

УДК 519(0.75)

## ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯМИ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Лалетин В. И., Рычков В. В., Сбоев В. М.

*ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров, Россия, e-mail:laletin@vyatsu.ru*

Рассмотрена манипуляционная система. В качестве системы взят шестизвенный манипуляционный робот, имеющий «неинерционный» привод. Известно многомерное гладкое многообразие  $\Omega$ . Задаётся программа движения схвата манипуляционного робота: требуется перенести предмет манипулирования из одного заданного положения в другое или движение схвата начнётся и закончится с нулевой скоростью. На основе обратных задач динамики построен алгоритм управления движением системы. Далее рассмотрены числовые примеры: движение манипуляционного робота по заданному закону, движение при наличии начальных отклонений и движении, начинающемся и заканчивающемся с нулевой скоростью. Рассчитаны и построены графики изменения управления, обобщённых координат и координат рабочей точки схвата манипуляционного робота. Приведены расчёты в системе MatLab.

Ключевые слова: «неинерционный» привод, манипуляционный робот, многомерное гладкое многообразие, программирование, схват, обратная задача динамики, алгоритм управления.

## PROGRAM CONTROL OF MOVEMENTS OF MANIPULATOR SYSTEM

Laletin V. I., Sboev V. M., Ryichkov V. V.

*FGEI HPE "Vyatka State University", Kirov, Russia, e-mail:laletin@vyatsu.ru*

Six-link manipulation robot with conventional non-inertia drive and control system of 3-D coordinate system movements in many-dimensional smooth manifold of space positions based on inverse dynamic solution are covered in this work. A program of manipulation robot's mechanical gripper moving object from its home position to a given one as well as a program of movement using set initial and final zero velocity value on the trajectory are detailed. We found and covered graphs on control alteration, generalized coordinates change and mechanical gripper's operating point coordinates shift. Conditions when generalized coordinates of the mechanical gripper's operating point change corresponds to some degree of pitch from linear movement pattern are specified. Calculations were made using MatLab computing environment.

Keywords: non-inertia drive, manipulation robot, many-dimensional smooth manifold, programming, mechanical gripper, inverse dynamic problem, control algorithm.

### Постановка задачи

Как известно, обратная задача динамики состоит в определении законов изменения сил по заданным движениям рабочей точки. Рассмотрим шестизвенный манипуляционный робот, механика которого описана в [4].

Представим уравнения движения «безынерционного» манипуляционного робота в виде [2, 5]:

$$\dot{\varphi} = B \cdot u, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – 6-мерный вектор обобщённых координат;  $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$ ;

$B$  – матрица [6x6] постоянных коэффициентов;

$u$  – вектор управления.

Требуется найти аналитическое выражение вектора  $u$  так, чтобы заданное  $s$  – мерное гладкое многообразие  $\Omega$

$$\omega_{\mu}(\varphi, t) = 0, \quad \mu = \overline{1, s}, \quad (2)$$

было интегральным для (1).

Рассмотрим следующую задачу. Пусть требуется перенести предмет манипулирования из одного заданного положения в другое. В программу введён закон движения рабочей точки  $O_6$  схвата:

$$\begin{aligned} \omega_1(\varphi, t) &= X_6(\varphi) - \overset{*}{X}(t) = 0; \\ \omega_2(\varphi, t) &= Y_6(\varphi) - \overset{*}{Y}(t) = 0; \\ \omega_3(\varphi, t) &= Z_6(\varphi) - \overset{*}{Z}(t) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $X_6(\varphi)$ ,  $Y_6(\varphi)$ ,  $Z_6(\varphi)$  – координаты рабочей точки  $O_6$  схвата;

$\overset{*}{X}(t)$ ,  $\overset{*}{Y}(t)$ ,  $\overset{*}{Z}(t)$  – заданные законы изменения координат рабочей точки  $O_6$ .

Если законы изменения  $\overset{*}{X}(t)$ ,  $\overset{*}{Y}(t)$ ,  $\overset{*}{Z}(t)$  выбрать в виде [1]:

$$\begin{aligned} \overset{*}{X}(t) &= X_1 + \frac{1}{2}(X_2 - X_1) \cdot [1 + \sin \frac{\pi}{T}(t - \frac{T}{2})]; \\ \overset{*}{Y}(t) &= Y_1 + \frac{1}{2}(Y_2 - Y_1) \cdot [1 + \sin \frac{\pi}{T}(t - \frac{T}{2})]; \\ \overset{*}{Z}(t) &= Z_1 + \frac{1}{2}(Z_2 - Z_1) \cdot [1 + \sin \frac{\pi}{T}(t - \frac{T}{2})], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $X_1, Y_1, Z_1$  – начальные, а  $X_2, Y_2, Z_2$  – конечные значения координат рабочей точки  $O_6$ ;

$T$  – время перемещения, то движение схвата начнётся и закончится с нулевой скоростью.

### Алгоритм управления

Как известно, на основе решения обратных задач динамики [3, 5], вектор управления определяется выражением:

$$u(\varphi, t) = A_1 \cdot \frac{L_1}{A_1^2} + (E - \frac{1}{A_1^2} \cdot A_1 \cdot A_1^T) \cdot A_2 \cdot \frac{L_2}{A_2^2} + (E - \frac{1}{A_1^2} \cdot A_1 \cdot A_1^T) \cdot (E - \frac{1}{A_2^2} \cdot A_2 \cdot A_2^T) \cdot A_3 \cdot \frac{L_3}{A_3^2}, \quad (5)$$

$$\text{где } A_1^T = \underset{\varphi}{\text{grad}}\omega_1(\varphi, t) \cdot B; A_2^T = \underset{\varphi}{\text{grad}}\omega_2(\varphi, t) \cdot B \cdot (E - \frac{1}{A_1^2} \cdot A_1 \cdot A_1^T);$$

$$A_3^T = \underset{\varphi}{\text{grad}}\omega_3(\varphi, t) \cdot B \cdot (E - \frac{1}{A_1^2} \cdot A_1 \cdot A_1^T) \cdot (E - \frac{1}{A_2^2} \cdot A_2 \cdot A_2^T);$$

$$L_1 = \Phi_1(\omega, \varphi, t) - \frac{\partial \omega_1(\varphi, t)}{\partial t};$$

$$L_2 = \Phi_2(\omega, \varphi, t) - \underset{\varphi}{\text{grad}}\omega_2(\varphi, t) \cdot B \cdot A_1 \cdot \frac{L_1}{A_1^2} - \frac{\partial \omega_2(\varphi, t)}{\partial t};$$

$$L_3 = \Phi_3(\omega, \varphi, t) - \underset{\varphi}{\text{grad}}\omega_3(\varphi, t) \cdot B \cdot [A_1 \cdot \frac{L_1}{A_1^2} + (E - \frac{1}{A_1^2} \cdot A_1 \cdot A_1^T) \cdot A_2 \cdot \frac{L_2}{A_2^2}] - \frac{\partial \omega_3(\varphi, t)}{\partial t};$$

$$\underset{\varphi}{\text{grad}}\omega_i(\varphi, t) = (\frac{\partial \omega_i(\varphi, t)}{\partial \varphi_1}, \dots, \frac{\partial \omega_i(\varphi, t)}{\partial \varphi_6}) = (g_{i1}, \dots, g_{i6}), \quad i = \overline{1, 3};$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_6 \end{bmatrix}; b_1=b_2=0,045; b_3=b_4=0,052; b_5=b_6=0,058;$$

$E$  – единичная матрица размера [3x3];

$T$  – символ транспонирования;

### Числовые задачи

Зададим закон движения рабочей точки схвата  $O_6$  в виде:

$$\begin{aligned} X(t) &= -0,05 \cdot t + 0,485, \quad \dot{x}; \\ Y(t) &= 0,25 \cdot t - 0,7554, \quad \dot{y}; \\ Z(t) &= 0,1 \cdot t + 0,5467, \quad \dot{z}. \end{aligned} \quad (6)$$

Пусть в начальный момент времени рабочая точка схвата  $O_6$  находится на программной траектории, и её положение определяется координатами:

$$X_6^0(t_0) = X_6^0(0) = 0,485 \text{ м};$$

$$Y_6^0(t_0) = Y_6^0(0) = -0,7554 \text{ м};$$

$$Z_6^0(t_0) = Z_6^0(0) = 0,5467 \text{ м}.$$

При этом обобщённые координаты имеют значения:  $\varphi_{10} = \varphi_1(0) = -1 \text{ рад.}$ ;

$\varphi_{20} = \varphi_2(0) = 1 \text{ рад.}$ ;  $\varphi_{30} = \varphi_3(0) = 0,5 \text{ рад.}$ ;  $\varphi_{40} = \varphi_4(0) = 0 \text{ рад.}$ ;  $\varphi_{50} = \varphi_5(0) = -1 \text{ рад.}$ ;  $\varphi_{60} = \varphi_6(0) = 0 \text{ рад.}$

Изменения во времени значений:  $U_i(t)$ ,  $i=1, \dots, 5$ ;  $\varphi_j(t)$ ,  $j=1, \dots, 5$ ;  $X_6^0(t)$ ,  $Y_6^0(t)$ ,  $Z_6^0(t)$  показаны на рис. 1 (а, б и в).

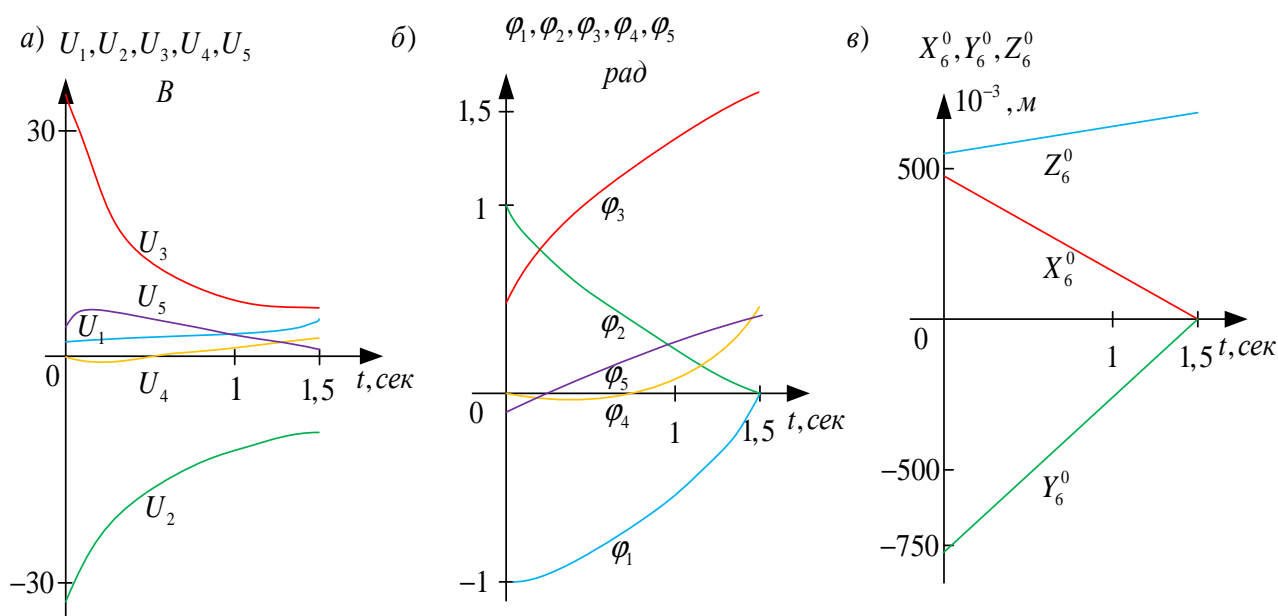


Рис. 1. Изменение управления  $U_i(t)$  (а), обобщённых координат  $\varphi_j(t)$  (б) и координат схвата  $X_6^0(t)$ ,  $Y_6^0(t)$ ,  $Z_6^0(t)$  (в) по заданному закону во времени

Анализ полученных результатов показывает, что изменения координат рабочей точки происходят по прямолинейному закону.

Движение при наличии начальных отклонений.

Пусть в начальный момент времени обобщённые координаты манипулятора равны:

$$\varphi_{10} = -0,92 \text{ рад}; \quad \varphi_{20} = 1,2 \text{ рад}; \quad \varphi_{30} = 0,8 \text{ рад};$$

$$\varphi_{40} = 0,025 \text{ рад}; \quad \varphi_{50} = 0,085 \text{ рад}; \quad \varphi_{60} = 0 \text{ рад}.$$

Координаты рабочей точки схвата манипулятора имеют следующие значения:

$$X_6^0 = 0,52 \text{ м}; \quad Y_6^0 = -0,69 \text{ м}; \quad Z_6^0 = 0,13 \text{ м}.$$

Зададим функции  $\Phi_\lambda(\omega, \varphi, t)$ ,  $\lambda = \overline{1,3}$  в виде:

$$\Phi_1(\omega, \varphi, t) = -\alpha_1 \cdot \omega_1;$$

$$\Phi_2(\omega, \varphi, t) = -\alpha_2 \cdot \omega_2;$$

$$\Phi_3(\omega, \varphi, t) = -\alpha_3 \cdot \omega_3.$$

Изменения во времени значений:  $U_i(t)$ ,  $i=1, \dots, 5$ ;  $\varphi_j(t)$ ,  $j=1, \dots, 5$ ;  $X^0_6(t)$ ,  $Y^0_6(t)$ ,  $Z^0_6(t)$  показаны на рис. 2 (а, б и в) при  $\alpha_k=1$  и  $\alpha_k=4$ ,  $k=1, \dots, 3$ .

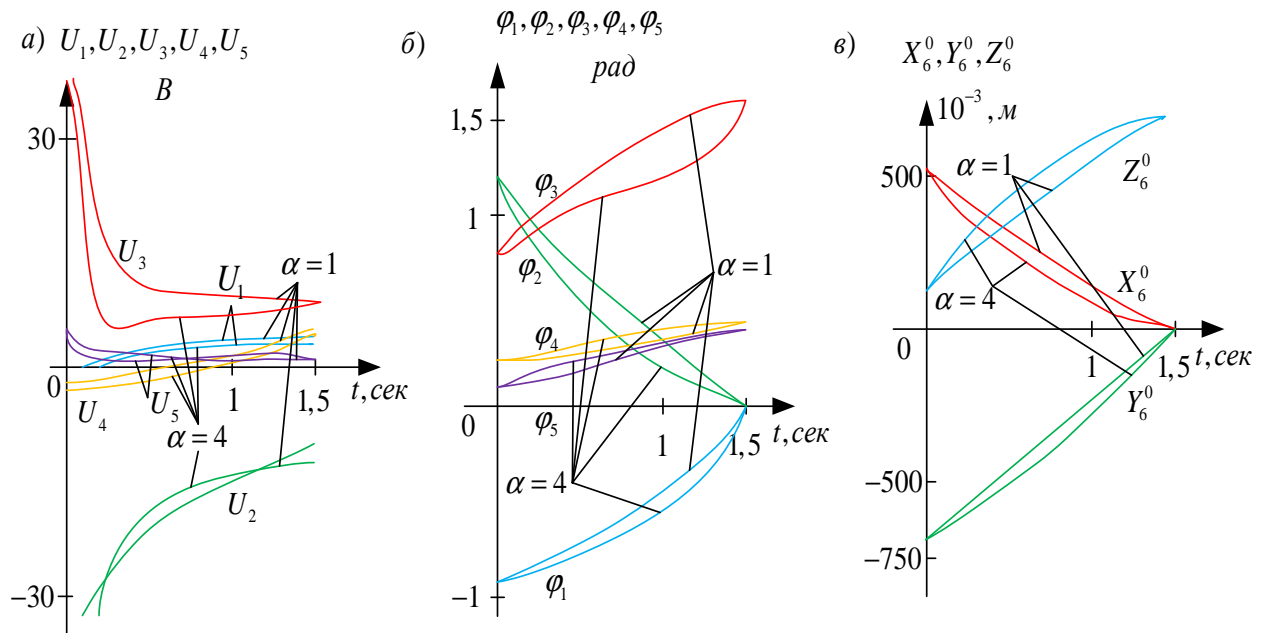


Рис. 2. Изменение управления  $U_i(t)$  (а), обобщённых координат  $\varphi_j(t)$  (б) и координат схвата  $X^0_6(t)$ ,  $Y^0_6(t)$ ,  $Z^0_6(t)$  (в) при движении при наличии начальных отклонений

Процессы показывают, что чем больше  $\alpha$ , тем сильнее отклонится закон движения от прямолинейного.

Пусть требуется перенести рабочую точку схвата  $O_6$  из одной точки пространства в другое.

Заданы координаты этих точек:

$$X^0_{61} = 0,485 \text{ м}; \quad X^0_{62} = 0,41 \text{ м};$$

$$Y^0_{61} = -0,7554 \text{ м}; \quad Y^0_{62} = -0,3804 \text{ м};$$

$$Z^0_{61} = 0,5467 \text{ м}; \quad Z^0_{62} = 0,6967 \text{ м}.$$

Чтобы движение начиналось и заканчивалось с нулевой скоростью, закон движения зададим следующим образом,  $T=1,5 \text{ сек}$ .

$$X^*(t) = X_{61} + \frac{1}{2}(X_{62} - X_{61}) \cdot [1 + \sin \frac{\pi}{T}(t - \frac{T}{2})];$$

$$Y^*(t) = Y_{61} + \frac{1}{2}(Y_{62} - Y_{61}) \cdot [1 + \sin \frac{\pi}{T}(t - \frac{T}{2})];$$

$$Z^*(t) = Z_{61} + \frac{1}{2}(Z_{62} - Z_{61}) \cdot [1 + \sin \frac{\pi}{T}(t - \frac{T}{2})].$$

Изменения во времени значений:  $U_i(t)$ ,  $i=1, \dots, 5$ ;  $\varphi_j(t)$ ,  $j=1, \dots, 5$ ;  $X^0_6(t)$ ,  $Y^0_6(t)$ ,  $Z^0_6(t)$  показаны на рис.3 (а, б и в).

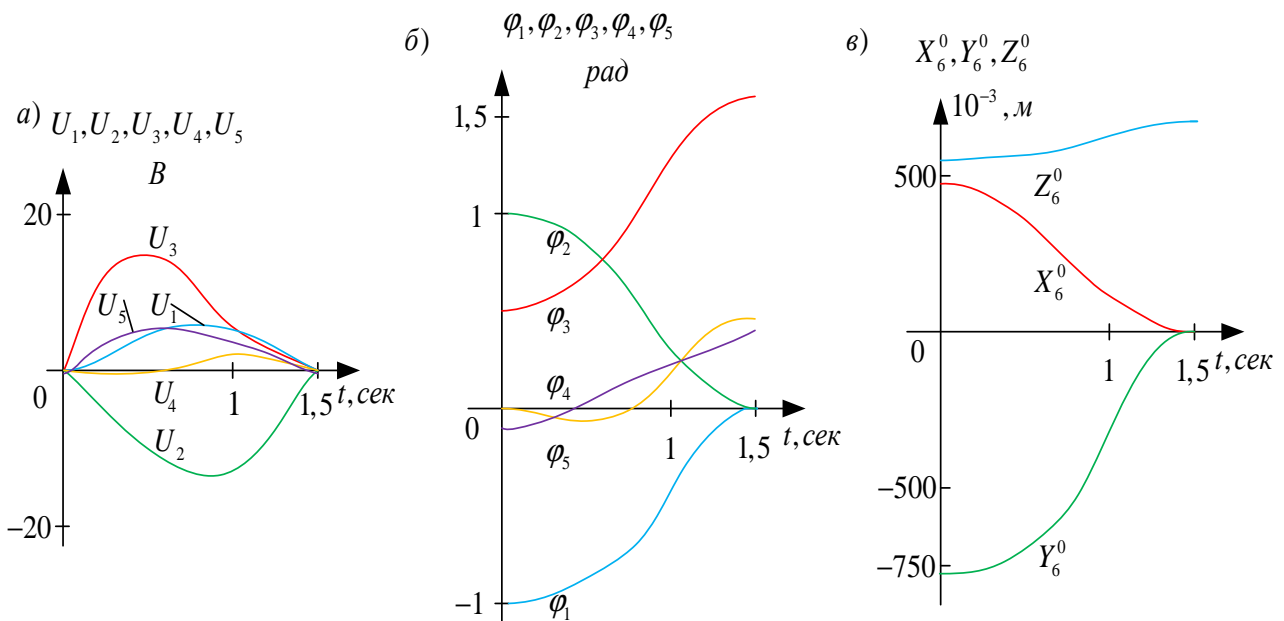


Рис. 3. Изменение управления  $U_i(t)$  (а), обобщённых координат  $\varphi_j(t)$  (б) и координат схвата  $X^0_6(t)$ ,  $Y^0_6(t)$ ,  $Z^0_6(t)$  (в) при движении, начинающемся и заканчивающемся с нулевой скоростью

Зависимости показывают, что движение начинается и заканчивается с управлением, равным нулю. При этом касательные к графикам обобщённых координат и координат рабочей точки манипулятора в начальный и конечный момент времени горизонтальны.

Таким образом, решается обратная задача динамики применительно к положению схвата манипуляционного робота в процессе его перемещения в пространстве состояний.

### Список литературы

1. Корнев Г. В. Целенаправленная механика управляемых манипуляторов. – М.: Наука, 1979. – 448 с.
2. Лалетин В. И., Рычков В. В. Особенности моделирования шаговых электромеханических преобразователей энергии // ВЕСТНИК Вятского научного центра. Верхнее-Волжского отделения Академии технологических наук Российской Федерации. Серия: Проблемы

обработки информации. Выпуск 1(4)/2003. – Киров: Вятский научный центр, 2003. – С. 79-84.

3. Лалетин В. И., Рычков В. В. Оценка отклонений от программного движения // ВЕСТНИК Вятского научного центра Верхне-Волжского отделения Академии технологических наук Российской Федерации. Серия: Проблемы обработки информации. Выпуск 1(4)/2003. – Киров: Вятский научный центр, 2003. – С. 84-88.

4. Лалетин В. И., Рычков В. В., Рычкова М. Н. Прямая задача о положении схвата // Общество, наука, инновации. (НПК – 2014) [Электронный ресурс] : всерос. ежегод. науч.-практ. конф. : сб. материалов, 15-25 апреля 2014 г. / Вят. гос. ун-т. – Киров, 2014.

5. Рычков В. В. Управление программными движениями манипуляционных роботов с нестабильными приводами // ВЕСТНИК Вятского научного центра. Верхнее-Волжского отделения Академии технологических наук Российской Федерации. Серия: Проблемы обработки информации. Выпуск 1(6)/2005. – Киров: Вятский научный центр, 2005. – С. 121-126.

**Рецензенты:**

Присмотров Н. И., д.т.н., профессор ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров;

Хорошавин В. С., д.т.н., профессор ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет», г. Киров.