

ТРАНСПОРТНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

62-523.3

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ СЛЕДЯЩИМ ПРИВОДОМ АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЕРА С ШЕСТЬЮ СТЕПЕНЯМИ ПОДВИЖНОСТИ

Д-р техн. наук, проф. Д. Н. ПОПОВ, асп. А. А. ТАХА

Система управления движением платформы авиационного тренажера с шестью степенями подвижности состоит из шести одинаковых электрогидравлических следящих приводов (ЭГСП) с дифференциальными гидроцилиндрами. Когда положение и ориентация платформы тренажера изменяются, нагрузки на выходные звенья ЭГСП изменяются. Чтобы обеспечить робастное управление ЭГСП в отношении изменения нагрузки на его выходное звено, выбран оптимальный регулятор с учетом нелинейности характеристик ЭГСП. В регуляторе реализованы алгоритмы адаптации посредством эталонной модели и вычисление коэффициентов усиления с помощью функции Ляпунова. В результате получены оптимальные переходные характеристики для каждого ЭГСП при различных положениях платформы.

The control system of motion of an aviation simulator's platform with six degrees of freedom consists of six identical electrohydraulic servo drives with differential hydraulic cylinders. Loads on the rods of the hydraulic cylinders change when the position and orientation of the platform change. So to achieve a robust control of the platform's electrohydraulic servo drives with concerning the load changing on their cylinders rods, an optimum controller has been selected considering the nonlinearities of the electrohydraulic servo drive. The adaptation algorithms in the controller have been derived by using the reference model method and the coefficients of the controller have been calculated with the help of function Lyapunov. As a result, optimum step response characteristic are received for every electrohydraulic servo drive at various platform positions.

В 1965 году Стюарт представил платформу с шестью степенями подвижности (6СС) как авиационный тренажер. Много вариантов конструктивных схем такого тренажера были исследованы. Нами рассмотрен авиационный тренажер с 6СС (рис. 1), который состоит из постоянной базы, шести цилиндрических опор, шести сферических опор, подвижной платформы и шести одинаковых звеньев. Каждое звено представляет собой электрогидравлический следящий привод (ЭГСП).

Чтобы вычислить перемещения звеньев, обеспечивающих требуемые положения и ориентации платформы, необходимо сначала решить задачу обратной кинематики. Положение и ориентация платформы определяются тремя перемещениями (x, y, z) по осям X, Y, Z с началом в точке O_b и тремя углами поворота (α, β, γ) вокруг X, Y, Z . Каждое звено описывает вектор (\vec{S}_i) перемещения от точки, расположенной на базе, к точке, находящейся на платформе (рис. 1). Начала координат выбраны в центрах массы базы и платформы (O_b и O_p – соответственно).

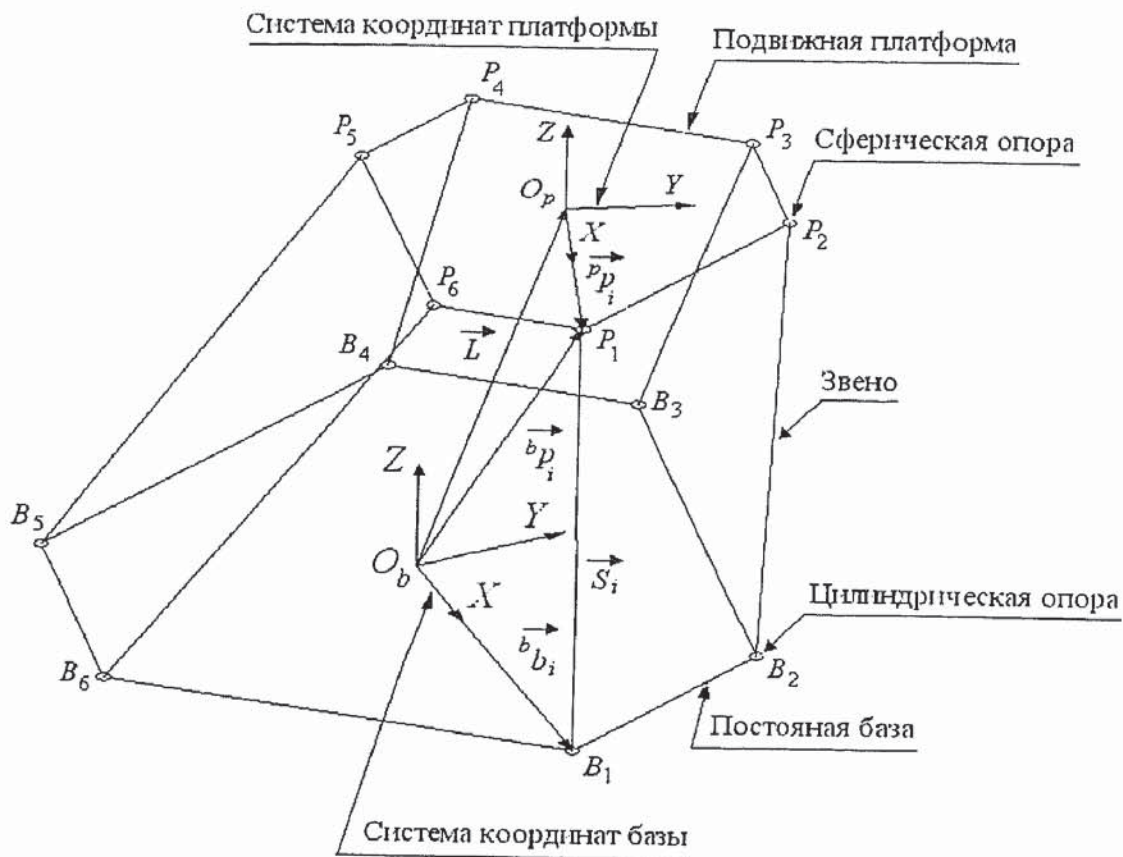


Рис. 1. Расчетная кинематическая схема авиационного тренажера

Вектор перемещения звена \vec{S}_i в системе координат базы можно представить в виде [1—3]:

$$\vec{S}_i = \mathbf{R}^p \vec{p}_i + \vec{l} - {}^b \vec{b}_i, \quad i=1,2,\dots,6,$$

где $l = [x, y, z]^T$; \mathbf{R} — матрица ортогонального преобразования из системы координат платформы в систему координат базы; ${}^p \vec{p}_i$ и ${}^b \vec{b}_i$ — векторы положения опор платформы и базы относительно своих систем координат

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C\alpha C\beta & C\alpha S\beta S\gamma - S\alpha C\gamma & C\alpha S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma \\ S\alpha C\beta & S\alpha S\beta S\gamma + C\alpha C\gamma & S\alpha S\beta C\gamma - C\alpha S\gamma \\ -S\beta & C\beta S\gamma & C\beta C\gamma \end{bmatrix},$$

$$\text{где } \begin{cases} S\alpha = \sin \alpha, C\alpha = \cos \alpha, \\ S\beta = \sin \beta, C\beta = \cos \beta, \\ S\gamma = \sin \gamma, C\gamma = \cos \gamma. \end{cases}$$

Для определения векторов ${}^p \vec{p}_i$ и ${}^b \vec{b}_i$ надо построить схему базы и платформы на X - Y плоскости (рис. 2). С помощью этой схемы нетрудно получить следующие соотношения:

$${}^p \vec{p}_i = (p_{xi}, p_{yi}, p_{zi})^T = [r_p \cos \lambda_i \quad r_p \sin \lambda_i \quad 0]^T;$$

$${}^b \vec{b}_i = (b_{xi}, b_{yi}, b_{zi})^T = [r_B \cos \delta_i \quad r_B \sin \delta_i \quad 0]^T;$$

$$\lambda_i = \frac{\pi}{3}i - \frac{\theta_p}{2}; \quad \delta_i = \frac{\pi}{3}i - \frac{\theta_B}{2}, \quad i = 1, 3, 5;$$

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} + \theta_p; \quad \delta_i = \delta_{i-1} + \theta_B, \quad i = 2, 4, 6,$$

где λ_i и δ_i – углы между (OP_i) , (OB_i) и осью X ; θ_p и θ_B – углы между первыми двумя опорами платформы и базы; r_p и r_B – радиусы платформы и базы (рис. 2).

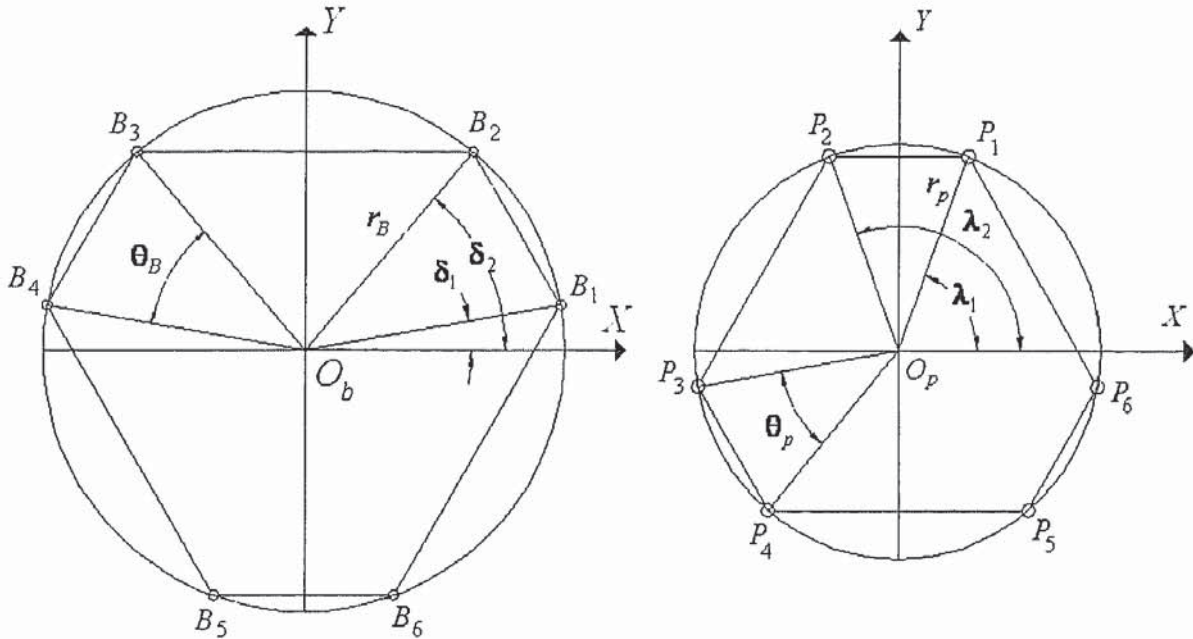


Рис. 2. Схема базы и платформы в X – Y плоскости

Длину вектора \vec{S}_i можно найти в виде:

$$s_i = \|\vec{S}_i\| = \sqrt{S_{xi}^2 + S_{yi}^2 + S_{zi}^2}, \quad i = 1, 2, \dots, 6.$$

ЭГСП авиационного тренажера, для которого необходимо найти оптимальный регулятор, состоит из дифференциального гидроцилиндра (ГЦ), датчика перемещения штока ГЦ и электрогидравлического усилителя (ЭГУ) (рис. 3).

ЭГСП с дифференциальным гидроцилиндром относится к нелинейным системам с нестабильными параметрами. Вследствие этого задача оптимального управления платформой усложняется и требует нетривиального решения [4]. В [5] приведена процедура выбора оптимального регулятора путем расчета параметров обратных связей по переменным состояниям ЭГСП. В математической модели ЭГСП, кроме дифференциальности гидроцилиндра, учтены нелинейность расходно-перепадной характеристики и динамика ЭГУ, описываемая дифференциальным уравнением второго порядка. Для определения алгоритма адаптации и коэффициентов усиления регулятора использованы эталонная модель и второй метод А. М. Ляпунова. Алгоритм адаптации обеспечивает робастность ЭГСП в отношении нагрузки на его выходное звено.

Указанный алгоритм адаптации предназначен для одного ЭГСП. При использовании этого алгоритма в каждом из шести ЭГСП тренажера управление движением платформы усложняется, что может вызвать увеличение продолжительности переходных процессов, в связи с чем возникает необходимость упрощения алгоритма адаптации. Упрощенный

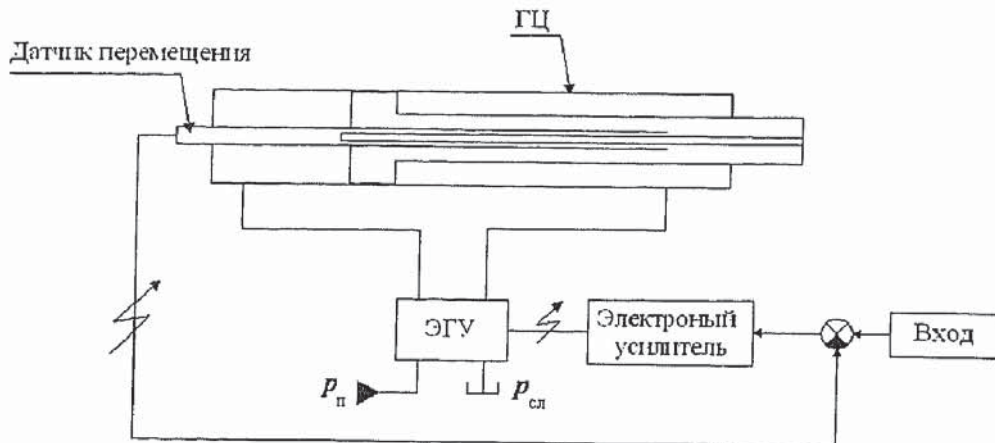


Рис. 3 Схема ЭГСП авиационного тренажера

алгоритм получен с помощью той же нелинейной математической модели ЭГСП, которая была применена в [5].

Несколько изменено только уравнение нагрузки, представленное здесь при $x_3 > 0$ (выдвижение штока ГЦ) в виде [7]

$$m\dot{x}_2 + k_{\text{тр}}x_2 = F_1x_3 - F_2x_4 - P_f,$$

при $x_3 < 0$ (втягивание штока ГЦ) в виде

$$mx_2 + k_{\text{тр}}x_2 = -F_1x_3 + F_2x_4 + P_f,$$

где x_3 – перемещение золотника ЭГУ; m – приведенная к выходному звену ЭГСП масса; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; F_1, F_2 – рабочие площади ГЦ; $x_2 = \dot{x}_1$, x_3 , x_4 – переменные состояния ЭГСП, точка над переменной означает производную по времени.

Чтобы учесть возможную нестабильность нагрузки, последнее уравнение запишем в виде

$$\text{при } \dot{x}_3 > 0 \quad \dot{x}_2 = \frac{1}{\varphi_1 m} (F_1x_3 - F_2x_4 - \varphi_2 k_{\text{тр}}x_2 - P_f),$$

$$\text{при } \dot{x}_3 < 0 \quad \dot{x}_2 = \frac{1}{\varphi_1 m} (-F_1x_3 + F_2x_4 - \varphi_2 k_{\text{тр}}x_2 + P_f),$$

где $\varphi = [\varphi_1 \quad \varphi_2]$ – компоненты фактического вектора нагрузки.

При изменении уравнения нагрузки функции Ляпунова определяются следующим образом [4, 6, 8]:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2;$$

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} K_{\varphi_1} \tilde{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} K_{\varphi_2} \tilde{\varphi}_2^2; \quad \text{где } \tilde{\varphi}_i = \varphi_i - \bar{\varphi}_i, \quad i = 1, 2,$$

где $\bar{\varphi} = [\bar{\varphi}_1 \quad \bar{\varphi}_2]$ – компоненты вектора оценки нагрузки;

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_{e2}) - K_{\varphi_1} \tilde{\varphi}_1 \dot{\tilde{\varphi}}_1 - K_{\varphi_2} \tilde{\varphi}_2 \dot{\tilde{\varphi}}_2;$$

когда $x_{e3} = \frac{1}{F_1} (F_2 x_{e4} + \bar{\varphi}_2 k_{\text{тр}} x_{e2} + P_f + \bar{\varphi}_1 m (\dot{x}_2 + K_2 e_2))$

$$\Rightarrow \dot{V}_2 = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 - K_{\varphi_1} \dot{\bar{\varphi}}_1 \bar{\varphi}_1 - K_{\varphi_2} \dot{\bar{\varphi}}_2 \bar{\varphi}_2 \leq 0,$$

$$\dot{V}_3 = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 - K_{\varphi_1} \dot{\bar{\varphi}}_1 \bar{\varphi}_1 - K_{\varphi_2} \dot{\bar{\varphi}}_2 \bar{\varphi}_2 + e_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_{e3}),$$

чтобы $\dot{V}_3 = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 - K_3 e_3^2 \leq 0$, должен быть выполнен алгоритм адаптации "А"

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{\varphi}}_1 &= \frac{B_{\text{ж}} C_y e_j}{F_i K_{\varphi_1} (F_i x_{e1} + V_{0i})} m (\dot{x}_2 + K_2 e_2); \\ \dot{\bar{\varphi}}_2 &= \frac{B_{\text{ж}} C_y e_i}{F_i K_{\varphi_2} (F_i x_{e1} + V_{0i})} k_{\text{тр}} x_{e2}; \\ x_{e5} &= \frac{F_i x_{e1} + V_{0i}}{B_{\text{ж}} f'} (\dot{x}_j + K_j e_j) + \frac{1}{f'} g, \end{aligned} \right\} A$$

$$\text{где } f' = k'_3 \left(\sqrt{|p_{\text{н}} - x_{ej}|} \right) \text{sign}(p_{\text{н}} - x_{ej}).$$

В алгоритме адаптации:

$$\text{при } x_3 > 0 \quad i=1; \quad j=3; \quad g = F_1 x_{e2} + C_y x_{e4} \frac{F_2}{F_1} + C_y \frac{P_f}{F_1},$$

$$\text{при } x_3 < 0 \quad i=2; \quad j=4; \quad g = F_2 x_{e2} - C_y x_{e3} \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right) - C_y \frac{P_f}{F_2},$$

где $p_{\text{н}}$ – давление питания; P_f – внешняя сила; $B_{\text{ж}}$ – модуль объемной упругости жидкости; C_y – коэффициент утечки в гидроцилиндре; k'_3 – удельная проводимость золотника ЭГУ; V_{01}, V_{02} – объемы жидкости в трубках, соединяющих ГЦ с ЭГУ; $x_{e1}, x_{e2}, x_{e3}, x_{e4}, x_{e5}$ – переменные состояния эталонной модели; e_1, e_2, e_3, e_4 – ошибки между переменными состояния реальной системы и переменными состояния эталонной модели; K_1, K_2, K_3, K_4 – коэффициенты усиления регулятора; $K_{\varphi_1}, K_{\varphi_2}$ – коэффициенты в алгоритме адаптации.

С помощью алгоритма А можно сохранить вычисленные в [5] переходные характеристики ЭГСП, не увеличивая продолжительность процесса адаптации.

Для проверки эффективности действия разработанного регулятора ЭГСП было выполнено компьютерное моделирование системы управления платформой с шестью степенями подвижности. В исследуемой системе адаптивные регуляторы входят в каждый из шести ЭГСП, поэтому в систему управления включены блок «кинематика платформы» и блок «механическая модель платформы» (рис. 4). Механическая модель состоит из шести цилиндрических опор, закрепленных на постоянной базе, платформы и шести звеньев. Звено состоит из двух тел. Верхним телом является шток ГЦ, который соединен с подвижной платформой через сферическую опору. Нижнее тело (гидроцилиндр), соединено с базой посредством цилиндрической опоры (рис. 5). Входными сигналами механической модели будут шесть сил, вычисляемых при переходных процессах ЭГСП по уравнениям

$$\text{при } x_3 > 0 \quad P_{ci} = F_1 x_{(e3)i} - F_2 x_{(e4)i} - k_{\text{тр}} x_{(e2)i}, \quad i = 1, 2, \dots, 6,$$

$$\text{при } x_3 < 0 \quad P_{ci} = -F_1 x_{(e3)i} + F_2 x_{(e4)i} - k_{\text{тр}} x_{(e2)i}, \quad i = 1, 2, \dots, 6.$$

где P_{ci} – силы, действующие на штоке ГЦ.

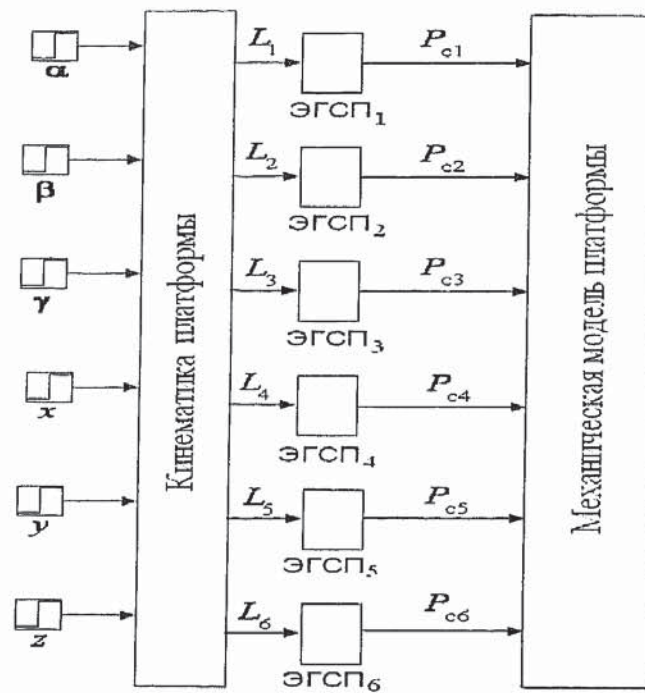


Рис. 4. Структурная схема системы управления платформой

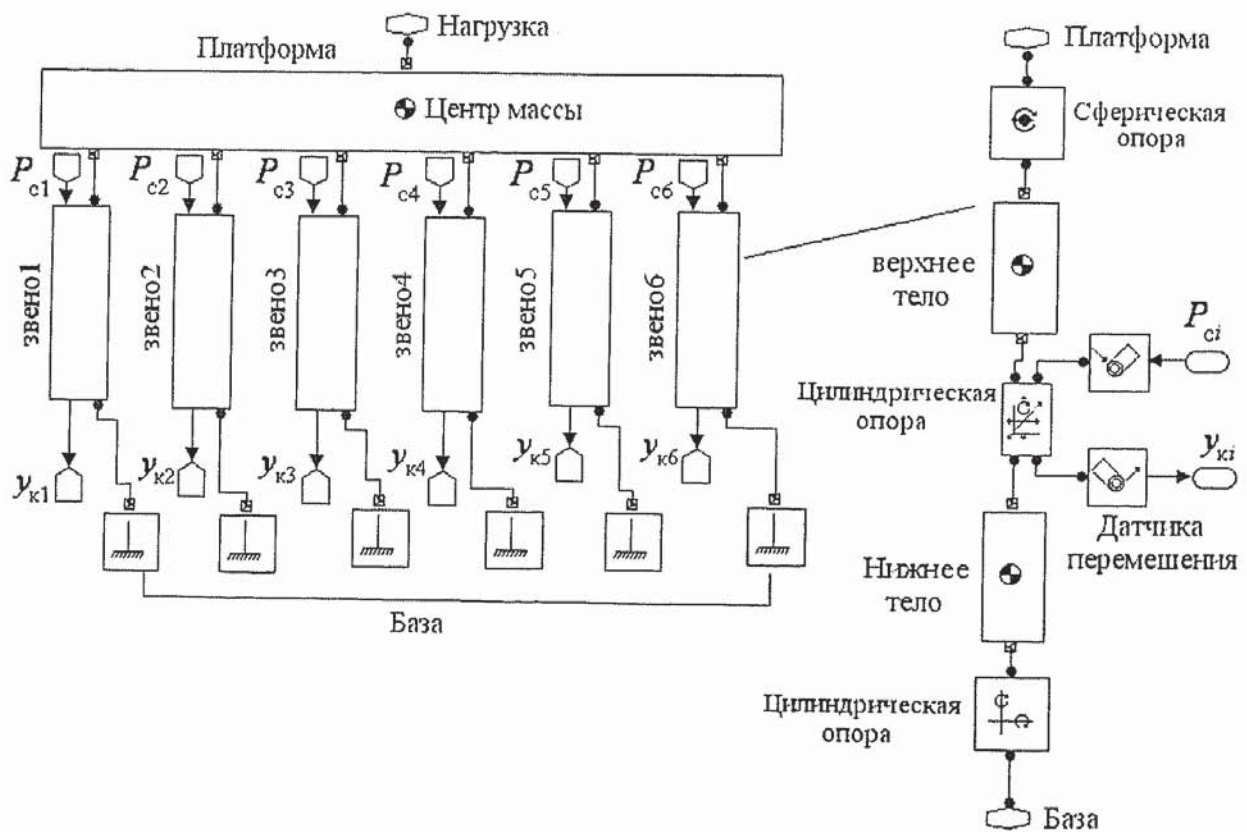


Рис. 5. Механическая модель платформы, где $i = 1, 2, \dots, 6$

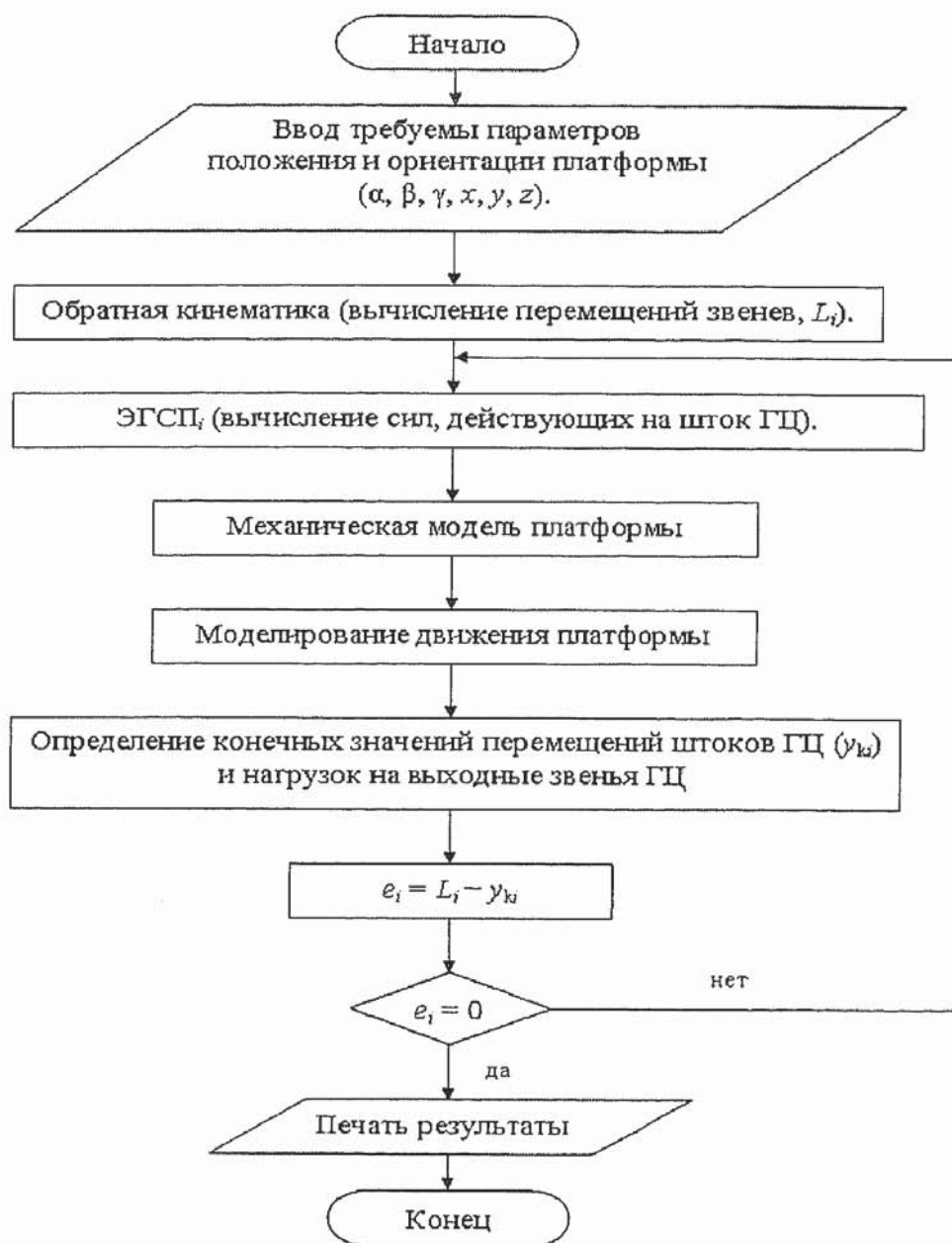


Рис. 6. Блок-схема программы моделирования движения платформы с шестью степенями подвижности

Выходными сигналами механической модели будут шесть перемещений верхних тел (конечные значения перемещений штоков ГЦ y_{ki}). В соответствии с алгоритмом, блок-схема которого представлена на рис. 6, рассчитывались переходные процессы в шести ЭГСП с адаптивными регуляторами при заданных конечных значениях координат положения центра массы платформы ($x = 0,15$ м, $y = 0,15$ м, $z = 0,20$ м) и углах ориентации ($\alpha = 10^\circ$, $\beta = 10^\circ$, $\gamma = 5^\circ$) платформы (рис. 7). Изменения нагрузок на выходные звенья ЭГСП при движении платформы показаны на рис. 8.

Результаты компьютерного моделирования подтверждают, что адаптивные регуляторы обеспечивают робастное в отношении нагрузок на выходные звенья ЭГСП управление платформой.

Расхождение между требуемыми значениями перемещений штоков ГЦ, вычислявшихся по обратной кинематике, и конечными значениями перемещений штоков ГЦ при переходных процессах не выходят за пределы 2×10^{-6} мм.

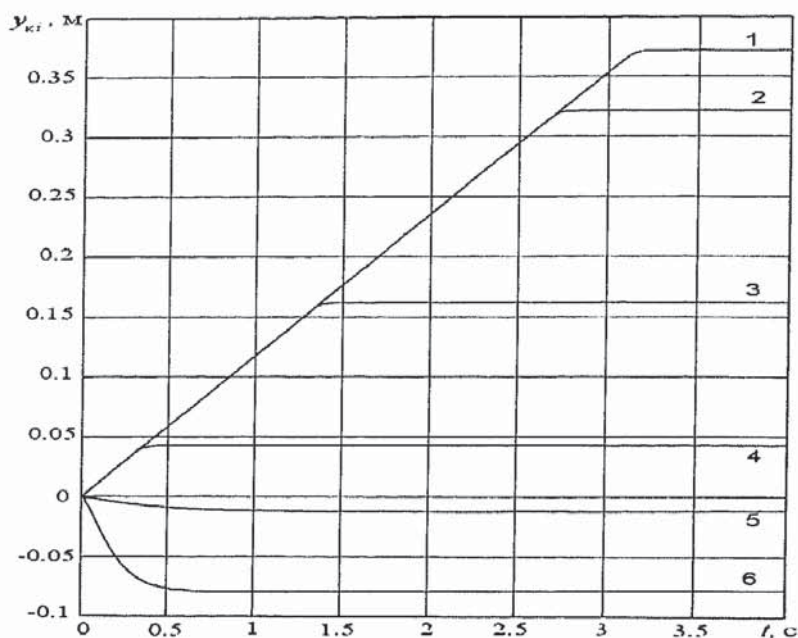


Рис. 7. Переходные процессы в шести ЭГСП, $i = 1, 2, \dots, 6$ – номера ЭГСП

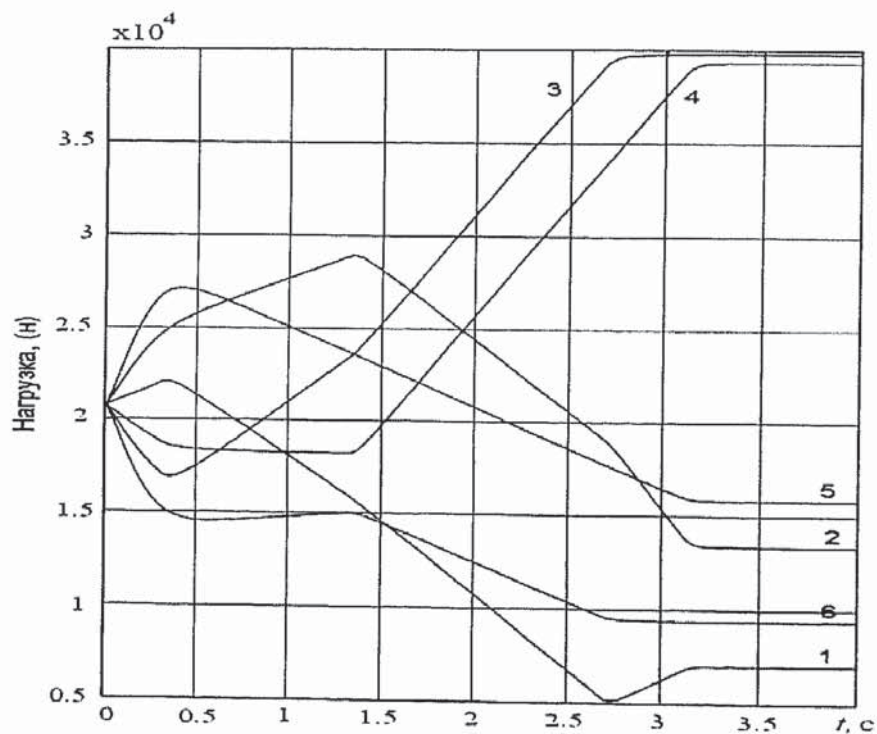


Рис. 8. Изменения нагрузок на выходные звенья шести ЭГСП, $i = 1, 2, \dots, 6$ – номера ЭГСП

Выводы

1. Оптимальной с точки зрения робастного управления авиационным тренажером является система управления, в которой каждый ЭГСП снабжен адаптивным регулятором шести переменных состояния: перемещение и скорость выходного звена ЭГСП, перемещение и скорость золотника ЭГУ, давления в каждой полости дифференциального гидроцилиндра.

2. Для верификации результатов исследования проведены численные эксперименты, при которых были рассчитаны перемещения выходных звеньев ЭГСП и значения нагрузки на них во время переходных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 480 с.
2. Турлапов В. Е. Решение задачи кинематики для платформы Стюарта методом группы нулевого порядка // Электронный журнал « Прикладная геометрия». — Вып. 4. — № 5(2002). — С. 23—40.
3. Wen F., Ling C. Displacement Analysis of the 6-6 Stewart Platform Mechanisms // Mechanism and Machine Theory. — Vol. 29. — № 4. — 1994. — P. 547—557.
4. Lu H. and Lin W. Robust controller with disturbance rejection for hydraulic servo systems. IEEE Trans. Indust. Elec. — Vol. 40. Feb. 1993. — Pp. 157—162.
5. Попов Д. Н., Таха А. А. Проектирование электрогидравлического следящего привода с неопределенными и нестационарными нагрузками на выходное звено // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. — 2007. — № 1(66). — С. 99—112.
6. Методы робастного, нейро- нечеткого и адаптивного управления: Учебник / Пупков К.А и др. / Под ред. Н.Д. Егупова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 744 с.
7. Попов Д. Н. Механика гидро- и пневмоприводов: Учебник для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 320с.
8. Slotine J. E. and Li W., Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall Inc. New Jersey. — 1991.