10. **Kaufman J. G.** Advances in cryogenic engineering / J. G. Kaufman, E. W. Jonson. – NY : Plenum press, 1961. – P. 637–649.
11. **Pavan K. M.** Effect Of Cryogenic Treatment On The Mechanical And Microstructural Properties Of Aluminium Alloys / K. M. Pavan, L. S. Sachin, S. Mayur, A. Chandrashekar, B. S. Ajaykumar // International Journ. of Mechanical And Production Engineering. – May 2014. – Vol.2, Issue 5.
12. **Rise L. P.** Advances in cryogenic engineering / L. P. Rise. – NY : Plenum press, 1962. – P. 671–677.

Надішла до редколегії 01.10.2014 р.

УДК 629.76 (075.8)

Ю. А. Ромасько, Ю. Д. Шептун

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Йдеться про актуальність проблеми розробки значних за розмірами космічних конструкцій (сонячні електростанції, антени, телескопи тощо), про необхідність кутової орієнтації космічних конструкцій (КК) у просторі. Великі розміри, мала жорсткість КК обумовлюють виникнення пружних коливань конструкцій, наявність яких ускладнює забезпечення сталого керованого руху КК. Згадані конструкції як об’єкти керування можуть бути за своїми властивостями і структурою нестійкими щодо руху. Показано можливість ліквідації зазначеної нестійкості шляхом використання коригуючих зв’язків.

Ключові слова: об’єкт регулювання, нестійкість руху, коректуючи зв’язки.

Затронута актуальная проблема разработки значительных по размеру космических конструкций (солнечные электростанции, антенны, телескопы и др.), подчеркивается необходимость угловой ориентации космических конструкций (КК) в пространстве. Большие размеры, малая жёсткость КК обусловливают возникновение упругих колебаний конструкции, затрудняющих обеспечение устойчивого управляемого движения КК. Данные конструкции как объекты регулирования могут быть по своим свойствам и структуре неустойчивыми. Показана возможность устранения собственной и структурной неустойчивости объекта регулирования путем использования корректирующих связей.

Ключевые слова: объект управления, неустойчивость движения, корректирующие связи.

The problem of development significant on the size of space designs (solar power stations, aerials, telescopes, etc.) is actual. As a rule, there is a necessity of angular orientation of space designs (SD) for space. The big sizes, small rigidity SD cause occurrence of elastic fluctuations of the design complicating maintenance of steady controlled movement SD. The named designs as objects of regulation can be actually and structurally unstable the opportunity of elimination of own and structural instability of object of regulation is below shown by use of adjusting communications (connections).

Key words: object of control, instability the movements adjusting communications (connections).

Введение. Математическая модель космической конструкции как объекта регулирования (ОР) принимается в виде

$$
\begin{aligned}
&\ddot{\psi}_{г} + \eta_1^{'} \cdot \ddot{q}_1 + \eta_2^{'} \cdot \ddot{q}_2 = a_{\psi\delta} \cdot \delta, \\
&\ddot{q}_1 + \varepsilon_1 \cdot \dot{q}_1 + \omega_1^2 \cdot q_1 = a_{q1\delta} \cdot \delta, \\
&\ddot{q}_2 + \varepsilon_2 \cdot \dot{q}_2 + \omega_2^2 \cdot q_2 = a_{q2\delta} \cdot \delta.
\end{aligned}
\tag{1}
$$

Частотные характеристики ОР представлены на рис. 1.

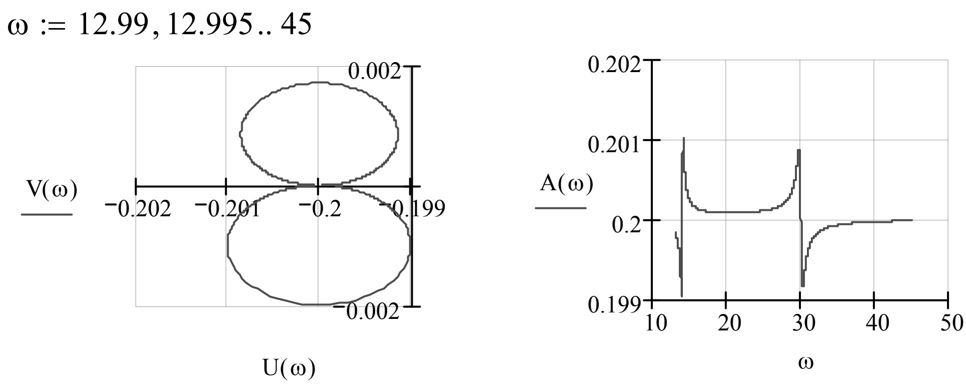

Рис. 1. АФЧХ и АЧХ в диапазоне частот, включающем первый и второй тона колебаний

На рис. 1 петли АФЧХ расположены в верхней и нижней полуплоскостях комплексной плоскости, обходятся по часовой стрелке; смещены влево на величину 0,2 от начала координат комплексной плоскости. Из графика АЧХ можно видеть, что значения собственных частот колебаний первого и второго тонов равны $\omega_1 = 13\,c^{-1}$, $\omega_2 = 30\,c^{-1}$ соответственно.

Таким образом, объект регулирования, математическая модель которого (1), характеризуется собственной динамической и структурной неустойчивостью [6].

Оценим устойчивость замкнутой системы регулирования, математическая модель которого

$$
\begin{cases}
\ddot{\psi} = a_{\psi\delta} \cdot \delta, \\
\ddot{q}_1 + \varepsilon_{q1} \cdot \dot{q}_1 + \omega_{q1}^2 \cdot q_1 = a_{q1\delta} \cdot \delta, \\
\ddot{q}_2 + \varepsilon_{q2} \cdot \dot{q}_2 + \omega_{q2}^2 \cdot q_2 = a_{q2\delta} \cdot \delta, \\
\psi_{\Gamma} = \psi - \eta_1^{'}(x_{\Gamma}) \cdot q_1 - \eta_2^{'}(x_{\Gamma}) \cdot q_2, \\
\delta = a_0 \cdot \psi_{\Gamma} + a_1 \cdot \dot{\psi}_{\Gamma}.
\end{cases}
\tag{2}
$$

Характеристический определитель системы уравнений (2)

$$
\begin{bmatrix}
(p^2 - a_{\psi\delta} \cdot a_1 \cdot p - a_{\psi\delta} \cdot a_0) & (a_{\psi\delta} \cdot a_1 \cdot \eta_1^{'} \cdot p + a_{\psi\delta} \cdot a_0 \cdot \eta_1^{'}) & (a_{\psi\delta} \cdot a_1 \cdot \eta_2^{'} \cdot p - a_{\psi\delta} \cdot a_0 \cdot \eta_2^{'}) \\
-(a_{q1\delta} \cdot a_1 \cdot p + a_{q1\delta} \cdot a_0) & \begin{bmatrix} p^2 + (\varepsilon_{q1} + a_{q1\delta} \cdot a_1 \cdot \eta_1^{'}) \cdot p + \\ +(\omega_{q1}^2 + a_{q1\delta} \cdot a_0 \cdot \eta_1^{'} \end{bmatrix} & (a_{q1\delta} \cdot a_1 \cdot \eta_2^{'} \cdot p + a_{q1\delta} \cdot a_0 \cdot \eta_2^{'}) \\
-(a_{q2\delta} \cdot a_1 \cdot p + a_{q2\delta} \cdot a_0) & (a_{q2\delta} \cdot a_1 \cdot \eta_1^{'} \cdot p + a_{q2\delta} \cdot a_0 \cdot \eta_1^{'}) & \begin{bmatrix} p^2 + (\varepsilon_{q2} + a_{q2\delta} \cdot a_1 \cdot \eta_2^{'}) \cdot p + \\ +\omega_{q2}^2 + a_{q2\delta} \cdot a_0 \cdot \eta_2^{'} \end{bmatrix}
\end{bmatrix}
$$

характеристическое уравнение

$$4.6\cdot p^7+10.58\cdot p^6+4162.356\cdot p^5+4391.272\cdot p^4+8919.287\cdot p^3+198885.153\cdot p^2+ \\ +262440.07\cdot p+512917.326=0. \tag{3}$$

Коэффициенты уравнения соответствуют исходным данным:

$$a_{\psi\delta}=-0.2c^{-2},\quad a_{q1\delta}=-6.7\text{м}\cdot c^{-2},\quad a_{q1\delta}=-0,967\text{м}\cdot c^{-2},\quad \varepsilon_{q1}=-0.2c^{-1},\quad \varepsilon_{q1}=-0.2c^{-1};$$

$$\eta_1^{'}(x_Г)=0.13\text{м}^{-1},\quad \eta_2^{'}(x_Г)=-0.3\text{м}^{-1},\quad \eta_3^{'}(x_Г)=0.075\text{м}^{-1},\quad a_0=10,\quad a_1=5.$$

Расчет корней уравнения (3), проведенный с использованием пакета программ Mathcad, приводит к следующим значениям:

$$\begin{bmatrix} -3.566 \\ -0.652-1.455\cdot j \\ -0.652+1.455\cdot j \\ -0.648-30.019\cdot j \\ -0.648+30.019\cdot j \\ 1.933-3.148\cdot j \\ 1.933+3.148\cdot j \end{bmatrix},$$

которые подтверждают вывод о структурной и собственной динамической неустойчивости ОР.

Рассмотрим процедуру синтеза модального регулятора для объекта регулирования (1).

Запишем уравнения (1) в векторно-матричной форме, для чего выполним следующее. Решим уравнения относительно вторых производных:

$$\ddot{\psi}_г+\eta_1^{'}\cdot\ddot{q}_1+\eta_2^{'}\cdot\ddot{q}_2=a_{\psi\delta}\cdot\delta,$$

$$0\cdot\ddot{\psi}_г+1\cdot\ddot{q}_1+0\cdot\ddot{q}_2=a_{q1\delta}\cdot\delta-\varepsilon_1\cdot\dot{q}_1-\omega_1^2\cdot q_1,$$

$$0\cdot\ddot{\psi}_г+0\cdot\ddot{q}_1+1\cdot\ddot{q}_2=a_{q2\delta}\cdot\delta-\varepsilon_2\cdot\dot{q}_2-\omega_2^2\cdot q_2.$$

$$\ddot{\psi}_г=\frac{\Delta_1}{\Delta},\qquad \ddot{q}_1=\frac{\Delta_2}{\Delta},\qquad \ddot{q}_2=\frac{\Delta_3}{\Delta}.$$

$$\Delta=\begin{vmatrix} 1 & \eta_1^{'} & \eta_2^{'} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}=1\,.$$

$$\Delta_1=\begin{vmatrix} a_{\psi\delta}\cdot\delta & \eta_1^{'} & \eta_2^{'} \\ a_{q1\delta}\cdot\delta-\varepsilon_1\cdot\dot{q}_1-\omega_1^2\cdot q_1 & 1 & 0 \\ a_{q2\delta}\cdot\delta-\varepsilon_2\cdot\dot{q}_2-\omega_2^2\cdot q_2 & 0 & 1 \end{vmatrix}=$$

$$=\eta_2^{'}\cdot(-a_{q2\delta}\cdot\delta+\varepsilon_2\cdot\dot{q}_2+\omega_2^2\cdot q_2)+a_{\psi\delta}\cdot\delta-\eta_1^{'}\cdot\left(a_{q1\delta}\cdot\delta-\varepsilon_1\cdot\dot{q}_1-\omega_1^2\cdot q_1\right).$$

$$\Delta_2=\begin{vmatrix} 1 & a_{\psi\delta}\cdot\delta & \eta_2^{'} \\ 0 & a_{q1\delta}\cdot\delta-\varepsilon_1\cdot\dot{q}_1-\omega_1^2\cdot q_1 & 0 \\ 0 & a_{q2\delta}\cdot\delta-\varepsilon_2\cdot\dot{q}_2-\omega_2^2\cdot q_2 & 1 \end{vmatrix}=a_{q1\delta}\cdot\delta-\varepsilon_1\cdot\dot{q}_1-\omega_1^2\cdot q_1\,.$$

$$\Delta_3=\begin{vmatrix} 1 & \eta_1^{'} & a_{\psi\delta}\cdot\delta \\ 0 & 1 & a_{q1\delta}\cdot\delta-\varepsilon_1\cdot\dot{q}_1-\omega_1^2\cdot q_1 \\ 0 & 0 & a_{q2\delta}\cdot\delta-\varepsilon_2\cdot\dot{q}_2-\omega_2^2\cdot q_2 \end{vmatrix}=a_{q2\delta}\cdot\delta-\varepsilon_2\cdot\dot{q}_2-\omega_2^2\cdot q_2\,.$$

$$\ddot{\psi} = \left(-a_{q2\delta} \cdot \delta + \varepsilon_2 \cdot \dot{q}_2 + \omega_2^2 \cdot q_2\right) \cdot \eta_2^{'} + a_{\psi\delta} \cdot \delta - \eta_1^{'} \cdot \left(a_{q1\delta} \cdot \delta + \varepsilon_1 \cdot \dot{q}_1 + \omega_1^2 \cdot q_1\right),$$
$$\ddot{q}_1 = -\omega_1^2 \cdot q_1 - \varepsilon_1 \cdot \dot{q}_1 + a_{q1\delta} \cdot \delta,$$
$$\ddot{q}_2 = -\omega_2^2 \cdot q_2 - \varepsilon_2 \cdot \dot{q}_2 + a_{q2\delta} \cdot \delta.$$

Запишем уравнения движения в нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned}
&\frac{dx_1}{dt} = x_2,\\
&\frac{dx_2}{dt} = \eta_1^{'} \cdot \omega_1^2 \cdot x_3 + \eta_1^{'} \cdot \varepsilon_1 \cdot x_4 + \eta_2^{'} \cdot \omega_2^2 \cdot x_5 + \eta_2^{'} \cdot \varepsilon_2 \cdot x_6 + \left(a_{\psi\delta} - \eta_1^{'} \cdot a_{q1\delta} - \eta_2^{'} \cdot a_{q2\delta}\right) \cdot \delta,\\
&\frac{dx_3}{dt} = x_4,\\
&\frac{dx_4}{dt} = -\omega_1^2 \cdot x_3 - \varepsilon_1 \cdot x_4 + a_{q1\delta} \cdot \delta,\\
&\frac{dx_5}{dt} = x_6,\\
&\frac{dx_6}{dt} = -\omega_2^2 \cdot x_5 - \varepsilon_2 \cdot x_6 + a_{q2\delta} \cdot \delta,
\end{aligned} \tag{4}$$

в области комплексного переменного:

$$\begin{aligned}
&s \cdot X_1(s) - X_2(s) = 0,\\
&s \cdot X_2(s) - \eta_1^{'} \cdot \omega_1^2 \cdot X_3(s) + \eta_1^{'} \cdot \varepsilon_1 \cdot X_4(s) + \eta_2^{'} \cdot \varepsilon_2 \cdot X_5(s) +\\
&+\eta_2^{'} \cdot \varepsilon_2 \cdot X_6(s) + \left(a_{\psi\delta} - \eta_1^{'} \cdot a_{q1\delta} - \eta_2^{'} \cdot a_{q2\delta}\right) \cdot \delta(s),\\
&s \cdot X_3(s) - X_4(s) = 0,\\
&s \cdot X_4(s) + \omega_1^2 \cdot X_3(s) + \varepsilon_1 \cdot X_4(s) = 0,\\
&s \cdot X_5(s) - X_5(s) = 0,\\
&s \cdot X_6(s) + \omega_2^2 \cdot X_5(s) + \varepsilon_2 \cdot X_6(s) = 0
\end{aligned}$$

и в векторно-матричном виде:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t). \tag{5}$$

Здесь

$$A = \begin{vmatrix} s & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & -\eta_1^{'} \cdot \omega_1^2 & -\eta_1^{'} \cdot \varepsilon_1 & -\eta_2^{'} \cdot \omega_2^2 & -\eta_2^{'} \cdot \varepsilon_2 \\ 0 & 0 & s & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_1^2 & s + \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_2^2 & s + \varepsilon_2 \end{vmatrix},$$

$$B = \begin{vmatrix} 0 \\ a_{\psi\delta} - \eta_1^{'} \cdot a_{q1\delta} - \eta_2^{'} \cdot a_{q2\delta} \\ 0 \\ a_{q1\delta} \\ 0 \\ a_{q2\delta} \end{vmatrix}.$$

Характеристическое уравнение, соответствующее уравнению (3), имеет вид [2]:

$$a_0 \cdot P^6 + a_1 \cdot P^5 + a_2 \cdot P^4 + a_3 \cdot P^3 + a_4 \cdot P^2 + a_5 \cdot P + a_6 = 0. \tag{6}$$

Запишем матрицу А в управляемом каноническом представлении:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_6 & -a_5 & -a_4 & -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{vmatrix}$$

или с явным написанием выражений коэффициентов, а характеристического полинома через физические параметры космической конструкции:

$$-a_6 = 0,\ -a_5 = 0,\ -a_4 = -\omega_1^2 \cdot \omega_2^2,\ -a_3 = -\varepsilon_1 \cdot \omega_2^2 + \omega_1^2 \cdot \varepsilon_2,\ -a_2 = -\omega_1^2 - \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 - \omega_2^2,\ -a_1 = -\varepsilon_2 - \varepsilon_1 .$$

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\omega_1^2 \cdot \omega_2^2 & -\varepsilon_1 \cdot \omega_2^2 + \omega_1^2 \cdot \varepsilon_2 & -\omega_1^2 - \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 - \omega_2^2 & -\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \end{vmatrix}. \tag{7}$$

Известна теорема: если задана стационарная система с одним входом и одним выходом $\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t)$ и задан $\alpha(s) = s^n + \alpha_1 \cdot s^{n-1} + ... + \alpha_{n-1} \cdot s + \alpha_n$ – произвольный нормированный многочлен n-го порядка, который определяет динамические свойства желаемой системы, то существует вектор обратной связи – K^T такой, что замкнутая система

$$\dot{x}(t) = [A - B \cdot K^T] \cdot x(t) \tag{8}$$

имеет $\alpha(s)$ своим характеристическим многочленом.

Обозначим $A - B \cdot K^T = A_{ж}$, где A, $A_{ж}$ – располагаемая и желаемая характеристические матрицы системы в форме управляемого канонического представления.

Используем теорему и синтезируем корректирующие обратные связи:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & ... & 0 & 0 \\ 0 & 0 & ... & 0 & 0 \\ ... & ... & ... & 1 & 0 \\ 0 & 0 & ... & 0 & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & ... & -a_2 & -a_1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ ... \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} k_1 & k & ... & ... & k_{n-1} & k_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & ... & 0 & 0 \\ 0 & 0 & ... & 0 & 0 \\ ... & ... & ... & 1 & 0 \\ 0 & 0 & ... & 0 & 1 \\ -\alpha_n & -\alpha_{n-1} & ... & -\alpha_2 & -\alpha_1 \end{vmatrix}.$$

Здесь $a_n, ..., a_1$; $\alpha_n, ..., \alpha_1$ – коэффициенты характеристических уравнений располагаемой и желаемой систем соответственно.

Составим уравнения для определения коэффициентов k_i (i=1…6) корректирующих обратных связей и решим их относительно k_i:

$$\begin{aligned} &1)\ -a_6 - k_1 = -\alpha_6, && \alpha_6 = 0, && k_1 = \alpha_6, \\ &2)\ -a_5 - k_2 = -\alpha_5, && \alpha_5 = 0, && k_2 = \alpha_5, \\ &3)\ -a_4 - k_3 = -\alpha_4, && \omega_1^2 \cdot \omega_2^2 + k_3 = \alpha_4, && k_3 = \alpha_4 - \omega_1^2 \cdot \omega_2^2, \\ &4)\ -a_3 - k_4 = -\alpha_3, && \varepsilon_1 \cdot \omega_2^2 + \omega_1^2 \cdot \varepsilon_2 + k_4 = \alpha_3, && k_4 = \alpha_3 - \varepsilon_1 \cdot \omega_2^2 - \omega_1^2 \cdot \varepsilon_2, \end{aligned} \tag{9}$$

$$5)\quad -a_2 - k_5 = -\alpha_2, \qquad \omega_2^2 + \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 + \omega_1^2 + k_5 = \alpha_2, \qquad k_5 = \alpha_2 - \omega_2^2 - \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 - \omega_1^2,$$

$$6)\quad -a_1 - k_6 = -\alpha_1, \qquad \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + k_6 = \alpha_1, \qquad k_6 = \alpha_1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

где $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n$ – коэффициенты характеристического полинома желаемой замкнутой системы регулирования (объект регулирования с автоматом стабилизации). Назначим значения нулей этого полинома с учетом значений корней уравнения (6). Значения коэффициентов уравнения (6)

$$a_0 = 1, \qquad a_3 = \varepsilon_1 \cdot \omega_2^2 + \omega_1^2 \cdot \varepsilon_2 = 293.972,$$

$$a_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 0.723, \qquad a_4 = \omega_1^2 \cdot \omega_2^2,$$

$$a_2 = \omega_1^2 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \omega_2^2 = 1.069 \cdot 10^3, \qquad a_5 = 0, \quad a_6 = 0.$$

Корнями этого уравнения являются:

$$\lambda_{1,2} = -0.244 \pm 29.997i,$$

$$\lambda_{3,4} = -0.118 \pm 13\,i, \quad \lambda_{5,6} = 0.$$

Примем значения нулей характеристического полинома желаемой системы $\kappa_{1,2} = \lambda_{1,2}$; $\kappa_{3,4} = \lambda_{3,4}$; $\kappa_{5,6} = -0.3$.

Запишем полином, имеющий записанные выше нули:

$$(S+0.244-29.997i)(S+0.244+29.997i)(S+0.118-13i)(S+0.118+13i)(S+0.3)(S+0.3). \qquad (10)$$

Определим полином (найдем коэффициенты полинома), сохраняя две значащие цифры после запятой:

$$S^6 + 1.33 \cdot S^5 + 1069.5 \cdot S^4 + 947 \cdot S^3 + 152371.45 \cdot S^2 + 92803.6 \cdot S + 14144.6. \qquad (11)$$

Расчет показывает, что нулями полинома являются

$$S_{1,2} = -0.305 \pm 0.044i, \quad S_{3,4} = -0.242 \pm 29.996i, \quad S_{5,6} = -0.118 \pm 13i.$$

Коэффициенты полинома:

$$\alpha_0 = 1, \quad \alpha_1 = 1.33, \quad \alpha_2 = 1069.5, \quad \alpha_3 = 947, \quad \alpha_4 = 152371.45, \quad \alpha_5 = 92803.6, \quad \alpha_6 = 14444.6.$$

Коэффициенты корректирующих обратных связей, соответствующих равенствам (8):

$$k_1 = \alpha_6 = 14444.6, \quad k_2 = \alpha_5 = 92803.6, \quad k_3 = 152371.45, \quad k_4 = 947.208, \quad k_5 = 1069, \quad k_6 = 1.33.$$

На рис. 2 представлена схема математического моделирования, с использованием пакета программ Matlab, движения системы «ОР с модальным регулятором»; на рис. 3, 4 – результаты моделирования – реакция системы на внешнее единичное воздействие.

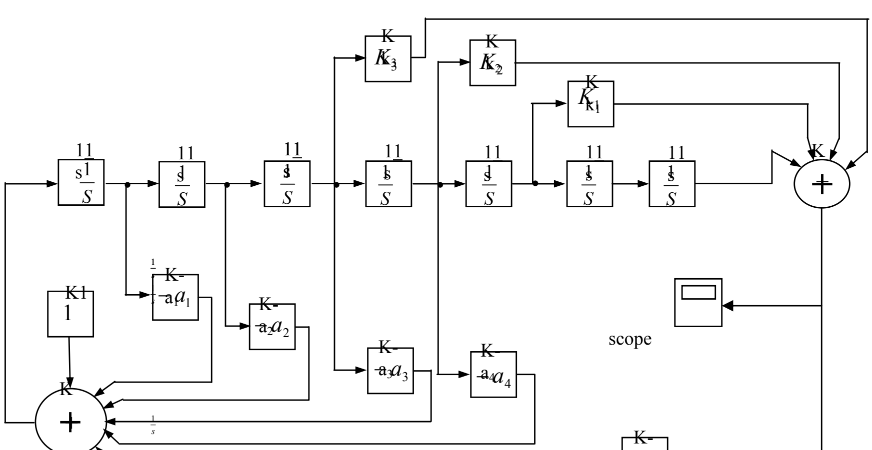

Рис. 2. Схема моделирования движения системы, которой соответствует полином (10)

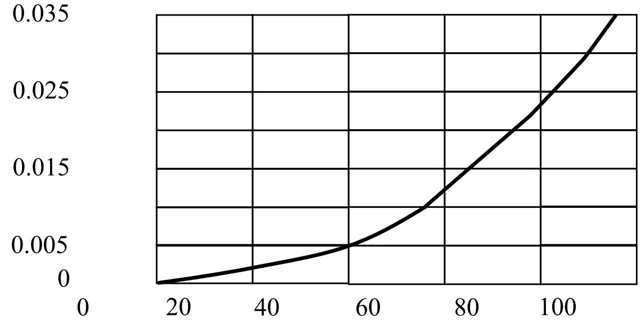

Рис. 3. Реакция системы «ОР с корректирующими связями» на внешнее воздействие

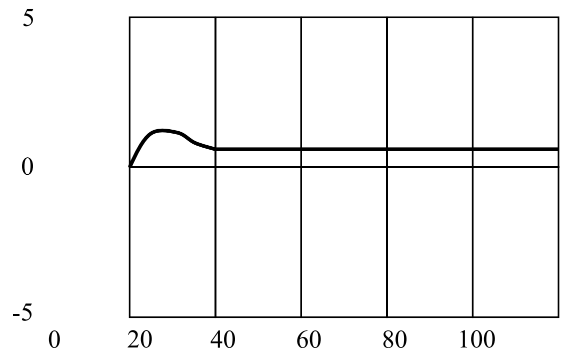

Рис. 4. Реакция системы «ОР с корректирующими связями» на внешнее воздействие

Результаты исследования, которые следует рассматривать как предварительные, указывают на принципиальную возможность стабилизировать движение космической конструкции (1) с использованием корректирующих обратных связей.

Библиографические ссылки

1. **Баничук Н. В.** Механика больших космических конструкций / Н. В. Баничук, И. И. Карпов, Д. М. Климов, А. П. Маркеев и др. – М. : Факториал, 1997. – 302 с.
2. **Бессекерский В. А.** Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бессекерский, Е. П. Попов**. –** М. : Наука, 1966. – 752 с.
3. **Игдалов И. М.** Ракета как объект управления / И. М. Игдалов, Л. Д. Кучма, Н. В. Поляков, Ю. Д. Шептун. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2004. – 542 с.
4. **Игдалов И. М.** Динамическое проектирование ракет / И. М. Игдалов, Л. Д. Кучма, Н. В. Поляков, Ю. Д. Шептун. – Днепропетровск : Изд-во ДНУ, 2010. – 264 с.
5. **Микишев Г. Н.** Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость / Г. Н. Микишев, Б. И. Рабинович. – М. : Машиностроение, 1971. – 563 с.
6. **Рабинович Б. И.** Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов / Б. И. Рабинович. – М. : Машиностроение, 1975. – 416 с.

Надійшла до редколегії 17.10.2014 р.