

#### 4.3.1. ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 631.3/62-94

DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2023\_2\_136

EDN: OWIMOM

### Кинематика рабочего органа посадочной машины, предназначенного для посадки сеянцев с открытой и закрытой корневой системой

Леонид Дмитриевич Бухтояров<sup>1✉</sup>, Сергей Владимирович Малюков<sup>2</sup>,  
Михаил Николаевич Лысыч<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,  
Воронеж, Россия

<sup>1</sup>vglta-mlx@yandex.ru, b.leonid@vgtu.ru✉

**Аннотация.** В сельском и лесном хозяйстве для механизации процесса создания насаждений используются современные лесопосадочные машины. Анализ конструкций посадочных аппаратов лесопосадочных машин показывает, что существующие технические решения не удовлетворяют основным агролесотехническим требованиям (отсутствие пропусков и повреждений высаживаемых растений с заданным шагом посадки и с обеспечением вертикальности расположения надземной части и корневой системы сеянцев). Учитывая потребность в импортозамещении как самих машин, так и средств их проектирования, актуальными являются работы, направленные на обоснование параметров машины, обеспечивающей равномерность шага посадки и скорости вращения подающего посадочный материал механизма. С целью обоснования кинематических параметров и проведения имитационных экспериментов на основе использования программного комплекса САПР Solidworks авторами реализовано проектирование 3D-модели рабочего органа посадочной машины, предназначенного для захвата и помещения в борозду сеянца с закрытой или открытой корневой системой. Рабочий орган выполнен в виде рамы с установленными внутри приводным и двумя ведомыми зубчатыми колесами, на них вращается цепь, натяжение которой регулируется натяжителем. На втулках цепи закреплены лучи, снабженные подпружиненными левым и правым захватами. При входе в направляющую захваты сжимаются и удерживают посадочный материал, а на выходе разжимаются, устанавливая его в подготовленную сошником борозду. Форма рамы подобрана таким образом, чтобы обеспечить удобную подачу посадочного материала и достаточное время его нахождения в борозде при нулевой скорости движения относительно поверхности земли. Проведен имитационный эксперимент в САПР, определены траектории движения исследуемых точек механизма и путем аппроксимации их абсцисс и ординат получены уравнения в явном виде для каждой фазы движения, которые предназначены для исследования динамики и кинематики рабочего органа посадочной машины в среде моделирования «Универсальный механизм».

**Ключевые слова:** агропромышленный комплекс, посадочные машины, кинематика, сажающий аппарат, имитационное моделирование

**Благодарности:** исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010>.

**Для цитирования:** Бухтояров Л.Д., Малюков С.В., Лысыч М.Н. Кинематика рабочего органа посадочной машины, предназначенного для посадки сеянцев с открытой и закрытой корневой системой // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 2(77). С. 136–144. [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2023\\_2\\_136-144](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_2_136-144).

#### 4.3.1. TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

### Kinematics of the working body of mechanical tree planter designed for planting bare-rooted and ball-rooted seedlings

Leonid D. Bukhtoyarov<sup>1✉</sup>, Sergey V. Malyukov<sup>2</sup>, Mikhail N. Lysych<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,  
Voronezh, Russia

<sup>1</sup>vglta-mlx@yandex.ru, b.leonid@vgtu.ru✉

**Abstract.** In agriculture and forestry, modern planting machines are used to mechanize the process of plantation formation. Analysis of the designs of planting devices of mechanical tree-planting machines outlines that the existing engineering proposals do not satisfy the basic agricultural and forestry requirements, such as the

absence of gaps and injuries to planted seedlings and young plants with a given planting step and ensured vertical location of the aerial parts and the root system of seedlings. Taking into account the need for import substitution of both the machines themselves and their design tools, studies aimed at substantiating the parameters of the machinery ensuring the evenness of plant spacing and rotation velocity of the feeding mechanism of the planting stock are relevant. In order to substantiate the kinematic parameters and perform simulation experiments based on the use of the CAD Solidworks software package, the authors implemented the 3D pattern of the working body of a planting machine designed for gripping and placing bare-rooted and ball-rooted seedlings in the furrow. The working body is made in the form of a frame with installed inside one driving wheel and two driven gears. A chain rotates on the gears and its tension is regulated by a chain tensioner. Beams equipped with spring-loaded left and right grippers are fixed on the chain bushings. At the entrance of the chain guide, the grippers compress and hold the planting stock, and at the exit they unclap and recess the seedling in the furrow prepared by the coulter. The shape of the frame is selected in such a way as to ensure a convenient supply of planting stock and sufficient time for it to be placed in the furrow at zero speed relative to the ground surface. A simulation experiment was performed in CAD, the trajectories of the motion of the studied points of the mechanism were determined, and by approximating their abscissas and ordinates, equations were obtained explicitly for each phase of motion, which are designed to study the dynamics and kinematics of the working body of the planting machine in the "Universal Mechanism" modeling environment.

**Keywords:** Agro-Industrial Complex, planting machines, kinematics, planting device, simulation modeling

**Acknowledgments:** the study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>.

**For citation:** Bukhtoyarov L.D., Malyukov S.V., Lysich M.N. Kinematics of the working body of mechanical tree planter designed for planting bare-rooted and ball-rooted seedlings. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(2):136-144. (In Russ.). [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2023\\_2\\_136-144](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_2_136-144).

## Введение

Решение задач по улучшению ведения сельского и лесного хозяйства неразрывно связано с комплексной механизацией всех трудоемких процессов, при этом обеспечение комплексной механизации хозяйственных работ в современных условиях невозможно без глубоких знаний по систематизации технологических операций, правильного подбора и комплектования машинно-тракторных агрегатов. Наряду с совершенствованием существующих средств механизации необходимо создание принципиально новых машин, механизмов, взаимоувязанных по своим технологическим и технико-экономическим показателям с целью выполнения операций всего технологического цикла.

В сельском хозяйстве широкое распространение получили рассадопосадочные машины, предназначенные для посадки различных культур. В лесном хозяйстве применяются лесопосадочные машины различных конструкций для посадки семян и саженцев. Все эти машины имеют похожие конструкционные решения, а также аналогичные принципы посадки растений. Разработкой лесопосадочных машин и обоснованием их параметров занимались многие специалисты из научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений, в том числе И.М. Бартенев с соавт., Ю.М. Жданов, В.И. Казаков с соавт., В.В. Стасюк, М.Л. Шабанов, П.И. Титов, М.В. Шавков и др. [1, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Для механизации процесса лесовосстановления необходимо использовать современные лесопосадочные машины. Учитывая потребность в импортозамещении как самих машин, так и средств их проектирования, актуальными являются работы в данном направлении.

Анализ конструкций посадочных аппаратов лесопосадочных машин показывает, что существующие технические решения имеют недостатки, не позволяющие выполнять основные агролесотехнические требования: не допускать пропусков и поврежденных высаживаемых растений, выдерживать шаг посадки, обеспечивать вертикальность расположения надземной части и корневой системы.

Для обоснования параметров посадочной машины, обеспечивающей равномерный шаг посадки, вертикальность расположения надземной части, необходимо определить траекторию движения рабочего органа. Рассмотрим современные подходы к решению подобных задач.

Проведенный анализ отечественных и зарубежных источников показал, что для обоснования кинематических и динамических параметров посадочных машин широко используют системы автоматизированного проектирования (САПР), которые позволяют численным методом провести компьютерный эксперимент на имитационной модели, а также специальные среды для моделирования многозвенных механизмов.

Доктор технических наук, профессор И.М. Бартенев с соавт., используя САПР SolidWorks, разработали модель обрезчика ветвей и, проведя имитационный эксперимент, определили требуемые параметры движения гидроцилиндров для перевода рабочего органа в транспортное и рабочее положения [2]. Имитационная модель учитывала геометрические, кинематические и инерционные параметры звеньев обрезчика. В модуле Motion SolidWorks на звенья были установлены виртуальные датчики перемещения и получены траектории движения обрезчика, при этом управляющие воздействия можно использовать как входной параметр для имитационных моделей и в других математических средах. Кроме того, сотрудниками Воронежского государственного лесотехнического университета в среде Matlab/Simulink была разработана имитационная модель, которая позволила рассчитать характеристики движения рабочего органа обрезчика ветвей – ротора с ножами с учетом внешних воздействий [12].

Исследователи из Государственного университета, расположенного в г. Галаце, Румыния (М. Niculescu с соавт.), исследовав кривошипно-ползунный механизм, разделили движение механизма на фазы и использовали гибридную функцию для определения передаточного отношения. Полученные параметры некруглых шестерен были использованы при разработке 3D-модели в САПР AutoCad [13].

Сотрудники Академии Наук Китая (Shen H., Liu Y., Wu H., Hu C., Wang S.) опубликовали результаты разработки робота с манипулятором, имеющим три степени свободы. Расчет прямой и обратной кинематической задачи выполнен с использованием предложенной в САПР 3D-модели и кинематических уравнений движения [14].

Методика вывода уравнений явного вида для аналитического расчета представлена в публикациях авторского коллектива Воронежского государственного аграрного университета под руководством доктора технических наук, профессора А.Н. Беляева [4, 5]. Сотрудники агроинженерного факультета путем составления параметрических уравнений определили координаты теоретической кривой траектории и обосновали способ движения трактора «крабом», после составления кинематической модели перешли к обоснованию динамической и выполнили численную реализацию в среде программирования Matlab/Simulink, что позволило рассчитать кинематические и динамические характеристики трактора при криволинейном движении [3].

В представленной статье рассматривается посадочный рабочий орган, который может быть использован при посадке как лесных, так и сельскохозяйственных культур.

На основании проведенного анализа опубликованных работ примем следующую последовательность действий при разработке математической модели рабочего органа лесопосадочной машины.

На первом этапе разработаем 3D-модель рабочего органа, разобьем на фазы в соответствии с формой пути движение рабочего органа и определим на основании проведенного в САПР компьютерного эксперимента его траекторию движения, после чего аппроксимируем полученные зависимости и найдем уравнения для описания траекторий движения.

На втором этапе, используя ПО «Универсальный механизм» разработаем имитационную модель, в которую включим найденные уравнения, и выполним динамический анализ механизма. В представленной статье подробно рассмотрен первый этап.

### Методика расчета

Используя САПР, спроектируем рабочий орган лесопосадочной машины, предназначенный для захвата и помещения в борозду сеянца с закрытой или открытой корневой системой. Рабочий орган состоит из рамы 1, внутри которой установлены приводное 2 и два ведомых зубчатых колеса 3. На зубчатых колесах вращается цепь 4, натяжение которой регулируется натяжителем 5. На втулках цепи закреплены лучи 6, на которых установлены подпружиненные левый и правый захваты 7, 8. При входе в направляющую 9 захваты сжимаются и удерживают посадочный материал, а на выходе разжимаются, устанавливая его в подготовленную сошником борозду.

Ввиду того, что при математическом описании реальной конструкции исследователи сталкиваются с определенными трудностями, введем следующие допущения:

- цепь, на которой установлены лучи, заменим опорной полосой, повторяющей форму цепи, вдоль которой будет двигаться луч с подпружиненными захватами;
- количество рассчитываемых лучей примем равным одному (рис. 1).

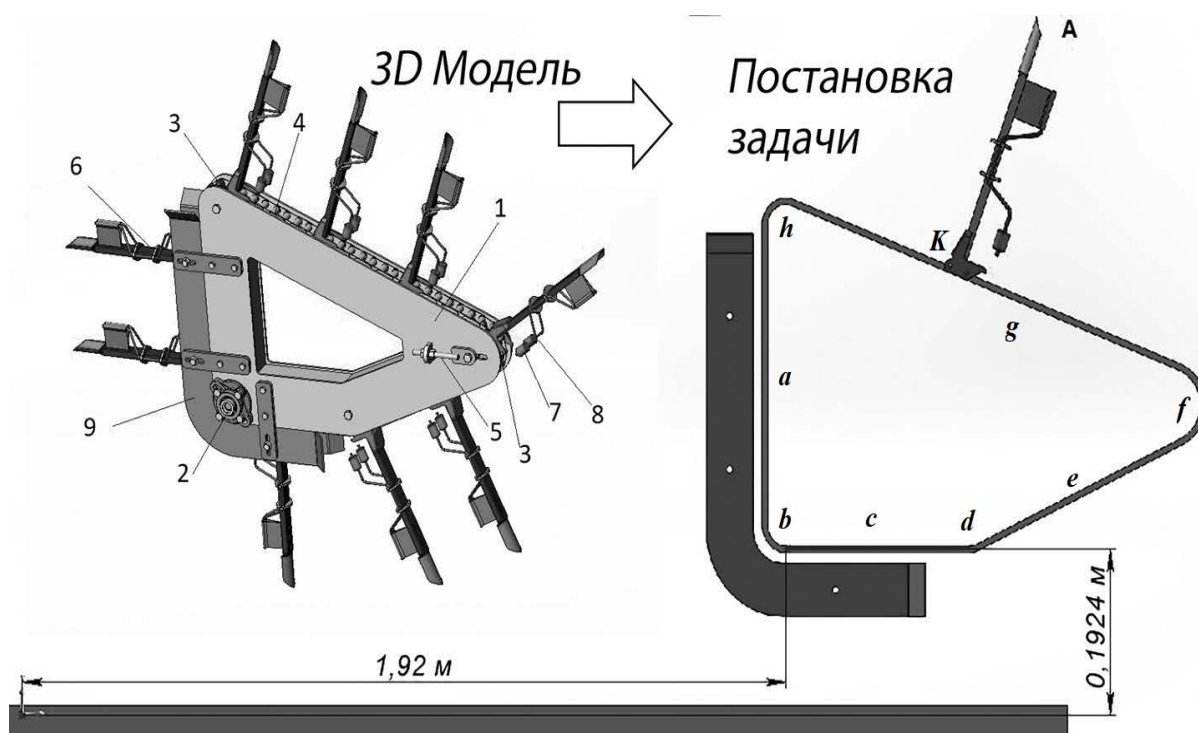


Рис. 1. 3D-модель рабочего органа лесопосадочной машины и постановка задачи имитационного эксперимента

Выделим в движении каретки восемь фаз и обозначим их *a, b, c, d, e, f, g, h*. Фазы соответствуют форме направляющей полосы, как это показано на рисунке 1.

Проведем два имитационных эксперимента, используя САПР SolidWorks на упрощенной 3D-модели рабочего органа, представленной в постановке задачи.

Для первого эксперимента примем поступательную скорость движения рамы, равной нулю ( $V_{пр} = 0$ ), а скорость движения каретки луча по направляющей полосе, равной 0,2 м/с ( $V_{пк} = 0,2$  м/с).

Для второго эксперимента примем поступательную скорость трактора и скорость каретки, равными 0,2 м/с ( $V_{пр} = 0,2$  м/с;  $V_{пк} = 0,2$  м/с).

С помощью виртуальных датчиков САПР SolidWorks получим набор измеренных абсцисс и ординат для точек  $A$  и  $K$  с шагом 0,04 с.

Построим траекторию точки  $A$  для двух скоростных режимов:

1)  $V_{пр} = 0,2$  м/с;

2)  $V_{пк} = 0,2$  м/с (рис. 2).

Для режима  $V_{пр} = 0$  м/с,  $V_{пк} = 0,2$  м/с траектория будет повторять форму опорной полосы с учетом расстояния  $KA$ .

Для получения математической модели движения луча сажающего аппарата достаточно вывести уравнения движения его каретки (точка  $K$ ) при неподвижной системе координат (первый имитационный эксперимент).

Для определения траекторий движения луча сажающего аппарата новых посадочных машин достаточно будет определить перемещение базовой системы координат рамы машины, на которой закреплен посадочный аппарат, и относительно нее по приведенным уравнениям движения произвести расчет. При этом для определения траектории необходимо получить зависимости координат каретки  $X$ ,  $Y$  от времени ( $Z$  принимаем константой, так как раму считаем неподвижной).

### Результаты и их обсуждение

Полученный в результате двух имитационных экспериментов в САПР SolidWorks набор данных, отражающих траекторию движения вершины луча, обрабатываем в Excel и построим графические зависимости для точки  $A$  при величинах  $V_{пр}$  и  $V_{пк}$ , равных 0,2 м/с (рис. 2).

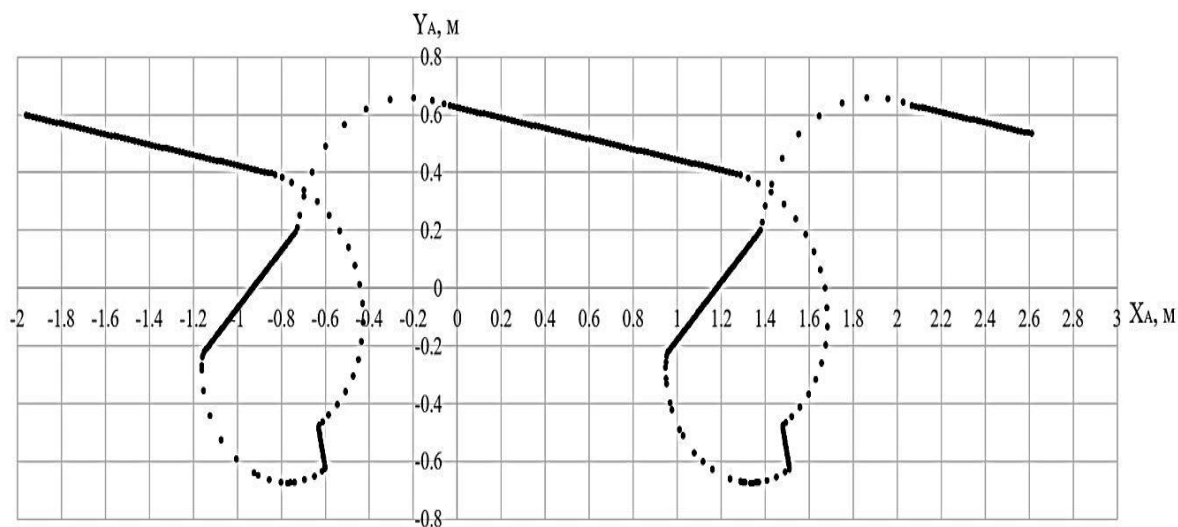
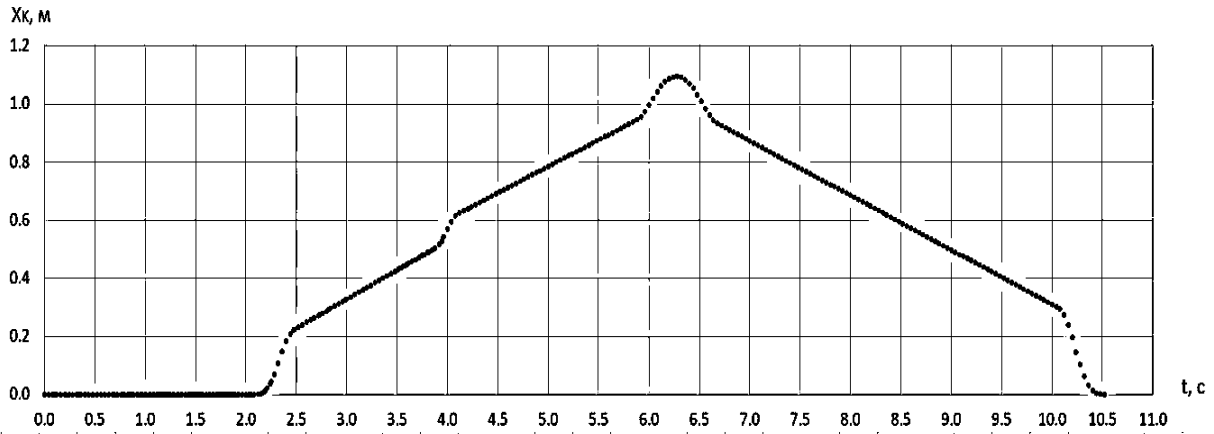


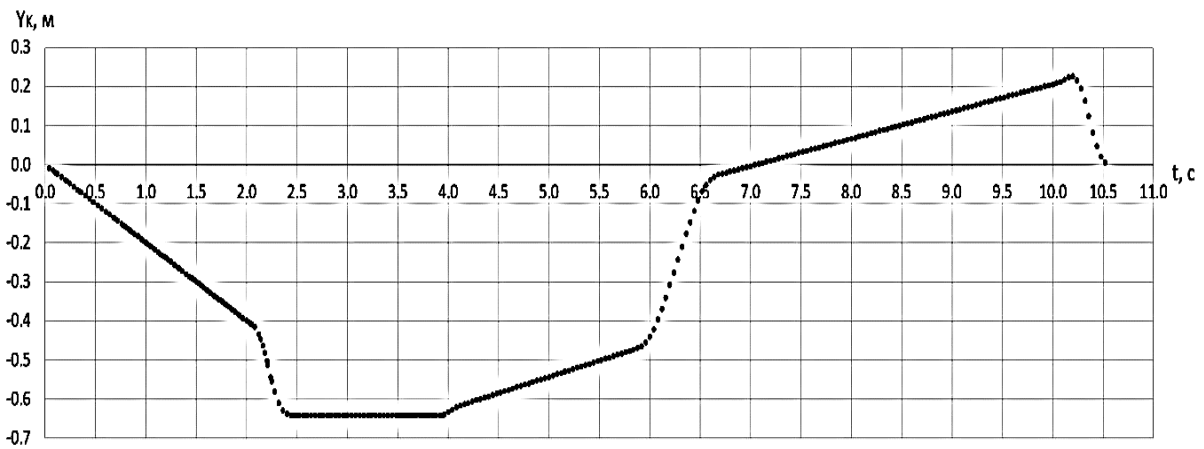
Рис. 2. Траектории движения вершины луча (точка  $A$ )  $V_{пр} = 0,2$  м/с,  $V_{пк} = 0,2$  м/с

При равных скоростях подачи и движения каретки, но направленных в противоположные стороны, в фазе с луч относительно земли будет обладать нулевой скоростью, что позволит опустить сеянец строго вертикально и выдержать требуемый шаг посадки.

Для составления уравнений, описывающих зависимость абсциссы и ординаты точки  $K$ , используем полученный в первом имитационном эксперименте набор данных, для наглядности представим его в виде графиков (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Зависимость абсциссы (а) и ординаты (б) каретки луча (точка К)

Для нахождения начала и конца движения каретки луча на каждой фазе воспользуемся параметром кривизны. Как только разница между текущим и предыдущим значением по абсциссе или ординате меняет свою величину, тогда и фиксируем время начала новой фазы. Обозначения фаз и их параметры по времени сведем в таблицу.

Характеристика фаз движения каретки луча

Наименование фазы	Обозначение начала фазы	Величина, с	Обозначение конца фазы	Величина, с
<i>a</i>	t0	0	t1	2,08
<i>b</i>	t1	2,08	t2	2,48
<i>c</i>	t2	2,48	t3	3,88
<i>d</i>	t3	3,88	t4	4,08
<i>e</i>	t4	4,08	t5	5,80
<i>f</i>	t5	5,80	t6	6,68
<i>g</i>	t6	6,68	t7	10,04
<i>h</i>	t7	10,04	t8	10,52

Проведем аппроксимацию кривых, представленных на рисунке 3, используя линейные уравнения для прямых участков и функции Фурье для криволинейных.

$$x(t) = \begin{cases} 1E-06t+0,0003, & t \in [0, t_1] \\ 0,2257+0,1781 \cdot \cos(t \cdot 4,76)+0,1865 \cdot \sin(t \cdot 4,76)- \\ -0,08575 \cdot \cos(2 \cdot t \cdot 4,76)+0,04372 \cdot \sin(2 \cdot t \cdot 4,76)- \\ -0,03893 \cdot \cos(3 \cdot t \cdot 4,76)-0,02728 \cdot \sin(3 \cdot t \cdot 4,76), & t \in [t_1, t_2] \\ 0,2 \cdot t-0,2717, & t \in [t_2, t_3] \\ 0,5621+0,05912 \cdot \cos(t \cdot 12,18)-0,00604 \cdot \sin(t \cdot 12,18), & t \in [t_3, t_4] \\ 0,1822 \cdot t-0,1262, & t \in [t_0, t_5] \\ 1,013-0,07777 \cdot \cos(t \cdot 6,579)-0,03316 \cdot \sin(t \cdot 6,579), & t \in [t_5, t_6] \\ -0,1874 \cdot t+2,1841, & t \in [t_6, t_7] \\ 0,1145-0,1428 \cdot \cos(t \cdot 5,973)-0,04244 \cdot \sin(t \cdot 5,973)+ \\ +0,02924 \cdot \cos(2 \cdot t \cdot 5,973)+0,02496 \cdot \sin(2 \cdot t \cdot 5,973), & t \in [t_7, t_8] \end{cases} \quad (1)$$

$$y(t) = \begin{cases} -0,2 \cdot t+0,0004, & t \in [0, t_1] \\ 0,659 \cdot \sin \cdot (1,159 \cdot t+14,06)+0,04611 \cdot \sin(11,01 \cdot t+10,04)+ \\ +0,003883 \cdot \sin(30,13 \cdot t+5,269), & t \in [t_1, t_2] \\ -7E-06 \cdot t-0,6417, & t \in [t_2, t_3] \\ 0,6418 \cdot \sin(1,426 \cdot t+55,71), & t \in [t_3, t_4] \\ 0,0829 \cdot t-0,9576, & t \in [t_4, t_5] \\ -0,256+0,03915 \cdot \cos(t \cdot 2,984)+0,2126 \cdot \sin(t \cdot 2,984)+ \\ +0,005386 \cdot \cos(2 \cdot t \cdot 2,984)+0,03314 \cdot \sin(2 \cdot t \cdot 2,984), & t \in [t_5, t_6] \\ 0,0699 \cdot t-0,4928, & t \in [t_6, t_7] \\ 0,1649-0,04471 \cdot \cos(t \cdot 5,874)+0,09284 \cdot \sin(t \cdot 5,874)+ \\ +0,01526 \cdot \cos(2 \cdot t \cdot 5,874)+0,05331 \cdot \sin(2 \cdot t \cdot 5,874), & t \in [t_7, t_8] \end{cases} \quad (2)$$

### Выводы

Представленный подход к исследованию кинематики посадочных машины позволяет увязать проектирование в современных САПР модели машины с обоснованием ее параметров.

На основе результатов проведенного имитационного эксперимента установлены траектории движения сажающего луча и путем аппроксимации получены функциональные зависимости абсциссы и ординаты от времени, которые могут быть напрямую заложены в ПО «Универсальный механизм», с помощью которого можно проводить исследования динамики рабочего органа с учетом силовых воздействий пружин захватов и контактных воздействий роликов о направляющие.

### Список источников

1. Бартенев И.М. Лесопосадочные машины. Теория. Исследование. Конструкции: монография. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет, 2015. 219 с.
2. Бартенев И.М., Бухтояров Л.Д., Попиков В.П., Придворова А.В. Имитационная модель обрезчика ветвей в САПР // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10, № 1(37). С. 153–160. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/20.

3. Беляев А.Н., Оробинский В.И., Шацкий В.П. и др. Определение теоретической траектории движения трактора при повороте «крабом» // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13, № 1(64). С. 42–49. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.1.42.

4. Беляев А.Н., Тришина Т.В., Новиков А.Е. и др. Исследование движения колесной машины по криволинейной траектории // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т. 14, № 4(71). С. 21–29. DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2021\_4\_21.

5. Беляев А.Н., Шацкий В.П., Тришина Т.В. и др. Оценка эффективности применения комбинированного способа поворота трактора // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13, № 2(65). С. 39–48. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.2.39.

6. Жданов Ю.М. Исследование и обоснование технологии заделки корневой системы семян и параметров заделывающих элементов лесопосадочных машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00. Волгоград, 1969. 196 с.

7. Захват к посадочному аппарату лесопосадочной машины: пат 2156560 Рос. Федерация. № 97115083/13; заявл. 20.08.1997; опубл. 27.09.2000, Бюл. № 27. 5 с.

8. Стасюк В.В. Защита подающих ротационных аппаратов лесопосадочных машин от перегрузок предохранителями повышенной точности срабатывания: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2002. 175 с.

9. Титов П.И. Совершенствование технологического процесса и конструкции лесопосадочной машины для питомников: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2006. 151 с.

10. Шабанов М.Л. Обоснование параметров сошника и рациональной компоновки рабочих органов лесопосадочной машины: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2002. 152 с.

11. Шавков М.В. Обоснование параметров комбинированного сошника лесопосадочной машины: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2013. 212 с.

12. Bukhtoyarov L.D., Drapalyuk M.V., Pridvorova A.V. Simulation of the movement of hedge cutter links in the Simulink application of the Matlab package // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum on Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions (Voronezh, September 09-10, 2021). IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 875. Article No. 12004. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012004.

13. Niculescu M., Andrei L., Cristescu A. Generation of noncircular gears for variable motion of the crank-slider mechanism // IOP Conference. Series: Materials, Science and Engineering. 2016. Vol. 147(1). Article No. 012078. DOI: 10.1088/1757-899x/147/1/012078.

14. Shen H., Liu Y., Wu H. et al. Forward and Inverse Kinematics for a Novel Double Scara Robot // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 170(4). Article No. 042088. DOI: 10.1088/1755-1315/170/4/042088.

## References

1. Bartenev I.M. Lesoposadochnye mashiny. Teoriya. Issledovanie. Konstruktsii: monografiya [Timber planting machines. Theory. Study. Constructions: monograph]. Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies Press; 2015. 219 p. (In Russ.).

2. Bartenev I.M., Buhtoyarov L.D., Popikov V.P., Pridvorova A.V. Imitatsionnaya model' obrezchika vetvej v SAPR [CAD simulator model of a cutter]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*. 2020;10(1):153-160. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/20. (In Russ.).

3. Belyaev A.N., Orbinsky V.I., Shatsky V.P. et al. Opredelenie teoreticheskoy traektorii dvizheniya traktora pri povorote "krabom" [Determination of an ideal trajectory of the tractor motion at "crab" type turning maneuver]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020;13(1):42-49. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.1.42. (In Russ.).

4. Belyaev A.N., Trishina T.V., Novikov A.E. et al. Issledovanie dvizheniya kolesnoj mashiny po krivolinejnoj traektorii [Investigation of the movement of a wheeled vehicle along a curved trajectory]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021; 14(4):21-29. DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2021\_4\_21. (In Russ.).

5. Belyaev A.N., Shatsky V.P., Trishina T.V. et al. Otsenka effektivnosti primeneniya kombinirovannogo sposoba povorota traktora [Assessment of feasibility of the combined method of the tractor steering motion]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2020;13(2):39-48. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.2.39. (In Russ.).

6. Zhdanov Yu.M. Issledovanie i obosnovanie tehnologii zadelki kornevoj sistemy seyantsev i parametrov zadelyvayushchikh elementov lesoposadochnykh mashin [Research and substantiation of the technology of seedling root system incorporation and parameters of the incorporating elements of forest planting machines]: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.00.00 = Candidate Dissertation in Engineering Sciences: 05.00.00. Volgograd; 1969. 196 p. (In Russ.).



7. Zakhvat k posadochnomu apparatu lesoposadochnoj mashiny [Capture to the landing gear of a forest planter]: patent 2156560 Ros. Federatsiya. № 97115083/13; zayavleno 08.20.1997; opublikovano 09.27.2000, Byul. № 27 = Patent 2156560 Russian Federation. No. 97115083/13; claimed 08.20.1997; published 09.27.2000, Bulletin 27. 5 p. (In Russ.).

8. Stasyuk V.V. Zashhita podayushhikh rotatsionnykh apparatov lesoposadochnykh mashin ot peregruzok predokhranitelnyami povyshennoj tochnosti srabatyvaniya [Protection of feeding rotary devices of forest planters from overloads by fuses of increased accuracy of operation]: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.21.01 = Candidate Dissertation in Engineering Sciences: 05.21.01. Voronezh; 2002. 175 p. (In Russ.).

9. Titov P.I. Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo protsessa i konstruktсии lesoposadochnoj mashiny dlya pitomnikov [Improving the technological process and design of a tree planting machine for nurseries]: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.21.01 = Candidate Dissertation in Engineering Sciences: 05.21.01. Voronezh; 2006. 151 p. (In Russ.).

10. Shabanov M.L. Obosnovanie parametrov soshnika i ratsional'noj komponovki rabochikh organov lesoposadochnoj mashiny [Substantiation of the parameters of the coulter and the rational layout of the working bodies of the forest planter]: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.21.01 = Candidate Dissertation in Engineering Sciences: 05.21.01. Voronezh; 2002. 152 p. (In Russ.).

11. Shavkov M.V. Obosnovanie parametrov kombinirovannogo soshnika lesoposadochnoj mashiny [Substantiation of the parameters of the combined coulter of a forest planting machine]: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.21.01 = Candidate Dissertation in Engineering Sciences: 05.21.01. Voronezh; 2013. 212 p. (In Russ.).

12. Bukhtoyarov L.D., Drapalyuk M.V., Pridvorova A.V. Simulation of the movement of hedge cutter links in the Simulink application of the Matlab package. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum on Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions* (Voronezh, September 09–10, 2021). IOP Publishing Ltd. 2021;875:12004. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012004.

13. Niculescu M., Andrei L., Cristescu A. Generation of noncircular gears for variable motion of the crank-slider mechanism. *IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering*. 2016;147(1):012078. DOI: 10.1088/1757-899x/147/1/012078.

14. Shen H., Liu Y., Wu H. et al. Forward and Inverse Kinematics for a Novel Double Scara Robot. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;170(4):042088. DOI: 10.1088/1755-1315/170/4/042088.

### Информация об авторах

Л.Д. Бухтояров – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», vglta-mlx@yandex.ru, b.leonid@vgtu.ru.

С.В. Малюков – кандидат технических наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», malyukovsergey@yandex.ru.

М.Н. Лысыч – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», miklynea@yandex.ru.

### Information about the authors

L.D. Bukhtoyarov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, vglta-mlx@yandex.ru, b.leonid@vgtu.ru.

S.V. Malyukov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Forest Management and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, malyukov-sergey@yandex.ru.

M.N. Lysych, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, miklynea@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 12.02.2023; одобрена после рецензирования 20.03.2023; принята к публикации 28.03.2023.

The article was submitted 12.02.2023; approved after reviewing 20.03.2023; accepted for publication 28.03.2023.

© Бухтояров Л.Д., Малюков С.В., Лысыч М.Н., 2023