

деревьев с одной стоянки машины, поскольку в сложных сосновых и еловых насаждениях среднее расстояние между деревьями в зависимости от интенсивности прореживания изменяется от 3,8 до 6,5 м (рис. 2). В таком случае значительно уменьшается среднее расстояние передвижения и энергозатраты.

При окончательной оценке энергоемкости следует учитывать степень утомляемости оператора. В настоящее время на рубках ухода работу по формированию пачки и сортировке выполняют в основном вручную, поэтому ее оценивают как тяжелую физическую с нервным напряжением средней степени. Использование минитрактора также не позволяет исключить ручной труд. Примерно 75 % времени технологического цикла затрачивается на валку, первичную обработку, а также погрузку и выгрузку древесины [2]. Использование навесного технологического оборудования (лебедка с приводом от ДВС, ручная лебедка) дает возможность значительно механизировать данный процесс, к тому же выполнение различных по характеру операций делает труд оператора менее монотонным [4].

С помощью данной методики можно оценить энергозатраты малогабаритного трактора для различных лесорастительных условий, что позволяет обосновать зоны его эффективного использования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Алябьев В. И. Моделирование и оптимизация производственных процессов на лесозаготовках: Учеб. пособие. Ч. 1.— М.: Моск. лесотехн. ин-т, 1978.— 112 с. [2]. Заготовка сортиментов на лесосеке. Технология и машины / А. В. Жуков, И. К. Иевинь, А. С. Федоренчик и др.— М.: Экология, 1993.— 311 с. [3]. Кочегаров В. Г., Бит Ю. А., Меньшиков В. Н. Технология и машины лесосечных работ: Учеб. для вузов.— М.: Лесн. пром-сть, 1990.— 392 с. [4]. Крылов И. Е. Современные тенденции в развитии механизации лесных работ // Лесное хозяйство за рубежом: Экспресс-информ. / ВНИИЦ по лесным ресурсам СССР.— 1991.— Вып. 7.— С. 10. [5]. Наставление по рубкам ухода в лесах Республики Беларусь.— Минск, 1992. [6]. Нормативные материалы для таксации леса Белорусской ССР / М.: ЦБНТИ, 1984. [7]. Перспективы механизации работ при рубках ухода. Минифорвардеры на лесозаготовках // Лесоэксплуатация и лесосплав: Экспресс-информ. / ВНИПИЭЛес-пром.— 1992.— Вып. 6.— С. 2—36.

Поступила 25 июля 1994 г.

УДК 621.865.8

#### Ю. П. ЭПШТЕЙН



Эпштейн Юрий Петрович родился в 1941 г., окончил в 1965 г. политехнический институт в Алма-Ате, кандидат технических наук, доцент кафедры механики Петрозаводского государственного университета. Имеет 25 научных трудов в области исследования динамики неупругих конструкций, колебаний конструкций лесосушильной камеры, динамики валки и пакетирования дерева с учетом его упругих свойств, механики манипуляторов лесных машин с автоматизированной системой управления.

### АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОВ ЛЕСНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведены результаты построения кинематической модели многозвеного манипулятора лесной машины. Выполнен сравнительный анализ релейной и пропорциональной систем управления.

The results of kinematic model construction of multi-link manipulator of a forestry machine are presented. The comparative analysis of relay and proportional operation systems is carried out.

Совершенствование систем управления многооперационных лесозаготовительных машин манипуляторного типа, в частности автоматизация ряда технологических операций, таких как наведение на цель, перемещение рабочего органа и пакетирование предмета труда, дает возможность снизить психофизиологические нагрузки на оператора и тем самым повысить производительность труда [3].

Кроме того, переход от релейного управления к пропорциональному в гидравлических приводных системах позволяет устранить динамические пуско-тормозные перегрузки на технологическое оборудование, что сказывается на повышении надежности лесных машин.

При проектировании систем управления манипуляторов важно прогнозировать влияние параметров управления на кинематическое состояние рабочего органа и предмета труда. Эффективным способом такого прогнозирования является имитационное моделирование на ЭВМ движений механической системы, которое базируется на построении соответствующей математической модели [4].

В нашей статье приведены результаты построения кинематической модели многосвязного манипулятора лесной машины, на основе которой выполнен сравнительный анализ релейной и пропорциональной систем управления.

При математическом описании кинематики манипулятора могут быть использованы различные методы: векторный, матричный и винтовой [2]. Ранее [1] использовали векторно-матричный метод с применением обычных матриц 3-го порядка.

Для определения положения и ориентации рабочего органа в зависимости от заданной системы управления манипулятора наиболее удобен метод, использующий специальные матрицы однородных преобразований, имеющие размерность  $4 \times 4$  [5]. Он использован в данной работе.

На рис. 1 приведена кинематическая схема манипулятора, с указанием связанных систем координат для последовательно расположенных звеньев. Взаимное расположение смежных систем координат можно

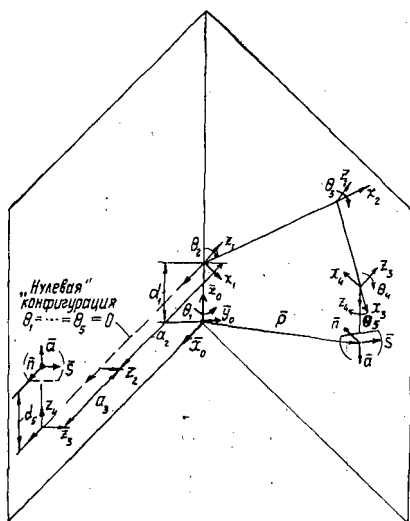


Рис. 1.

описать с помощью лишь четырех параметров (а не шести, как в общем случае), которые обозначены буквами  $a_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $d_i$  и  $\theta_i$  и определяются следующим образом:

- $a_i$  — кратчайшее расстояние между осями  $z_i$  и  $z_{i-1}$ ;
- $\alpha_i$  — угол между  $z_i$  и  $z_{i-1}$ ;
- $d_i$  — кратчайшее расстояние между осями  $x_i$  и  $x_{i-1}$ ;
- $\theta_i$  — угол между  $x_i$  и  $x_{i-1}$ .

На рисунке не показаны нулевые параметры  $a_1$ ,  $a_4$ ,  $a_5$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ,  $d_4$ . Значения углов  $\alpha_1 = -90^\circ$ ,  $\alpha_4 = 90^\circ$  и  $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_0 = 0$ .

Для манипулятора с вращательными парами угол  $\theta_i$  — величина переменная, а  $d_i$ ,  $\alpha_i$  и  $a_i$  — константы. В таблице приведены параметры сочленений для манипулятора трактора ТБ-1М ПО «Онежский тракторный завод».

Положение и ориентация системы координат  $i$ -го звена относительно системы координат  $(i-1)$ -го звена задается с помощью матрицы  ${}^{i-1}A_i$  размера  $4 \times 4$  однородного преобразования:

$${}^{i-1}A_i = \begin{pmatrix} c(\theta_i) & -c(\alpha_i)s(\theta_i) & s(\alpha_i)s(\theta_i) & a_i c(\theta_i) \\ s(\theta_i) & c(\alpha_i)c(\theta_i) & -s(\alpha_i)c(\theta_i) & a_i s(\theta_i) \\ 0 & s(\alpha_i) & c(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} c(\theta_i) &= \cos \theta_i; & s(\theta_i) &= \sin \theta_i; \\ c(\alpha_i) &= \cos \alpha_i; & s(\alpha_i) &= \sin \alpha_i. \end{aligned}$$

Сочле- нение $i$	$\theta_i$	$\alpha_i$ , град	$a_i$ , м	$d_i$ , м
1	$\theta_1$	-90	0	1,58
2	$\theta_2$	0	3,8	0
3	$\theta_3$	0	2,2	0
4	$\theta_4$	90	0	0
5	$\theta_5$	0	0	1,28

Матрицы однородных преобразований для отдельных движений манипулятора получены на основе матрицы (1) с учетом кинематических параметров из таблицы. При этом  $c_i$  и  $s_i$  обозначают соответственно  $\cos \theta_i$  и  $\sin \theta_i$ .

Для поворота манипулятора

$${}^0A_1 = \begin{pmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1,58 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

для подъема и опускания стрелы

$${}^1A_2 = \begin{pmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 3,8c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & 3,8s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

для выноса и подтягивания рукояти

$${}^2A_3 = \begin{vmatrix} c_3 - s_3 & 0 & 2,2c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & 2,2s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

для наклона рабочего органа

$${}^3A_4 = \begin{vmatrix} c_4 & 0 & s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & -c_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

для вращения рабочего органа

$${}^4A_5 = \begin{vmatrix} c_5 - s_5 & 0 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1,28 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Матрица  $T$  состояния рабочего органа манипулятора, которая задает его положение и ориентацию относительно базовой системы координат, представляет собой произведение матриц (1):

$$T = \begin{vmatrix} \overline{n} & \overline{s} & \overline{a} & \overline{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = {}^0A_5 = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \cdot {}^3A_4 \cdot {}^4A_5, \quad (2)$$

где  $\overline{n}$ ,  $\overline{s}$ ,  $\overline{a}$  — единичные векторы, определяющие ориентацию рабочего органа, а вектор  $\overline{p}$  — его положение.

Вычисление матрицы  $T$  достаточно легко автоматизировать на персональном компьютере в среде пакета MathCAD. Задаваясь вектором обобщенных координат манипулятора  $\overline{\Theta}$ , на основе формул (1) и (2) находим соответствующую матрицу  $T$ . Например, для манипулятора трактора ТБ-1М вектору  $\overline{\Theta} = [90, 0, 0, 90 \text{ и } 0^\circ]^T$  соответствует матрица

$$T = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 7,28 \\ -1 & 0 & 0 & 1,58 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

что согласуется с выбором систем координат, показанным на рис. 1.

Если обобщенные координаты заданы не значениями, а функциями времени, то и элементы матрицы  $T$  являются этими же функциями.

Прямую задачу кинематики манипулятора лесной машины решают с помощью следующих соотношений:

для положения рабочего органа

$$\begin{aligned} P_x &= c_1 (3,8c_2 + 2,2c_{23} + 1,28s_{234}); \\ P_y &= s_1 (3,8c_2 + 2,2c_{23} + 1,28s_{234}); \\ P_z &= 1,58 - 3,8s_2 - 2,2s_{23} + 1,28c_{234}; \end{aligned}$$

для его ориентации

$$n_x = c_1 c_{234} c_5 - s_1 s_5;$$

$$n_y = s_1 c_{234} c_5 + c_1 s_5;$$

$$n_z = -s_{234} c_5;$$

$$s_x = -c_1 c_{234} s_5 - s_1 c_5;$$

$$s_y = -s_1 c_{234} s_5 + c_1 c_5;$$

$$s_z = s_{234} s_5;$$

$$a_x = c_1 s_{234};$$

$$a_y = s_1 s_{234};$$

$$a_z = c_{234}.$$

Для краткости использованы следующие обозначения:  $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ ;  $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ ;  $c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ ;  $s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ .

Скорость и ускорение перемещения рабочего органа манипулятора можно вычислить на основе следующих матричных выражений:

$$\bar{V} = \bar{J}\dot{q}; \quad \bar{a} = \bar{J}\ddot{q} + \dot{\bar{J}}\dot{q}, \quad (4)$$

где  $\bar{V}$ ,  $\bar{a}$  — шестимерные векторы, состоящие из линейных и угловых скоростей и ускорений рабочего органа;

$\bar{J}$ ,  $\dot{\bar{J}}$  — матрица Якоби и производная по времени от нее;

$\dot{q}$ ,  $\ddot{q}$  — векторы обобщенных скоростей и ускорений.

На основе построенной кинематической модели (1), (2) и (4) можно моделировать на ПЭВМ весь процесс движения манипулятора лесной машины, оценивая влияние системы управления на параметры движения рабочего органа.

На рис. 2 и 3 приведены результаты такого моделирования в среде пакета MathCAD для частного случая — двухзвенного манипулятора ( $\theta_1 = 0$ ;  $d_1 = d_5 = 0$ ;  $a_2 = 3,8$  м;  $a_3 = 2,2$  м). Исследовалось изменение во времени кинематических параметров движения захвата в процессе пакетирования предмета труда из начального положения в конечное при двух системах управления (релейное и пропорциональное).

На рис. 2, а изображены начальная и конечная конфигурации манипулятора, а также траектория перемещения его рабочего органа. На рис. 2, б показано изменение угловых скоростей звеньев манипулятора

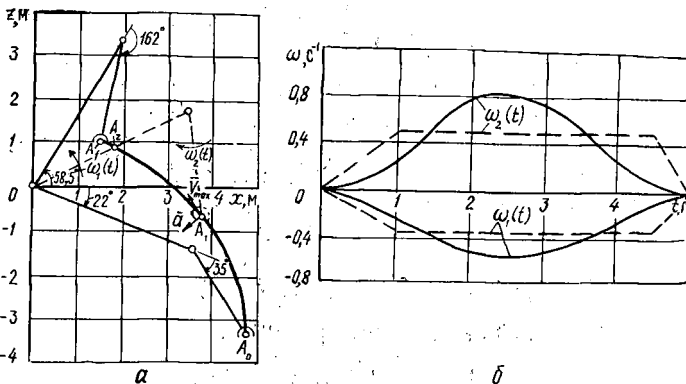


Рис. 2.

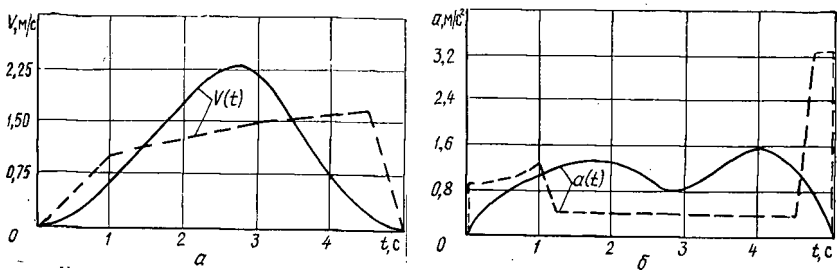


Рис. 3.

в процессе его движения при пропорциональной (сплошная линия) и релейной (штриховая линия) системах управления. При этом параметры управления подбирали из условия, чтобы за одно и то же время ( $t = 5$  с) звенья манипулятора перешли из начального положения в конечное.

На рис. 3, а показано изменение во времени модуля скорости захвата для двух систем управления. При пропорциональном управлении (сплошная линия) время разгона захвата равно 2,75 с (участок траектории  $A_0A_1$  на рис. 2, а), скорость захвата достигает максимума (2,275 м/с). В случае релейного управления (штриховая линия) время разгона увеличивается до 4,5 с (участок траектории  $A_0A_2$ ), скорость захвата в это время максимальна (1,645 м/с). Характерно, что при равномерном вращении звеньев захват продолжает увеличивать скорость за счет изменения конфигурации манипулятора (увеличение угла поворота рукоятки относительно стрелы).

На рис. 3, б показано изменение во времени модуля ускорения захвата с предметом труда. Если пропорциональное управление (сплошная линия) обеспечивает плавное начало движения захвата и плавное торможение, то для релейного (штриховая линия) характерны перегрузки (толчки) в начале движения (ускорение 0,946 м/с<sup>2</sup>) и особенно в конце (замедление 3,32 м/с<sup>2</sup>).

Результаты имитационного моделирования необходимы при выборе законов управления и оценке качества кинематической схемы и конструкции манипулятора лесной машины. Необходимо учитывать, что анализ кинематики манипулятора является лишь начальным этапом решения более сложных проблем, связанных с анализом динамики и синтезом управления движением.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Александров В. А., Коноплев В. А., Эпштейн Ю. П. Построение программного движения робота-манипулятора лесосечной машины // Лесн. журн.— 1987.— № 6.— С. 38—43.— (Изв. высш. учеб. заведений). [2]. Воробьев Е. И., Попов С. А., Шевелева Г. И. Механика промышленных роботов. Кн. 1. Кинематика и динамика.— М.: Высш. шк., 1988.— 304 с. [3]. О некоторых путях расширения функциональных возможностей системы оператор—манипулятор применительно к лесным машинам / О. П. Афанасьев, Ю. В. Илюхин, В. И. Лобачев и др. // Науч. проблемы робототехники.— М.: Наука, 1980.— С. 76—83. [4]. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем—искусство и наука.— М.: Мир, 1978.— 418 с. [5]. Denavit J., Hartenberg R. S. A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices // ASME J. Appl. Mech.— 1955.— Vol. 22.— P. 215—221.

Поступила 14 июля 1994 г.