuzmenko D. N., Lazarev E. A. Selection of concept and determination of the main parameters for manipulator of dual-arm manipulator system of planetary rover. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, vol. 10, no. 20, pp. 9706—9712.
16. Theodoridis D. C., Boutalis Y. S., Christodoulou M. A. A New adaptive neuro-fuzzy controller for trajectory tracking of robot manipulators. *International Journal of Robotics and Automation*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 64—75. doi: 10.2316/Journal.206.2011.1.206-3401.
17. Yuan P., Su F., Shi Z. Y., Wang T. M., Chen D. D. Autonomous path planning solution for industrial robot manipulator using backpropagation algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, vol. 7, no. 12, pp. 15619768. doi: 10.1177/1687814015619768.
18. Zhang Y., Li W., Liao B., Guo D., Peng C. Analysis and verification of repetitive motion planning and feedback control for omnidirectional mobile manipulator robotic systems. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2014, vol. 75, no. 3-4, pp. 393—411. doi: 10.1007/s10846-014-0022-0.
19. Platonov A. A. Elements of the mathematical model of the formation of a spherical working space by manipulator machines. *Scientific and technical bulletin of the Bryansk State University*, 2018, no. 1, pp. 48—55. doi: 10.22281/2413-9920-2018-04-01-48-55. (In Russ.)

20. Gryazin V. A. An interactive approach to modeling manipulators of transport and technological machines. *Bulletin of the Saint-Petersburg Forestry Academy*, 2013, no. 205, pp. 109—117. (In Russ.)
21. Lazutkina N. A. Technical implementation of control of the portable motion of the manipulator. *Fundamental research*, 2015, no. 9-3, pp. 476—480. (In Russ.)
22. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. *Planning an experiment in the search for optimal solutions*: Textbook. allowance. Moscow, Nauka, 1976. 279 p. (In Russ.)
23. *Modeling of agricultural units and their control systems*: Textbook. for universities / Ed. by A. B. Lurie. Leningrad, Kolos. Leningrad. department, 1979. 312 p. (In Russ.)
24. Councils B. Ya., Yakovlev S. A. *Modeling of systems*: Textbook. allowance. Moscow, Graduate school., 1998. 319 p. (In Russ.)

© Попиков П. И., Бухтояров Л. Д., Платонов А. А., Вакула Е. Ю., 2020