



DOI: 10.15393/j2.art.2021.5643

УДК 630\*307

Статья

## **Математическая модель динамических режимов гидроманипулятора при удалении нежелательной растительности с корнем в молодых лесонасаждениях**

**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: 27 января 2021 / Принята: 4 июня 2021 / Опубликовано: 10 июня 2021*

---

**Аннотация:** При выращивании полноценных и долговременных лесных культур к одному из мероприятий по уходу за искусственно воспроизводимым лесом относится организация и выполнение работ по его осветлению. Срезание или вырубание нежелательной древесно-кустарниковой поросли ручным или механизированным способом зачастую приводит к её возобновлению ввиду оставшихся в почве корней. Одним из перспективных способов механизированного осветления лесных культур, обеспечивающим невозобновление произрастания нежелательной растительности 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 траекторий движения характерных

точек звеньев манипулятора и крайних точек выдернутой поросли, авторы в данной статье, с целью определения оптимальных значений конструктивных и технологических параметров манипулятора с размещённым на его конце рабочим органом, разработали математическую модель, учитывающую ряд динамических режимов воздействия указанных технических средств на нежелательную поросль. Выполненное в данном исследовании моделирование было основано в целом на методах классической механики. Для обоснования динамических параметров манипулятора и рабочего органа авторами разработан ряд расчётных схем с указанием координат расположения центров тяжести элементов манипулятора, действующих внешних сил (в том числе, движущих моментов и моментов сопротивления, а также сил трения и сил тяжести). Авторами составлен ряд дифференциальных уравнений движения элементов манипулятора, зависящих от времени, показаны зависимости для моментов инерции данных элементов, создана имитационная модель манипулятора при его воздействии на поросль в среде динамического моделирования сложных технических систем. На основании разработанной математической модели для ряда начальных условий рассчитаны массовые характеристики звеньев манипулятора, построен ряд графиков динамического воздействия на элементы манипулятора, сделаны выводы и определены направления дальнейшего применения полученной имитационной модели.

**Ключевые слова:** нежелательная поросль, удаление, манипулятор, моделирование, дифференцирование, динамические параметры

---

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5643

Article

## **Mathematical model of the dynamic modes of the hydraulic manipulator performance when uprooting unwanted vegetation in young forest stands**

**Petr Popikov**

*D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), [popikovpetr@yandex.ru](mailto: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), [vglta-mlx@yandex.ru](mailto:vglta-mlx@yandex.ru)*

**Alexey Platonov**

*Ph. D. in engineering, associate professor, Rostov State Transport University (Russian Federation), [paa7@rambler.ru](mailto: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](mailto:vakula.lena2012@yandex.ru)*

*Received: 27 January 2021 / Accepted: 4 June 2021 / Published: 10 June 2021*

---

**Abstract:** Homogeneous forest clearing is one of the required measures to grow sound and enduring forest. Manual or mechanized cutting or felling down unwanted trees and shrubs often results in their regeneration as the roots remain in the soil. To ensure non-regeneration of unwanted vegetation its root system should be removed. One of the promising methods of mechanized clearing of forest cultures is a method of removing unwanted growth with a working body fixed at the end of the arm of the manipulator of a multifunctional machine. The authors have modeled the trajectories of characteristic points' movements of the manipulator links and the extreme points of the removed vegetation. They also have developed a mathematical model that takes into account a number of dynamic modes of influence of the specified technical means on unwanted growth to determine the optimal values of the design and technological parameters of the manipulator with a working body located at its end. The modeling performed in this study was based on the methods of classical mechanics. To substantiate the dynamic parameters of the manipulator and the working body, the authors have developed a number of calculation schemes indicating the coordinates of the gravity centers location of the

manipulator elements, acting external forces including driving moments and moments of resistance, as well as friction and gravity forces. The authors have compiled a number of differential equations of the time-dependent manipulator elements motion, have revealed the dependences for the moments of inertia of these elements, and have created a dynamical simulation model of the manipulator performance. Based on the developed mathematical model for a number of initial conditions, the mass characteristics of the manipulator links were calculated, a number of graphs of the dynamic impact on the manipulator elements was built, conclusions were drawn and directions for further application of the obtained simulation model were determined.

**Keywords:** unwanted growth, removal, manipulator, modeling, differentiation, dynamic parameters

---

## 1. Введение

В настоящее время в России происходит переход к так называемому интенсивному лесному хозяйству, предусматривающему целую серию мероприятий по уходу за выращиваемым лесом [1]. В соответствии с интенсивной моделью ведения лесного хозяйства [2] после изъятия спелой древесины на соответствующем участке должно начинаться культивирование нового леса с заранее заданным породным составом и густотой, при этом после рубки предусмотрено проведение минимум шести таких мероприятий, как подготовка почвы, восстановление леса (посевом, посадкой или иначе), проведение агротехнического ухода, осветления, прочисток и коммерческих рубок ухода (при которых возможна заготовка хозяйственно-ценной древесины). Отдельное внимание, на наш взгляд, следует уделить такому приёму выращивания полноценных и долговременных лесных культур [3], как осветление [4], от качественного выполнения которого зависит полноценное открытие пространства для роста основного древостоя в фазе его смыкания [1], при этом процесс выполнения осветления сопровождается регулированием густоты произрастания деревьев главной породы.

В целом, осветление культур, проводимое с 3—5-го года (а в отдельных случаях — и на 2-м году после посадки), может выполняться как ручным (фото 1, *а*), так и механизированным способом (фото 1, *б*) с использованием различных средств механизации [5], [6]. В частности, для срезания поросли могут применяться кусторезы ручные и тракторные с пассивными и активными рабочими органами, кусторезы с активными рабочими органами КОГ-2.3, КОМ-2.3, КОН-2.3, КО-1.5 и т. д.



**Фото 1.** Различные средства механизации осветления лесных культур

**Foto 1.** Various means of mechanization of forest vegetation clearing

Однако независимо от способа механизации (ввиду наличия оставшихся после осветления лесных культур в почве корней нежелательной растительности) поросль продолжает развиваться, что снижает сроки очередного проведения осветления. С учётом этого нам представляется актуальным проведение дополнительных исследований, направленных

на устранение имеющихся недостатков в существующих способах и средствах удаления нежелательной растительности.

**Целью исследования** является повышение эффективности удаления нежелательной растительности с корнем при осветлении лесных культур путём обоснования параметров динамических режимов приводного органа на основе математического и имитационного моделирования.

## 2. Материалы и методы

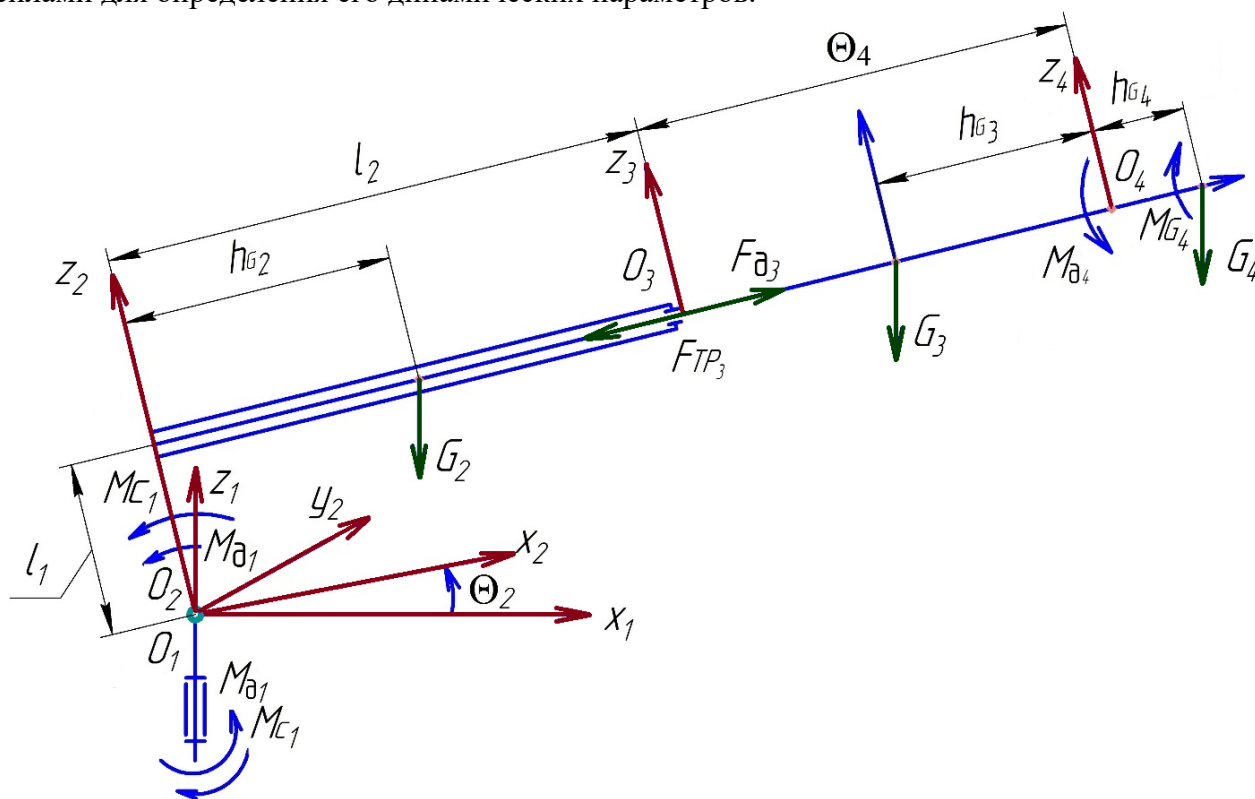
Одним из перспективных способов механизированного осветления лесных культур, обеспечивающим невозобновление произрастания нежелательной растительности на очищаемой территории, является способ удаления нежелательной поросли вместе с корневой системой (фото 1, в), что, как отмечается в работе [7], помогает сдерживать рост смешанной поросли лиственных пород в насаждениях уже на этапе достижения ею высоты 1 м и даёт возможность обеспечить всеми ресурсами роста только оставляемый древостой. Кроме того, подобные воздействия на нежелательную поросль способствуют увеличению производительности труда и в целом — повышению качества осветления лесных культур [8].

Учитывая, что подобное непосредственное воздействие на нежелательную растительность осуществляется рабочим органом, закреплённым на конце рукояти стрелы-манипулятора, нами в исследовании [9] была создана имитационная модель рабочего процесса манипулятора при удалении нежелательной растительности вместе с корневой системой в лесных насаждениях, позволяющая получить траектории движения характерных точек звеньев манипулятора и крайних точек выдернутой поросли.

Отметим, что на современном этапе развития науки и техники вопросами моделирования сложных систем или процессов (в т. ч. работы машин с манипуляторными установками [10]) продолжает заниматься ряд как отечественных (например, [11], [12]), так и зарубежных [13] учёных. При этом в публикации [9] нами была отмечена недостаточная изученность вопроса моделирования динамических параметров рабочего процесса малошвенного манипулятора с закреплённым на конце его стрелы рабочим органом. С учётом этого для определения оптимальных значений конструктивных и технологических параметров рассматриваемого в данной работе манипулятора с размещённым на его конце рабочим органом нами (согласно нашему патенту на изобретение № 2642180 [8]) была разработана математическая модель процесса воздействия указанных технических средств на нежелательную поросль, обеспечивающая высокие характеристики производительности [14], [15] и качества работы как самого манипулятора, так и рабочего органа. Выполненное в данном исследовании моделирование было основано в целом на методах классической механики [16].

### 3. Результаты

На рис. 1 приведена расчётная схема манипулятора со всеми действующими внешними силами для определения его динамических параметров.



**Рисунок 1.** Схема манипулятора со всеми действующими внешними силами

**Figure 1.** Diagram of a manipulator with all external active forces

На данной схеме  $G_2$ ,  $G_3$  и  $G_4$  — силы тяжести элементов манипулятора;  $h_{G_2}$ ,  $h_{G_3}$  и  $h_{G_4}$  — координаты расположения центра тяжести элементов манипулятора;  $M_{д1}$ ,  $M_{д2}$ ,  $M_{д3}$  и  $M_{д4}$  — движущие моменты и моменты сопротивления;  $M_{С1}$  и  $M_{С2}$  — движущие моменты и моменты сопротивления;  $F_{д3}$ ,  $F_{TP3}$  — движущая и сила трения элемента манипулятора, перемещающегося поступательно.

Составляем дифференциальные уравнения движения элементов манипулятора  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$  и  $\Theta_4$ , зависящих от времени  $t$ .

Для перемещения  $\Theta_2$  дифференциальное уравнение движения элементов манипулятора имеет вид:

$$J_{y_2} \cdot \frac{d^2 \cdot \Theta_2}{dt^2} = \sum m(y_2) \quad (1)$$

где  $J_{y_2}$  — момент инерции всего манипулятора относительно оси  $y_2$ ;

$\sum m(y_2)$  — сумма моментов всех внешних сил относительно оси  $y_2$ ;

$$\begin{aligned} \sum m(y_2) &= M_{\partial_1} - M_{c_1} - G_2 \cdot (\sin \Theta_2 - l_1 \cdot \cos \Theta_2) - G_3 \cdot ((l_2 + \Theta_4 - h_{G_3}) \cdot \sin \Theta_2 - \\ &\quad - l_1 \cdot \cos \Theta_2) - G_4 \cdot ((l_2 + \Theta_4 + h_{G_4}) \cdot \sin \Theta_2 - l_1 \cdot \cos \Theta_2) = \\ &= M_{\partial_1} - M_{c_1} - (G_2 \cdot h_{G_2} + G_3 \cdot (l_2 + \Theta_4 - h_{G_3}) - G_4 \cdot (l_2 + \Theta_4 + h_{G_4})) \times \\ &\quad \times \sin \Theta_2 + (G_2 \cdot l_1 + G_3 \cdot l_1 + G_4 \cdot l_1) \cdot \cos \Theta_2 = A - B \cdot \sin \Theta_2 + C \cdot \cos \Theta_2 \end{aligned} \quad (2)$$

В данной формуле введём обозначения:

$$A = M_{\partial_1} - M_{c_1} = const;$$

$$B = G_2 \cdot h_{G_2} + G_3 \cdot (l_2 + \Theta_4 - h_{G_3}) - G_4 \cdot (l_2 + \Theta_4 + h_{G_4});$$

$$C = (G_2 + G_3 + G_4) \cdot l_1 = const;$$

$$C = (G_2 + G_3 + G_4) \cdot l_1 = const$$

$$B = B(\Theta_4) = B(t).$$

Преобразуем величину момента инерции  $J_{y_2}$ :

$$\begin{aligned} J_{y_2} &= m_2 \cdot (h_{G_2} \cdot \sin \Theta_2 - l_1 \cdot \cos \Theta_2)^2 + m_3 \cdot ((l_2 + \Theta_4 - h_{G_3}) \cdot \sin \Theta_2 - \\ &\quad - l_1 \cdot \cos \Theta_2)^2 + m_4 \cdot ((l_2 + \Theta_4 + h_{G_4}) \cdot \sin \Theta_2 - l_1 \cdot \cos \Theta_2)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом,

$$\sum m(y_2) = f(\Theta_2; \Theta_4), \quad (4)$$

$$J_{y_2} = f(\Theta_2; \Theta_4) \quad (5)$$

Для перемещения  $\Theta_4$  уравнение имеет вид:

$$(m_3 + m_4) \cdot \frac{d^2 \cdot \Theta_2}{dt^2} = -\sum F_{i x_3} = F_{\partial_3} - F_{TP_3} - (G_3 + G_4) \cdot \sin \Theta_2 \quad (6)$$

$$F_{TP_3} = (G_3 + G_4) \cdot f \cdot \cos \Theta_2 \quad (7)$$

где  $f$  — коэффициент трения выдвигной стрелы.

$$(m_3 + m_4) \cdot \frac{d^2 \cdot \Theta_2}{dt^2} = F_{\partial_3} - (G_3 + G_4) \cdot (\sin \Theta_2 + f \cdot \cos \Theta_2) \quad (8)$$

$$\frac{d^2 \cdot \Theta_2}{dt^2} = \frac{F_{\partial_3}}{m_3 + m_4} - g \cdot (\sin \Theta_2 + f \cdot \cos \Theta_2) \quad (9)$$

Для перемещения  $\Theta_3$  уравнение имеет вид:

$$J_{x_4} \cdot \frac{d^2 \cdot \Theta_3}{dt^2} = \sum m_{x_4} = M_{g_4} - M_{c_4} \quad (10)$$



где  $J_{x_4}$  — момент инерции груза относительно оси  $x_4$ .

$$\frac{d^2 \cdot \Theta_3}{dt^2} = \omega_4 = E_4 \cdot t + c_1 \quad (11)$$

$$\Theta_3 = E \cdot \frac{t^2}{2} + c_1 + c_2 \quad (12)$$

Из начальных параметров при  $t = 0$ ,  $\omega_3 = 0$  и  $\Theta_3 = 0$  (груз находился в покое):  $c_1 = c_2 = 0$ ;  
 $\omega_3 = E \cdot t$ ;  $\Theta_3 = E \cdot t^2 / 2$ .

Для перемещения  $\Theta_1$  уравнение имеет вид:

$$J_{z_1} \cdot \frac{d^2 \cdot \Theta_1}{dt^2} = \sum m(z_1) = M_{\partial_1} - M_{c_1} \quad (13)$$

$$J_{z_1} = m_2 \cdot (h_{G_2} \cdot \sin \Theta_2 - l_1 \cdot \cos \Theta_2)^2 + m_3 \cdot ((l_2 + \Theta_4 - h_{G_3}) \cdot \sin \Theta_2 - l_1 \cdot \cos \Theta_2)^2 + m_4 \cdot ((l_2 + \Theta_4 + h_{G_4}) \cdot \sin \Theta_2 - l_1 \cdot \cos \Theta_2)^2 \quad (14)$$

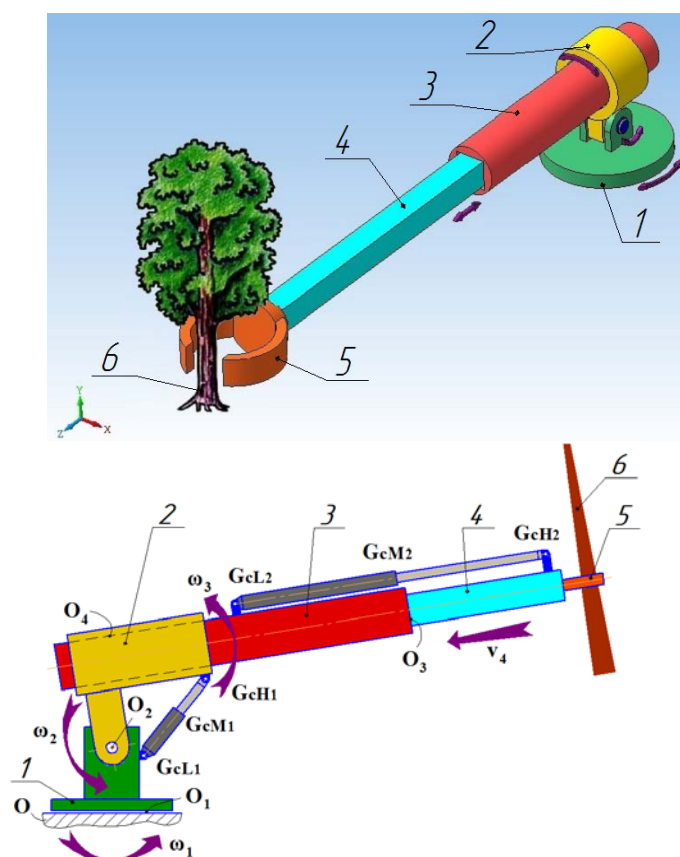
Таким образом,

$$\sum m(z_1) = M_{\partial_1} - M_{c_1} = const \quad (15)$$

$$J_{z_1} = f(\Theta_2; \Theta_4) \quad (16)$$

Отметим, что решить эти уравнения можно только численными методами моделирования механизмов, которые реализуются через языки программирования путём детального описания изучаемого процесса. Кроме того, в соответствии с работой [17] возможно применение современных систем автоматизированного проектирования, в которых численные методы встроены на уровне ядра программы и требуют от учёного задания основных геометрических, динамических и кинематических параметров как соответствующего механизма, так и окружающей среды преимущественного его применения, после чего выполняется расчёт параметров функционирования исследуемого объекта.

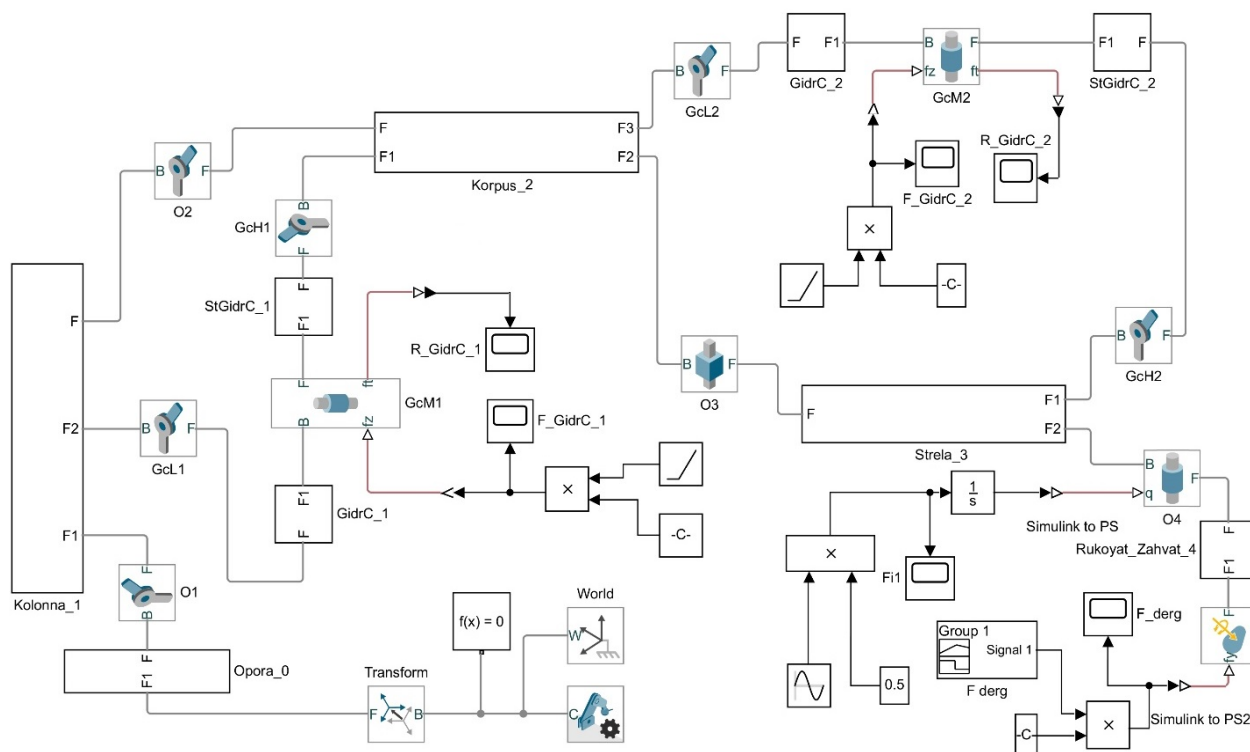
На рис. 2 и 3 представлены разработанные нами расчётная схема и имитационная модель манипулятора для выдёргивания молодых деревьев и кустарников.



**Рисунок 2.** Расчётная схема манипулятора при воздействии на поросль

**Figure 2.** Design scheme of the manipulator when acting on the underbrush

В мировой системе координат World (рис. 3) неподвижно закреплена опора 0, сила тяжести направлена вниз по оси OZ. Колонна 1 соединена с опорой 0 кинематической парой O1 с одной вращательной степенью свободы. Колонна 1 соединена с корпусом 2 кинематической парой O2 с одной вращательной степенью свободы. Стрела 3 соединена с рукоятью 4 кинематической парой O3 с одной поступательной степенью свободы. Рукоять 4 с захватом 5, в котором находится дерево 6, соединена с корпусом 2 кинематической парой с одной вращательной степенью свободы. Корпус 2 приводится в движение за счёт давления рабочей жидкости на шток гидроцилиндра. Поступательная кинематическая пара между штоком и цилиндром для гидроцилиндра корпуса обозначена как GcM1. Гидроцилиндр движения (фактически поворота) корпуса манипулятора прикреплён к колонне и корпусу вращательными кинематическими парами GcL1 и GcH1 соответственно. Гидроцилиндр возвратно-поступательного движения рукояти прикреплён к стреле и рукояти вращательными кинематическими парами GcL2 и GcH2 соответственно, при этом поступательная кинематическая пара между штоком и цилиндром для гидроцилиндра рукояти обозначена как GcM2.



**Рисунок 3.** Имитационная модель манипулятора при воздействии на поросль

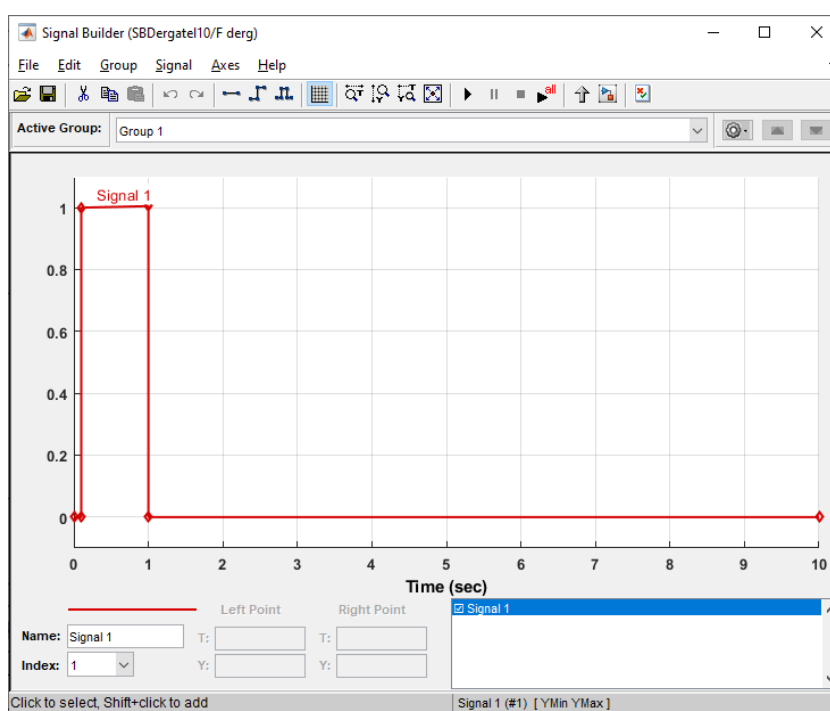
**Figure 3.** Simulation model of the manipulator when acting on the underbrush

Принимаем для примера начальные условия моделирования: скорость поворота колонны 10 град./с; сила подъёма штока гидроцилиндра корпуса  $F_{GidrC\_1} = 25$  кН; сила возврата штока гидроцилиндра рукояти  $F_{GidrC\_2} = 15$  кН; сила выдёргивания ствола из почвы  $F_{derg} = 1000$  Н. Вращение захвата со стволом относительно его оси носит колебательный синусоидальный характер и находится в пределах 90 градусов. Результаты расчётов представлены в таблице и на рис. 4—6.

**Таблица.** Массовые характеристики звеньев манипулятора

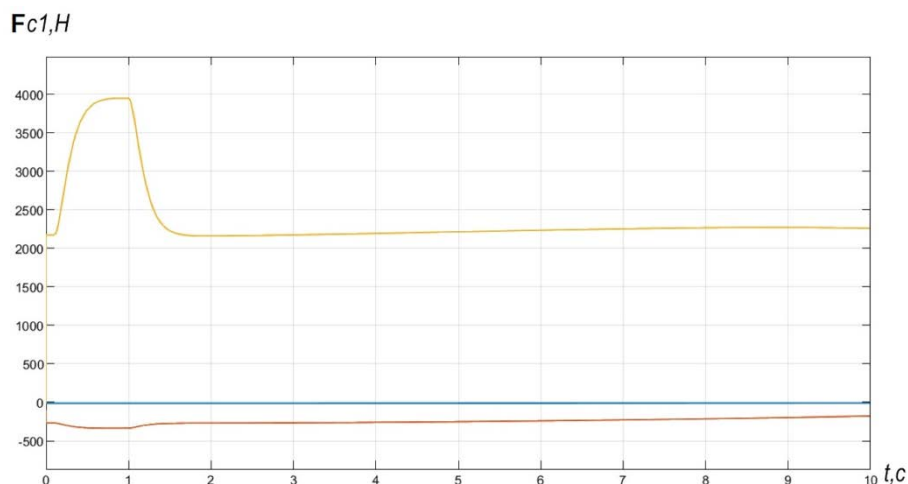
**Table.** Mass characteristics of manipulator links

Характеристики		Наименование звеньев			
		Колонна	Стрела	Рукоять	Захват с деревом
Центр тяжести, м	X	0	0,84	2,23	2,85
	Y	0	0,16	0,43	0,54
	Z	0,94	1,82	1,78	0,01
Оси инерции, кг·м <sup>2</sup>	$I_x$	(0, 0, 1)	(0,98, 0,19, -0,03)	(0,98, 0,19, -0,02)	(0,05, 0 1)
	$I_y$	(0,19, -0,98, 0)	(-0,03, -0,01, -1)	(-0,02, 0, -1)	(0,19, -0,98, -0,01)
	$I_z$	(0,98, 0,19, 0)	(-0,19, 0,98, 0)	(-0,19, 0,98 0)	(0,98, 0,19, -0,05)
Моменты инерции, кг·м <sup>2</sup>	$P_x$	1,48	0,81	0,42	0,02
	$P_y$	20,96	20,18	3,93	0,24
	$P_z$	21,01	20,52	4,11	0,24
Масса, кг	$m$	67,62	61,82	34,7	4,65



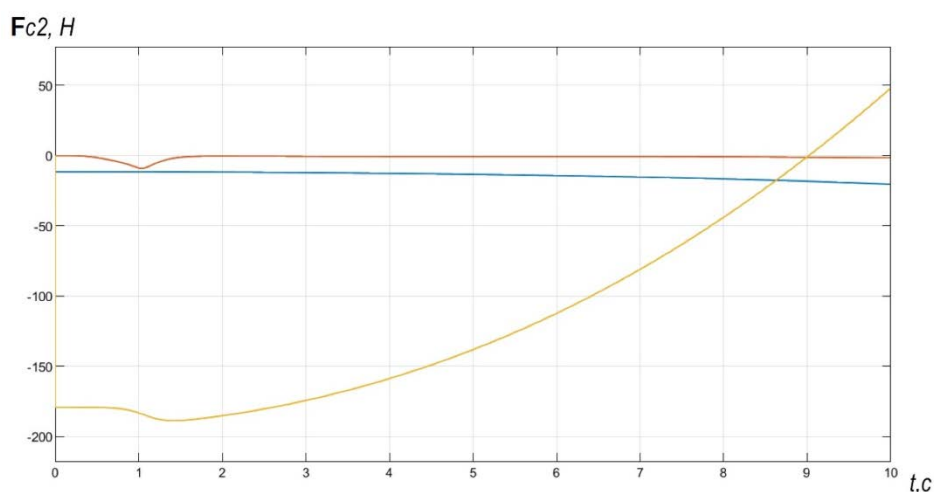
**Рисунок 4.** Опорный сигнал, описывающий воздействие силы выдёргивания на ствол

**Figure 4.** Reference signal describing the effect of pulling force on the tree stem



**Рисунок 5.** Сила в поступательной кинематической паре GcM1 на процесс подъёма дерева (по трём осям: жёлтый — вдоль оси цилиндра, синий — перпендикулярно шарниру, коричневый — перпендикулярно плоскости выдвижения гидроцилиндра)

**Figure 5.** Reaction in the sliding pair GcM1 on the process of lifting a tree (along three axes: yellow – along the axis of the cylinder, blue – perpendicular to the hinge, brown – perpendicular to the plane of extension of the hydraulic cylinder)



**Рисунок 6.** Реакция в поступательной кинематической паре GcM2 на процесс подъёма дерева (по трём осям: жёлтый — вдоль оси цилиндра, синий — перпендикулярно шарниру, коричневый — перпендикулярно плоскости выдвижения гидроцилиндра)

**Figure 6.** Reaction in the sliding pair GcM2 on the process of lifting a tree (along three axes: yellow – along the axis of the cylinder, blue – perpendicular to the hinge, brown – perpendicular to the plane of extension of the hydraulic cylinder)

В качестве пояснений к вышеприведённым рисункам отметим, что при воздействии силы от выдёргивания  $F_{\text{дерг}}$  на ствол она вызывает резкий скачек давления (рис. 6) в гидроцилиндре подъёма в плоскости выдвижения гидроцилиндра, в то же время корпус связан с поворотной колонной не только через шарнир гидроцилиндра, но и через кинематическую пару  $O_2$ , которая сводит к нулю силу, перпендикулярную шарниру гидроцилиндра, а усилия на изгиб, возникающие в гидроцилиндре, находятся в пределе  $-300$  Н. Гидроцилиндр возвратно-поступательного движения рукояти работает на втягивание (знак минус у силы), но при повороте колонны возникают центробежные силы от захвата с деревом, которые компенсируют усилие втягивания и приводят к его плавному увеличению. Изменения силы по двум другим осям незначительны по величине и не оказывают существенного влияния на работу.

#### 4. Обсуждение и заключение

Для исследования повышения эффективности применения манипулятора для удаления нежелательной растительности с корнем в лесных культурах и обоснования параметров динамических режимов нами разработаны математическая и имитационная модели рабочих процессов, позволяющие полностью воспроизводить динамику реального манипулятора с возможностью исследования операций подъёма стрелы, выдвижения рукояти, поворот колонны, а также совмещения их различных комбинаций.

На основе разработанной имитационной модели для ряда начальных условий рассчитаны массовые характеристики звеньев манипулятора, построен ряд графиков динамического воздействия на элементы манипулятора и определены направления дальнейшего применения полученной имитационной модели.

Важным преимуществом полученной имитационной модели является возможность визуального контроля параметров в реальном времени и наличие функций создания анимации рабочего процесса. Это позволяет оценить правильность работы имитационной модели и проработать оптимальные динамические режимы движения манипулятора.

#### Список литературы

1. Марковский А. В., Родионов А. В. Рубки ухода в молодняках. Интенсификация обучения // ЛесПромИнформ. 2020. № 1 (147). С. 62—65.
2. Григорьев И. В., Григорьева О. И. Комментарии к Правилам ухода за лесами 2018 года // ЛесПромИнформ. 2018. № 1 (131). С. 56—61.
3. Основы создания лесных культур на среднем Урале / О. В. Толкач, Г. Г. Терехов, И. А. Фрейберг, В. Н. Луганский // Лесоведение. 2020. № 6. С. 515—522.
4. Некоторые аспекты последствий осветлений в кедровых культурах / Н. М. Дебков, Т. Ю. Карташова, Е. С. Залесова, Л. А. Белов, А. С. Оплетаев, Ф. Т. Тимербулатов // Леса России и хозяйство в них. 2018. № 3 (66). С. 21—28.
5. Лушников М. В. Совершенствование технологического процесса и обоснование основных параметров ротационно-консольного кустореза для осветления лесных культур

- на нераскорчёванных вырубках: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Саратов, 2001. 16 с.
6. *Бартенев И. М., Драпалюк М. В., Казаков В. И.* Совершенствование технологий и средств механизации лесовосстановления: [монография]. М.: ФЛИНТА-Наука, 2013. 208 с.
  7. *Киискинен П., Савонен Х., Томпери Т.* Механизация лесохозяйственных работ. Опыт работы специалистов лесного хозяйства Финляндии // *ЛесПромИнформ*. 2015. № 6 (112). С. 133—141.
  8. 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.
  9. Имитационная модель рабочего процесса манипулятора при удалении нежелательной растительности вместе с корневой системой в лесных насаждениях / П. И. Попиков, Л. Д. Бухтояров, А. А. Платонов, Е. Ю. Вакула // *Resources and Technology*. 2020. Т. 17, № 4. С. 1—14. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5402.
  10. *Иванов А. В.* Манипулятор как многопараметрический объект управления // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2007. № 181. С. 116—120.
  11. *Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование: [монография] / И. М. Бартенев, З. К. Емтыль, А. П. Татаренко, М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, Л. Д. Бухтояров.* М.: Флинта-Наука, 2011. 408 с.
  12. *Придворова А. В., Костенко Р. С., Савченко А. С.* Математическая модель взаимодействия пильного диска кустореза манипуляторного типа с древесной растительностью // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2018. Т. 6, № 7 (43). С. 104—108.
  13. Mechanical site preparation for forest restoration / M. Löf, D. Dey, C. M. Navarro, D. F. Jacobs // *New Forests*. 2012. No. 43 (5-6). 825 p. DOI: 10.1007/s11056-012-9332-x.
  14. *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.
  15. Пути повышения эффективности работы лесных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов, А. Б. Давтян // *Энергия: экономика, техника, экология*. 2020. № 1. С. 55—63.
  16. *Советов Б. Я., Яковлев С. А.* Моделирование систем: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1998. 319 с.
  17. *Дьяконов В. П.* Simulink 5/6/7: самоучитель. М.: ДМК-Пресс, 2008. 784 с.

## References

1. Markovsky A. V., Rodionov A. V. Thinning in young stands. Intensification of training. *LesPromInform*, 2020, no. 1 (147), pp. 62—65. (In Russ.)
2. Grigoriev I. V., Grigorieva O. I. Comments to the 2018 Forest Care Rules. *LesPromInform*, 2018, no. 1 (131), pp. 56—61. (In Russ.)
3. Tolkach O. V., Terekhov G. G., Freiberg I. A., Luganskiy V. N. Fundamentals of the creation of forest cultures in the middle Urals. *Lesovedenie*, 2020, no. 6, pp. 515—522. (In Russ.)
4. Debkov N. M., Kartashova T. Yu., Zalesova E. S., Belov L. A., Opletaev A. S., Timerbulatov F. T. Some aspects of the consequences of clarification in cedar crops. *Forests of Russia and economy in them*, 2018, no. 3 (66), pp. 21—28. (In Russ.)
5. Lushnikov M. V. *Improvement of the technological process and substantiation of the main parameters of the rotary-cantilever brush cutter for lightening forest cultures in unrooted clearings: author. diss. ... cand. tech. sciences: 05.21.01. Saratov, 2001. 16 p.* (In Russ.)

6. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V., Popikov P. I., Bukhtoyarov L. D. *Designs and parameters of machines for clearing forest areas*: monograph. Moscow, Flinta-Nauka, 2007. 208 p. (In Russ.)
7. Kiiiskinen P., Savonen H., Tomperi T. Mechanization of forestry works. Work experience of forestry specialists in Finland. *LesPromInform*, 2015, no. 6 (112), pp. 133—141. (In Russ.)
8. 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, 24.01.2018. Application No. 2016148090 dated 12/07/2016. (In Russ.)
9. Popikov P. I., Bukhtoyarov L. D., Platonov A. A., Vakula E. Yu. Simulation model of the manipulator workflow when removing unwanted vegetation along with the root system in forest stands. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 1—14. doi: 10.15393 / j2.art.2020.5402. (In Russ.)
10. 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.)
11. Bartenev I. M., Emtyl Z. K., Tatarenko A. P., Drapalyuk M. V., Popikov P. I., Bukhtoyarov L. D. *Hydromanipulators and forestry technological equipment*: monograph. Moscow, Flinta-Nauka, 2011. 408 p. (In Russ.)
12. Pridvorova A. V., Kostenko R. S., Savchenko A. S. Mathematical model of interaction of the saw blade of a manipulator type hedgecutter with woody vegetation. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2018, vol. 6, no. 7 (43), pp. 104—108. (In Russ.)
13. Löf M., Dey D., Navarro C. M., Jacobs D. F. Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests*, 2012, no. 43 (5-6). 825 p. doi: 10.1007/s11056-012-9332-x.
14. 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.)
15. Grigoriev I. V., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Davtyan A. B. Ways to improve the efficiency of forest machines. *Energy: economics, technology, ecology*, 2020, no. 1, pp. 55—63. (In Russ.)
16. Councils B. Ya., Yakovlev S. A. *Modeling of systems*: textbook. allowance. Moscow, Graduate school, 1998. 319 p. (In Russ.)
17. Dyakonov V. P. *Simulink 5/6/7*: tutorial. Moscow, DMK-Press, 2008. 784 p. (In Russ.)