

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗЕРКАЛОМ В КАРДАНОВОМ ПОДВЕСЕ ДЛЯ ОБЗОРНО-ПОИСКОВЫХ СИСТЕМ ВОЗДУШНОГО БАЗИРОВАНИЯ

© 2012 г. В. А. Балоев\*, канд. техн. наук; Ю. М. Беляков\*\*, канд. техн. наук;  
А. И. Карпов\*\*, канд. техн. наук; В. А. Кренев\*\*, канд. техн. наук; Д. А. Молин\*\*;  
А. Г. Матвеев\*; В. С. Яцык\*, канд. техн. наук

\* НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

\*\* Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань

Построена математическая модель системы управления зеркалом обзорно-поисковой системы, установленной на летательном аппарате. Предложены алгоритмы управления, обеспечивающие требуемые динамические характеристики сканирования, наведения и слежения. Разработаны имитационные модели для трех режимов работы: сканирования, наведения и слежения.

*Ключевые слова:* объект управления, математическая модель, оптико-электронная система, имитационная модель, алгоритм управления.

Коды OCIS: 220.4830, 220.4880.

Поступила в редакцию 02.12.2011.

### Введение

При разработке и создании сканирующих оптико-электронных систем (ОЭС), в состав которых входят управляемые оптические элементы (зеркала, клинья), возникают задачи разработки адекватных математических моделей, синтеза систем управления и исследования динамических свойств, решение которых без применения компьютерного моделирования представляется проблематичным. При решении этих задач учитывают динамику управления зеркалом и вибрационное смещение изображения [1–3], которые оказывают существенное влияние на качество изображения.

В продолжение работ [4–7] рассматривается разработка имитационной модели (ИМ) системы управления (СУ) зеркалом в кардановом подвесе, обеспечивающем стабилизацию и управление положением оси визирования ОЭС. Модель СУ зеркалом предназначена для исследования динамики и определения требований к алгоритмам управления и конструктивным параметрам устройства сканирования обзорно-поисковой системы авиационного базирования.

### 1. Математическая модель объекта управления

Объект управления (ОУ) моделируется тремя подвижными твердыми телами (1 – азимутальный блок, 2 – угломестный блок, 3 – зеркало), установленными в корпусе, неподвижно закрепленном на летательном аппарате (ЛА). Положение этих тел относительно корпуса однозначно определяется углами поворотов тела 1 ( $\varphi_1$ ) и тела 2 ( $\varphi_2$ ), оси вращения которых совпадают. Ось вращения 3-го тела перпендикулярна оси вращения 1-го и 2-го тел и пересекается с ней.

За инерциальную систему отсчета примем систему координат  $O_0XYZ$ , жестко связанную с поверхностью Земли (рис. 1). Здесь  $O_0Y$  – восходящая вертикаль,  $O_0XZ$  – горизонтальная плоскость,  $O_0XY$  – плоскость тангажа. Система координат  $Sxyz$  жестко связана с центром масс (точка  $C$ ) ЛА. В этой системе ось  $Sx$  направлена по продольной оси симметрии ЛА, ось  $Sy$  – в плоскости симметрии ЛА, ось  $Sz$  перпендикулярна плоскости симметрии. Положение системы координат  $Sxyz$  определяется координатами центра масс ЛА ( $X_C, Y_C, Z_C$ )

и самолетными углами (углом рыскания  $\psi$ , углом тангажа  $\theta$ , углом крена  $\gamma$ ).

Установочная система координат  $OX_1Y_1Z_1$  (рис. 2) жестко связана с ЛА. Ось  $O_1Y_1$  совпадает с осью вращения 1-го и 2-го тел. Ее положение задается координатами точки  $O_1$  ( $x_{O_1}, y_{O_1}, z_{O_1}$ ) в системе координат  $Cxyz$ , связанной с ЛА, и углами  $\psi_y, \theta_y, \gamma_y$ .

Системы координат  $Ox_1y_1z_1, Ox_2y_2z_2$  и  $Ox_3y_3z_3$  (рис. 3) жестко связаны с телами 1, 2 и 3 соответственно, положение начала координат  $O$  совпадает с точкой пересечения оси вращения 3-го тела с осью вращения 1-го и 2-го тел. Оси  $Oy_1$  и  $Oy_2$  совпадают и направлены по оси вращения этих тел, ось  $Oz_1$  совпадает с осью вращения 3-го тела  $Oz_3$ , ось  $Ox_3$  перпендикулярна плоскости зеркала. В установочной системе координат положение точки  $O$  определяется расстоянием  $O_1O$ , а ориентация осей – углами  $\varphi_1, \varphi_2, \theta_0 + \theta$ . Угол  $\theta_0 = \pi/4$ , а  $\theta = (\varphi_2 - \varphi_1)/2$ .

Массы тел равны  $m_j$ , их тензоры инерции в осях  $Ox_1y_1z_1, Ox_2y_2z_2, Ox_3y_3z_3$  задаются матрицами

$$\mathbf{J}^{(j)} = \begin{pmatrix} A_j & -F_j & -E_j \\ -F_j & B_j & -D_j \\ -E_j & -D_j & C_j \end{pmatrix},$$

а положение центров масс – координатами  $x_{Cj}, y_{Cj}, z_{Cj}$  ( $j = 1, 2, 3$ );  $A_j, B_j, C_j$  – осевые,  $D_j, E_j, F_j$  – центробежные моменты инерции тел.

Для построения математической модели движения ОУ относительно ЛА будем применять уравнения Лагранжа II рода [8], используя смешанный метод Жильбера [9]. Проведем через точку  $O$  оси  $OX, OY, OZ$ , параллельные осям  $O_0X, O_0Y, O_0Z$ . Систему координат  $OXYZ$  можно считать инерциальной после добавления к активным силам, действующим на ОУ, только переносных сил инерции, так как она движется поступательно относительно инерциальной системы координат  $O_0XYZ$ . Обозначим ускорение точки  $O$  в инерциальной системе  $O_0XYZ$  отсчета через  $\bar{a}_O$ . Тогда переносные силы инерции вызывают появление обобщенных сил

$$\mathbf{Q}'_i = \sum \left( -m_k^{(j)} \bar{a}_O \frac{\partial \mathbf{r}_k^{(j)}}{\partial q_i} \right) = - \sum_{j=1}^3 \left( m_j \bar{a}_O \frac{\partial \mathbf{r}_C^{(j)}}{\partial q_i} \right), \quad (1.1)$$

где  $\mathbf{r}_C^{(j)}$  – радиус-вектор центра масс  $j$ -го тела в системе координат  $OXYZ$ ,  $m_j$  – масса  $j$ -го тела,  $q_i$  –  $i$ -я обобщенная координата,  $m_k^{(j)}$  – масса  $k$ -й материальной точки  $j$ -го тела,  $\mathbf{r}_k^{(j)}$  – радиус-вектор  $k$ -й материальной точки  $j$ -го тела. За обоб-

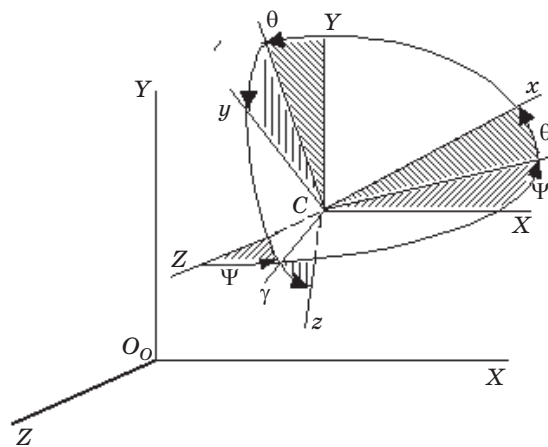


Рис. 1. Системы координат  $O_0XYZ$  и  $Cxyz$ .

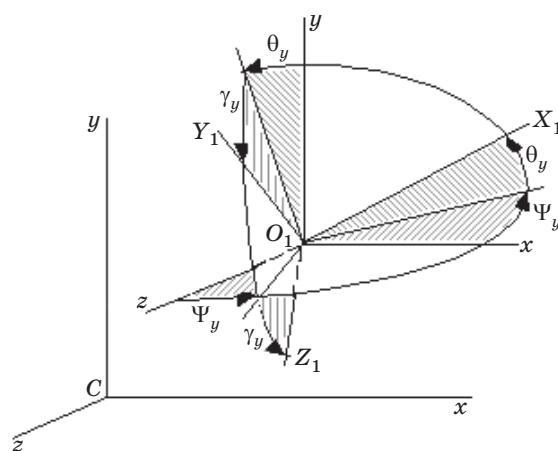


Рис. 2. Системы координат  $Cxyz$  и  $O_0X_1Y_1Z_1$ .

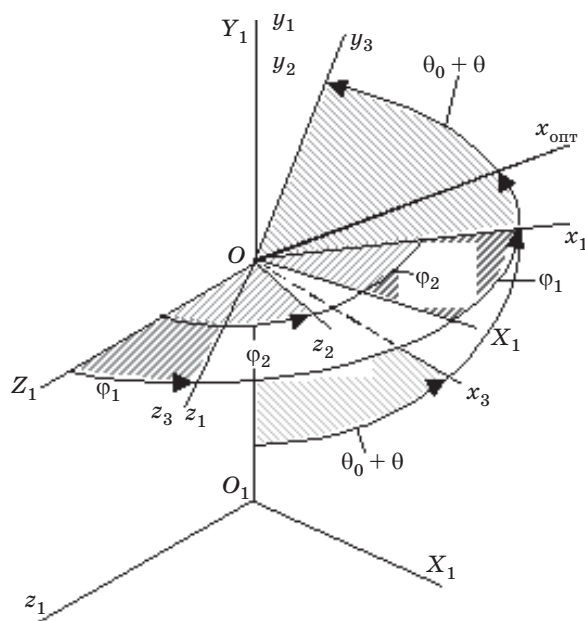


Рис. 3. Системы координат  $O_0x_1y_1z_1, O_0x_2y_2z_2$  и  $O_0x_3y_3z_3$ .

ценные координаты выберем углы поворотов тела 1 и тела 2:  $q_1 = \varphi_1, q_2 = \varphi_2$ .

С корпусом  $OY$  жестко свяжем систему координат  $OX_1Y_1Z_1$  ( $OX_1 \parallel O_1X_1, OY_1 \parallel O_1Y_1, OZ_1 \parallel O_1Z_1$ ). Кинетическая энергия  $OY$  ( $T$ ) в системе координат  $OXYZ$  будет вычисляться с учетом того, что  $OY$  совершает относительное движение в системе координат  $OX_1Y_1Z_1$ , а движение системы координат  $OX_1Y_1Z_1$  относительно  $OXYZ$  является переносным, –

$$T = \sum_{j=1}^3 T_r^{(j)} + \sum_{j=1}^3 \omega(\mathbf{K}_O^r)^{(j)} + \sum_{j=1}^3 \frac{1}{2} \tilde{\omega}_j^T \mathbf{J}^{(j)} \tilde{\omega}_j. \quad (1.2)$$

Здесь  $T_r^{(j)}$  – кинетическая энергия  $j$ -го тела в относительном движении в осях  $OX_1Y_1Z_1$ ,  $(\mathbf{K}_O^r)^{(j)}$  – кинетический момент  $j$ -го тела относительно точки  $O$  в относительном движении в осях системы координат  $OX_1Y_1Z_1$ ,  $\tilde{\omega}_j$  – координатный вектор, составленный из проекций вектора  $\omega$  (угловой скорости системы координат  $OX_1Y_1Z_1$ ) на оси, жестко связанные с  $j$ -м телом:  $\tilde{\omega}_j^T = (\omega_{xj} \ \omega_{yj} \ \omega_{zj})$ ,  $\mathbf{J}^{(j)}$  – тензор инерции  $j$ -го тела.

Уравнения Лагранжа II рода запишутся в следующем виде:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = \mathbf{Q}_i + \mathbf{Q}'_i, \quad (i=1, 2), \quad (1.3)$$

где  $\mathbf{Q}_i$  – обобщенные силы, определяемые действием активных сил (силы тяжести, моменты от азимутального и угломестного приводов, моменты трения). Тогда связи, ограничивающие движение  $OY$  в системе координат  $OX_1Y_1Z_1$ , можно считать идеальными, голономными, удерживающими и стационарными.

Как показано в [10], в вентильном режиме работа каждого из двигателей в приводах с высокой степенью точности описывается уравнениями

$$\begin{aligned} J_p \ddot{\varphi} &= M_{эм} - M_{дв} - M_{тр} \text{sign} \dot{\varphi}, \\ M_{эм} &= c_m i, \quad u = L \frac{di}{dt} + ri + c_e \dot{\varphi}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

где  $\varphi$  – угол поворота вала электродвигателя,  $J_p$  – момент инерции ротора,  $M_{эм}$  – электромагнитный момент,  $M_{дв}$  – момент сопротивления нагрузки, приложенной к ротору двигателя;  $M_{тр}$  – момент трения,  $u$  – напряжение на фазовой обмотке,  $i$  – ток в фазовой обмотке,  $r$  и  $L$  – активное сопротивление и индуктивность фазовой обмотки,  $c_m, c_e$  – конструктивные параметры.

После проведения действий в соответствии с уравнениями (1.3) и с учетом (1.4) получим систему нелинейных нестационарных обыкновенных дифференциальных уравнений  $OY$ , которую запишем в матричной форме как

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{A}}(\boldsymbol{\varphi}) \ddot{\boldsymbol{\varphi}} + \mathbf{N}(\boldsymbol{\varphi}, \dot{\boldsymbol{\varphi}}) + \mathbf{H}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\omega}_1) \dot{\boldsymbol{\varphi}} + \mathbf{L}(\boldsymbol{\varphi}) \boldsymbol{\varepsilon}_1(t) - \\ - \boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\omega}_1) = c_m \mathbf{i} - M_{тр} - \mathbf{P}(\boldsymbol{\varphi}, \mathbf{a}), \\ L \frac{d\mathbf{i}}{dt} = \mathbf{u} - r\mathbf{i} - c_e \dot{\boldsymbol{\varphi}}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varphi} &= \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix}, \quad \dot{\boldsymbol{\varphi}} = \begin{pmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{pmatrix}, \quad \ddot{\boldsymbol{\varphi}} = \begin{pmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{pmatrix}, \\ \mathbf{i} &= \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}; \end{aligned}$$

$$\tilde{\mathbf{A}}(\boldsymbol{\varphi}) = \begin{pmatrix} B_1 + 0,25N_3 + 0,5(A_3 + B_3) + F(\boldsymbol{\varphi}) - E(\boldsymbol{\varphi}) + J_p & -(0,25C_3 - 0,5E(\boldsymbol{\varphi})) \\ -(0,25C_3 - 0,5E(\boldsymbol{\varphi})) & B_2 + 0,25C_3 + J_p \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{N}(\boldsymbol{\varphi}, \dot{\boldsymbol{\varphi}}) = \text{col} \left( \dot{\boldsymbol{\varphi}}^T \mathbf{N}_1(\boldsymbol{\varphi}) \dot{\boldsymbol{\varphi}}, \dot{\boldsymbol{\varphi}}^T \mathbf{N}_2(\boldsymbol{\varphi}) \dot{\boldsymbol{\varphi}} \right),$$

$$\mathbf{h}(\boldsymbol{\varphi}) = (h_1(\boldsymbol{\varphi}) \ h_2(\boldsymbol{\varphi}) \ h_3(\boldsymbol{\varphi}));$$

$$\mathbf{N}_1(\boldsymbol{\varphi}) = \begin{pmatrix} -n_1(\boldsymbol{\varphi}) & n_1(\boldsymbol{\varphi}) \\ n_1(\boldsymbol{\varphi}) & -n_2(\boldsymbol{\varphi}) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{L}(\boldsymbol{\varphi}) = \begin{pmatrix} l_{11}(\boldsymbol{\varphi}) & l_{12}(\boldsymbol{\varphi}) & l_{13}(\boldsymbol{\varphi}) \\ l_{21}(\boldsymbol{\varphi}) & l_{22}(\boldsymbol{\varphi}) & l_{23}(\boldsymbol{\varphi}) \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{N}_2(\boldsymbol{\varphi}) = \begin{pmatrix} n_3(\boldsymbol{\varphi}) & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\omega}_1) = \\ = \frac{1}{2} \text{col} \left( \omega_1^T \frac{\partial \mathbf{S}(\boldsymbol{\varphi})}{\partial \varphi_1} \omega_1(t), \omega_1^T \frac{\partial \mathbf{S}(\boldsymbol{\varphi})}{\partial \varphi_2} \omega_1(t) \right); \end{aligned}$$

$$\mathbf{H}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\omega}_1) = \begin{pmatrix} k_{\varphi_1} & -\mathbf{h}(\boldsymbol{\varphi}) \omega_1(t) \\ \mathbf{h}(\boldsymbol{\varphi}) \omega_1(t) & k_{\varphi_2} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{тр} = \begin{pmatrix} M_{тр,1} \text{sign} \dot{\varphi}_1 \\ M_{тр,2} \text{sign} \dot{\varphi}_2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{P}(\boldsymbol{\varphi}, a) = \text{col} \left( \left( \tilde{\mathbf{g}}^T \mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_y^T + \tilde{\mathbf{a}}_O^T(t) \right) \mathbf{p}_1(\boldsymbol{\varphi}), \right. \\ \left. \left( \tilde{\mathbf{g}}^T \mathbf{A}_c^T \mathbf{A}_y^T + \tilde{\mathbf{a}}_O^T(t) \right) \mathbf{p}_2(\boldsymbol{\varphi}) \right).$$

$$\boldsymbol{\omega}_{1\text{пр}} = \begin{pmatrix} \dot{\varphi}_{1\text{пр}} & \dot{\varphi}_{2\text{пр}1} \end{pmatrix}^T, \\ \boldsymbol{\omega}_{2\text{пр}} = \begin{pmatrix} \dot{\varphi}_{1\text{пр}} & \dot{\varphi}_{2\text{пр}2} \end{pmatrix}^T. \quad (2.5)$$

Обозначения элементов матриц (1.5) приведены в Приложении к статье.

Рассмотрим разработку имитационной модели ОЭС, осуществляющую сканирование поля обзора, наведение и слежение.

## 2. Разработка имитационной модели для режима сканирования

При сканировании поля обзора по углу азимута от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  и по углу места от  $0^\circ$  до  $\theta_{\max}$  ОЭС с элементарным полем зрения  $\Delta\theta$  с зоной перекрытия 10% ( $\Delta\theta_p = 0,1\Delta\theta$ ) при частоте кадров  $f$  программная угловая скорость азимутального привода принимается равной

$$\dot{\varphi}_{1\text{пр}} = (\Delta\theta - \Delta\theta_p) f \frac{\pi}{180}, c^{-1}, \quad (2.1)$$

при этом программная угловая скорость угломестного привода  $\dot{\varphi}_{2\text{пр}1}$  находится из выражений

$$(\Delta\theta - \Delta\theta_p) \frac{\pi}{180} = \dot{\theta}_{\text{пр}} \frac{2\pi}{\dot{\varphi}_{1\text{пр}}}, \\ \dot{\theta}_{\text{пр}} = \dot{\varphi}_{2\text{пр}1} - \dot{\varphi}_{1\text{пр}}$$

и составляет

$$\dot{\varphi}_{2\text{пр}1} = \dot{\varphi}_{1\text{пр}} \left( 1 + \frac{\Delta\theta - \Delta\theta_p}{360} \right). \quad (2.2)$$

Затем поле обзора просматривается путем изменения угла места от  $\theta_{\max}$  до  $0^\circ$ , при этом угловая скорость угломестного привода  $\dot{\varphi}_2$  находится аналогично –

$$(\Delta\theta - \Delta\theta_p) \frac{\pi}{180} = -\dot{\theta}_{\text{пр}} \frac{2\pi}{\dot{\varphi}_{1\text{пр}}}, \\ \dot{\theta}_{\text{пр}} = \dot{\varphi}_{2\text{пр}1} - \dot{\varphi}_{1\text{пр}}, \quad (2.3) \\ \dot{\varphi}_{2\text{пр}2} = \dot{\varphi}_{1\text{пр}} \left( 1 - \frac{\Delta\theta - \Delta\theta_p}{360} \right).$$

Время обзора без учета инерционных свойств ОУ определяется как

$$T_{\text{обз}} = \frac{360(\theta_{\max} - \Delta\theta)}{f(\Delta\theta - \Delta\theta_p)^2}. \quad (2.4)$$

Такой цикл обзора повторяется многократно. Программные значения угловой скорости ОУ составляют

Из уравнений (1.5) находим значения подаваемых на двигатели программных напряжений  $u_{1\text{пр}}$ ,  $u_{2\text{пр}}$ , которые зависят от значений углов  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и от маневра летательного аппарата, –

$$u_{1\text{пр}} = \frac{r}{c_M} \left( M_{\text{тр}} + \mathbf{N}(\mathbf{0}, \boldsymbol{\omega}_{1\text{пр}}) \right) + \\ + \mathbf{H}(\mathbf{0}, \mathbf{0}) \boldsymbol{\omega}_{1\text{пр}} + \mathbf{P}(\mathbf{0}, \mathbf{0}) + c_e \boldsymbol{\omega}_{1\text{пр}}, \quad (2.6) \\ \text{при } \dot{\theta} > 0 \cap (0 \leq \theta \leq \theta_{\max}),$$

$$u_{2\text{пр}} = \frac{r}{c_M} \left( M_{\text{тр}} + \mathbf{N}(\mathbf{0}, \boldsymbol{\omega}_{2\text{пр}}) \right) + \\ + \mathbf{H}(\mathbf{0}, \mathbf{0}) \boldsymbol{\omega}_{2\text{пр}} + \mathbf{P}(\mathbf{0}, \mathbf{0}) + c_e \boldsymbol{\omega}_{2\text{пр}}, \quad (2.7) \\ \text{при } \dot{\theta} < 0 \cap (0 \leq \theta \leq \theta_{\max}).$$

Для компенсации возмущений, действующих на зеркало со стороны ЛА, и перекрестных связей между каналами азимутального и угломестного приводов, напряжения, подаваемые на двигатели, формируются введением обратной связи по угловой скорости с коэффициентом передачи  $k_{\text{ос}}$

$$u_1 = u_{1\text{пр}} - k_{\text{ос}} (\omega - \omega_{1\text{пр}}), \\ u_2 = u_{2\text{пр}} - k_{\text{ос}} (\omega - \omega_{2\text{пр}}), \quad (2.8)$$

где вектор текущей угловой скорости  $\boldsymbol{\omega}$  вычисляется по показаниям датчиков углов с учетом их дискретности. Учитывается и то, что управляющее напряжение не может превышать 27 В.

Имитационная модель режима сканирования реализована в среде Mathcad в соответствии с уравнениями (1.5), (2.1)–(2.8). Проведено моделирование при заданных конструктивных параметрах ОУ, установленного на ЛА, совершающем правильный вираж со скоростью 1500 км/ч и угле крена  $\gamma = 80^\circ$ , для  $\theta_{\max} = 60^\circ$ ,  $f = 400$  Гц,  $\Delta\theta = 5,5^\circ$  при дискретности показаний датчиков углов 4096 штр/об,  $k_{\text{ос}} = 10$ . Время обзора при указанных параметрах, найденное по формуле (2.4), равно 2,002 с. Имитационное моделирование показывает, что при пилообразном законе изменения угла места от  $0^\circ$  до  $60^\circ$  время обзора составляет 1,977 с, а при изменении угла места от  $60^\circ$  до  $0^\circ$  – 2,193 с.

### 3. Разработка имитационной модели для режима перевода оси визирования ОЭС по внешнему целеуказанию

Предлагается следующий закон управления приводами ОУ в режиме отработки целеуказания (РОЦ):

$$U = u_{пр} + u_1, \quad (3.1)$$

$$u_{пр} = \frac{r}{c_m} (M_{тр} + N(\varphi_{пр}, \omega_{пр}) + H(\varphi_{пр}, 0)\omega_{1пр} + P(\varphi_{пр}, a)) + c_e \omega_{пр}, \quad (3.2)$$

$$u_1 = \begin{cases} U_0, & \text{если } u \geq U_0, \\ -U_0, & \text{если } u \leq -U_0, \\ u, & \text{если } -U_0 < u < U_0. \end{cases} \quad (3.3)$$

Здесь  $U$  – напряжение, подаваемое на двигатели,  $U_0$  – значение напряжения, подаваемого на двигатели, в момент перехода из режима сканирования пространства в РОЦ;

$$u = (u_{\varphi 1} \quad u_{\varphi 2})^T, \quad (3.4)$$

$u_{\varphi 1}$  и  $u_{\varphi 2}$  – законы управления азимутальным и угломестным приводами

$$u_{\varphi 1} = k_{\omega} [(\dot{\varphi}_{1ц} - \omega_1) + k_{\varphi} (\varphi_{вз} - \varphi_1)], \quad (3.5)$$

где входной угол, определяемый вычислительным устройством, –

$$\varphi_{вз} = \begin{cases} \varphi_{1ц} & \text{если } \varphi_{1ц} \geq \pi/2, \\ \varphi_{1ц} + 2\pi & \text{если } \varphi_{1ц} < \pi/2, \end{cases}$$

$$u_{\varphi 2} = k_{\omega} [((\dot{\varphi}_{2ц} - \omega_2)) + k_{\varphi} (\varphi_{вз} + \theta_{ц} - \varphi_2)]. \quad (3.6)$$

Здесь  $k_{\omega} = 150$ ,  $k_{\varphi} = 17$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – текущие значения угловых скоростей приводов (вычисляются по показаниям датчиков углов с учетом их дискретности),  $\varphi_{1ц} = \varphi_{1ц}(t)$ ,  $\theta_{ц} = \theta_{ц}(t)$  – законы изменения углов поворота зеркала  $\varphi_1$  и  $\theta$  в РОЦ. Управляющее напряжение не превышает 27 В.

В соответствии с законами управления (3.5)–(3.6) построена структурная схема системы управления приводами зеркала в кардановом подвесе для режима перевода оси визирования ОЭС по внешнему целеуказанию (рис. 4).

На рис. 5 показана траектория движения к цели  $\varphi_{1ц} = 270^\circ$ ,  $\theta_{ц} = 0$  из положения  $\varphi_1(0) = 180^\circ$ ,  $\dot{\varphi}_1(0) = 25,918$  рад/с,  $\theta(0) = 30^\circ$ ,  $\dot{\theta}(0) = 0,356$  рад/с (справа крупным планом показан конечный участок траектории).

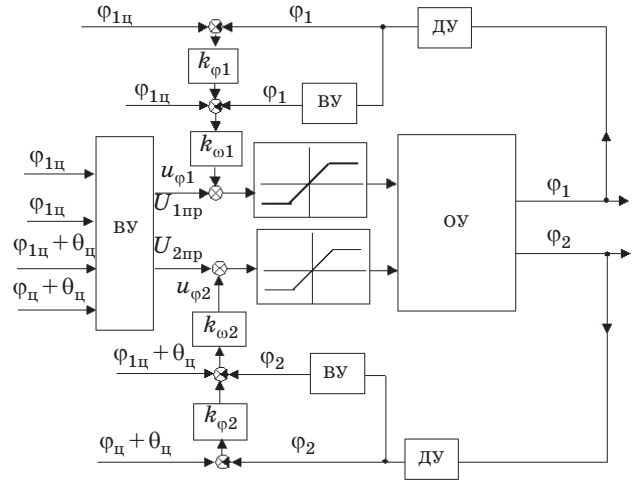


Рис. 4. Структурная схема системы управления зеркалом в РОЦ. ВУ – вычислительное устройство, ДУ – датчик угла.

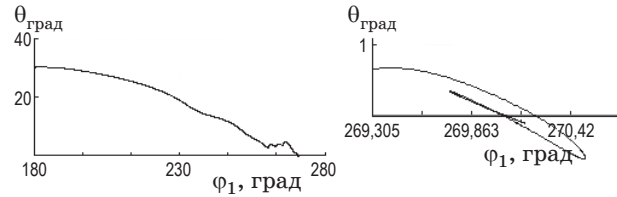


Рис. 5. Траектория движения к цели в плоскости углов азимута и места.

Предложенный закон управления обеспечивает переход ОЭС из режима сканирования в заданную точку визирования за 0,5 с с погрешностями не более 0,08 по углу азимута и 0,095 по углу места.

### 4. Разработка имитационной модели для режима слежения

Синтез алгоритмов управления проводился частотным методом [10]. Исходя из условий устойчивости и заданных требований качества регулирования, получены алгоритмы управления приводами зеркала в кардановом подвесе с учетом их динамических характеристик для линеаризованной системы (1.5) в виде:

$$\begin{aligned} u_a &= R_1(p)(\psi_{вх} - \varphi_1) + R_3(p)\psi_{н}, \\ u_t &= R_2(p)(\theta_{вх} - \theta) + R_4(p)\theta_{н}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где  $u_a$ ,  $u_t$  – напряжения управления приводами,  $\psi_{н}$ ,  $\theta_{н}$  – движение носителя,  $\psi_{вх}$ ,  $\theta_{вх}$  – движение объекта наблюдения (ОН) относительно оптической оси соответственно по азимуту



и тангажу; передаточные функции регуляторов по отклонению ( $R_1(p)$ ,  $R_2(p)$ ) и форсирующих регуляторов ( $R_3(p)$ ,  $R_4(p)$ ), обеспечивающих инвариантность к колебаниям носителя:

$$R_1(p) = \frac{K_1}{(0,0001p+1)} \frac{(0,134p+1)}{(0,00012p+1)} \frac{(\tau_1 p+1)}{p},$$

$$R_2(p) = \frac{K_2}{(0,0001p+1)} \frac{(0,104p+1)}{(0,00012p+1)} \frac{(\tau_2 p+1)}{p},$$

$$R_3(p) = \frac{K_3 p}{1} \frac{(0,134p+1)}{(0,0001p+1)},$$

$$R_4(p) = \frac{K_4 p}{1} \frac{(0,104p+1)}{(0,0001p+1)}.$$

Добротности по ускорению  $K_{ei}$  ( $K_1$ ,  $K_2$ ) и постоянные времени ( $\tau_i$ ) определены из известных условий [10]:

$$K_{ei} \geq \frac{\varepsilon_{\max}}{\Delta\varphi}, \quad \tau = \sqrt{\frac{M}{K_{ei}(M-1)}}, \quad (4.2)$$

где  $K_{ei} = K_1/c_e = K_2/c_e$ ,  $\varepsilon_{\max}$  – максимальное значение входных угловых ускорений,  $\Delta\varphi$  – значение погрешности,  $M$  – показатель колебательности изолированных каналов управления системы автоматического управления (САУ) зеркалом.

Из условий (4.2) и критерия Найквиста [10] получены значения  $K_1 = 4600$ ,  $K_2 = 4600$ ,  $\tau_1 = \tau_2 = 1/30$ , при которых линейная САУ зеркалом (без учета дисбаланса и асимметрии ОУ) устойчива с требуемыми запасами устойчивости и обеспечивает заданные показатели качества регулирования.

С учетом периода квантования ( $T_k$ ) параметры цифровой САУ ( $K_{\varepsilon}$ ,  $\tau_i$ ,  $T_k$ ,  $\Sigma T_i$ ) при синтезе регуляторов доопределены из условий [10] (см. таблицу)

$$T_k \leq 2 \left( \frac{M}{\omega_{cp}(M+1)} - \sum T_i \right),$$

$$\frac{K_{\varepsilon} \left( T + \sum T_i \right)^2}{4} \leq \frac{M(M-1)}{(M+1)^2}, \quad (4.3)$$

где  $\omega_{cp} = K_{\varepsilon}\tau$  – частота среза,  $\Sigma T_i = 22$  мкс – сумма малых постоянных времени, меньших периода квантования.

Математическая модель ОУ (1.5) с алгоритмами управления (4.1) реализована в пакете Simulink MATLAB. Блочная функциональная схема разработанной ИМ представлена на рис. 6, где в зависимости от сложности входящих в нее уравнений реализовано от одного до шести уровней субмоделей. На рис. 6 обозначено: Д – блок вычисления коэффициентов

Параметры регуляторов САУ в режиме слежения

$T_k, c$ ( $f = 1/T$ ), (Гц)	0,01 (100)	0,0066 (150)	0,005 (200)	0,0033 (300)	0,0025 (400)	$M$
$K_{\varepsilon}$	950	2100	3600	8000	13 000	1,1
$K_1 = K_2$	220	500	850	1890	3000	
$\tau, c$	0,108	0,072	0,055	0,037	0,029	
$K_{\varepsilon}$	1850	4200	7200	16 000	26 000	1,2
$K_1 = K_2$	430	820	990	3700	6100	
$\tau, c$	0,057	0,038	0,029	0,019	0,015	

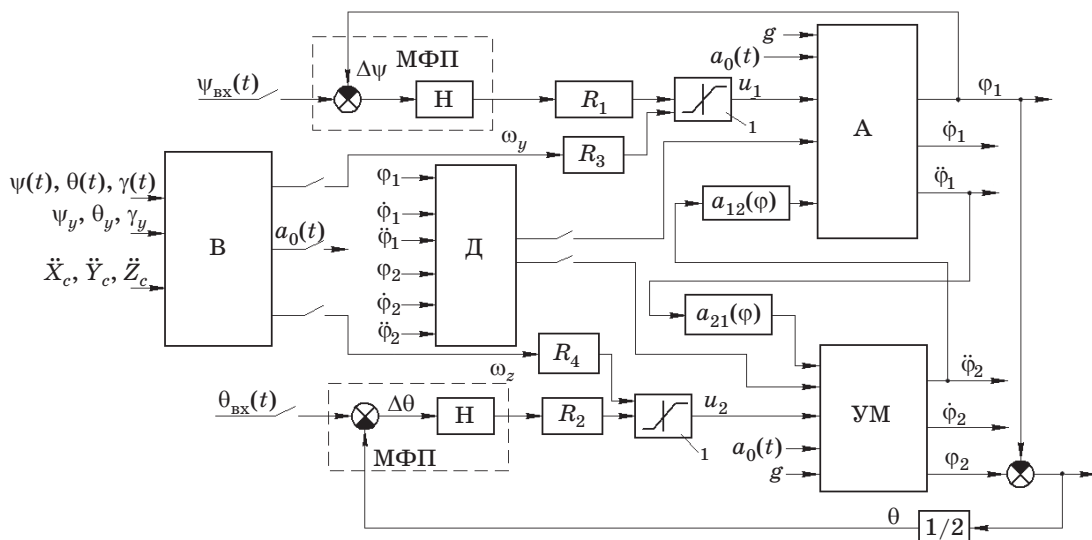


Рис. 6. Блочная функциональная схема ИМ в режиме слежения. Пояснения в тексте.

уравнений (1.5), учитывающих дисбаланс и асимметрию ОУ; А и УМ – блоки, учитывающие динамику ОУ с азимутальным и угломестным приводами соответственно; МФП – блок, учитывающий динамику и статистические характеристики матричного фотоприемника; Н – блок, учитывающий нелинейности фотоприемника (поле зрения, дискретизацию по углу и по времени); 1 – блок, учитывающий насыщение в усилителе мощности. В блоке В вычисляются коэффициенты уравнений (1.5), зависящие от движения ЛА.

При разработке ИМ учтены следующие ограничения по координатам: поля зрения ОЭС, управляющих напряжений приводов и тангажному углу поворота зеркала, а также нелинейности: моменты трения, дискретизация по частоте кадров. При моделировании процессов слежения ИМ позволяет оценить динамические характеристики САУ и погрешности слежения, вносимые видимым движением ОН, колебаниями носителя, конструктивными параметрами ОУ (масса, моменты инерции, центры масс и дисбаланс вращающихся элементов, координаты крепления прибора) и параметрами регулятора (законы регулирования, моменты трения),

нелинейностями в регуляторе и ОУ, вибрациями, частотой формирования кадров.

Было показано, что для режима слежения за ОН с гармоническим законом движения с максимальными угловой скоростью визирования  $\pm 60$  град/с и ускорением  $\pm 60$  град/с<sup>2</sup>, колебаниями носителя с амплитудой 1 град и частотами 2–3 Гц, а также вибрациями на частоте 10 Гц рассматриваемые алгоритмы управления (4.1) согласно (4.2), (4.3) обеспечивают устойчивое слежение за ОН с динамическими погрешностями, не превышающими 6,4', 0,7', 1,53' на частотах 0,16 Гц, 2 Гц, 10 Гц соответственно. На рис. 7 приведены характерные переходные и установившиеся процессы слежения, где  $\Delta\varphi_1$  и  $\Delta\theta$  – погрешности слежения по азимуту и углу места. При входных воздействиях  $\psi_{вх} = 1,047\sin(1 \cdot t)$ ,  $\theta_{вх} = 0,26\sin(1 \cdot t)$ , колебаниях носителя с амплитудой 1 град и частотой 2 Гц, а также виброускорении 0,7g на частоте 10 Гц и действии моментов трения 0,1 Н м погрешности слежения имеют гармонические составляющие от действия возмущений и характерные всплески, обусловленные сменой направления движения зеркала и величиной моментов трения.

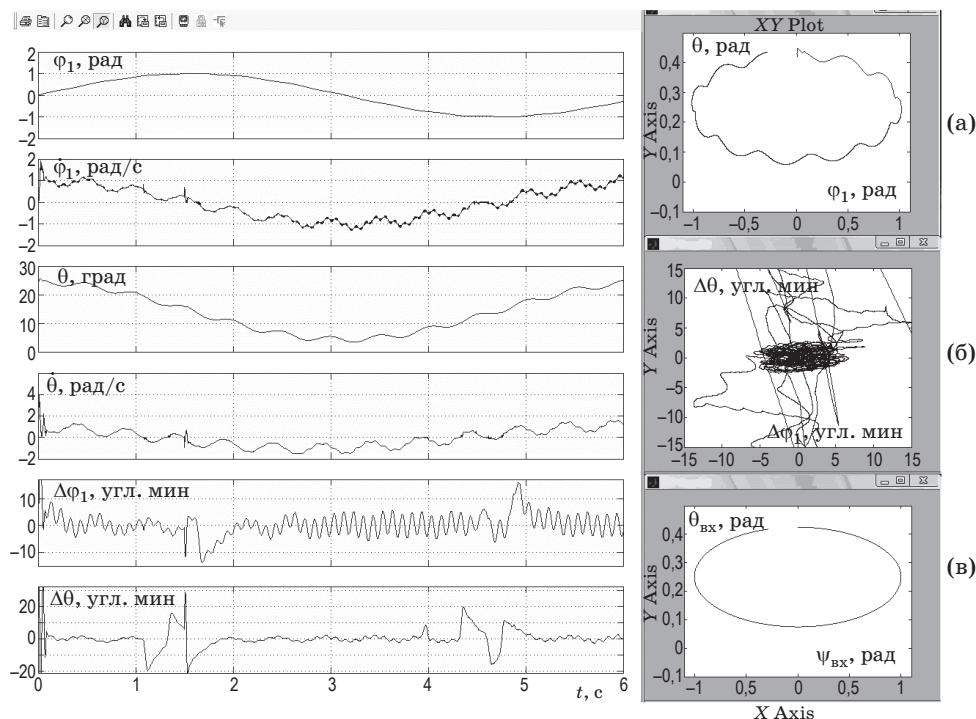


Рис. 7. Переходные и установившиеся процессы САУ зеркалом (при  $f = 150$  Гц,  $M_{тр1} = M_{тр2} = 0,1$  Н м). Справа: а – пространственная траектория оси визирования на объект наблюдения  $\theta(\varphi_1)$ , б – пространственная траектория погрешности слежения  $\Delta\theta(\Delta\varphi_1)$ , в – входные воздействия  $\theta_{вх}(\psi_{вх})$ .

Наиболее существенными параметрами, влияющими на устойчивость и качество регулирования, являются моменты трения, дисбаланс вращающихся тел и частота кадров; наиболее приемлемыми параметрами САУ –  $K_1 = K_2 = 15\,000$ ,  $f = 400$  Гц,  $\tau = 0,00685$  с,  $u = \pm 15$  В,  $M_{\text{тр}1} = M_{\text{тр}2} = 0,1$  Н м.

### Заключение

1. Разработана математическая модель устройства управления зеркалом в кардановом подвесе, установленном на летательном аппарате, совершающем движение в системе отсчета, связанной с Землей и принятой за инерциальную.

2. На основе этой модели и алгоритмов управления разработана имитационная модель системы автоматического управления зерка-

лом, позволяющая проводить исследование динамики и оценку влияния параметров системы управления зеркалом в трех режимах работы (сканирование поля обзора, обработка внешнего целеуказания, удержание линии визирования на объекте) при заданных движениях носителя и его периодических и вибрационных возмущениях. Конструктивные параметры объекта управления и параметры регулятора можно менять в имитационной модели в широких пределах, что обеспечивает проведение всестороннего анализа законов управления зеркалом.

3. Применение имитационной модели системы управления зеркалом в процессе проектирования оптико-электронных систем позволит обеспечить возможность сокращения затрат на ее разработку, настройку и испытания, а также повысить качество разработок.

*Приложение.* Обозначения элементов матриц уравнений (1.5)

$$n_1(\varphi) = 0,25D(\varphi) - 0,5A(\varphi), \quad n_2(\varphi) = 0,25D(\varphi), \quad n_3(\varphi) = 0,5A(\varphi);$$

$$h_1(\varphi) = [0,5C_3 + F(\varphi)]\cos\varphi_1 + D(\varphi)\sin\varphi_1, \quad h_2(\varphi) = A(\varphi),$$

$$h_3(\varphi) = -[0,5C_3 + F(\varphi)]\sin\varphi_1 + D(\varphi)\cos\varphi_1,$$

$k_{\varphi_1}, k_{\varphi_2}$  – коэффициенты пропорциональности вязкого трения;

$$l_{11}(\varphi) = -\{F_1(\varphi_1) + [A(\varphi) - 0,5D(\varphi)]\cos\varphi_1 + [0,5C_3 - E(\varphi)]\sin\varphi_1\},$$

$$l_{12}(\varphi) = \{B_1 + 0,5(A_3 + B_3) + F(\varphi) - 0,5E(\varphi)\},$$

$$l_{21}(\varphi) = -\{F_2(\varphi_2) + 0,5D(\varphi)\cos\varphi_1 - 0,5C_3\sin\varphi_1\},$$

$$l_{13}(\varphi) = -\{D_1(\varphi_1) - [A(\varphi) - 0,5D(\varphi)]\sin\varphi_1 + [0,5C_3 - E(\varphi)]\cos\varphi_1\},$$

$$l_{22}(\varphi) = \{B_2 + 0,5E(\varphi)\}, \quad l_{23}(\varphi) = -\{D_2(\varphi_2) - 0,5C_3\cos\varphi_1 - 0,5D(\varphi)\sin\varphi_1\};$$

$$\frac{\partial \mathbf{S}(\varphi)}{\partial \varphi_1} = \begin{pmatrix} \frac{\partial s_{11}(\varphi)}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial s_{12}(\varphi)}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial s_{13}(\varphi)}{\partial \varphi_1} \\ \frac{\partial s_{12}(\varphi)}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial s_{22}(\varphi)}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial s_{23}(\varphi)}{\partial \varphi_1} \\ \frac{\partial s_{13}(\varphi)}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial s_{23}(\varphi)}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial s_{33}(\varphi)}{\partial \varphi_1} \end{pmatrix}, \quad \frac{\partial \mathbf{S}(\varphi)}{\partial \varphi_2} = \begin{pmatrix} \frac{\partial s_{11}(\varphi)}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial s_{12}(\varphi)}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial s_{13}(\varphi)}{\partial \varphi_2} \\ \frac{\partial s_{12}(\varphi)}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial s_{22}(\varphi)}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial s_{23}(\varphi)}{\partial \varphi_2} \\ \frac{\partial s_{13}(\varphi)}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial s_{23}(\varphi)}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial s_{33}(\varphi)}{\partial \varphi_2} \end{pmatrix},$$

обозначив

$$\frac{\partial s_{ij}(\varphi)}{\partial \varphi_1} = s_{ij}^{\varphi_1}(\varphi), \quad \frac{\partial s_{ij}(\varphi)}{\partial \varphi_2} = s_{ij}^{\varphi_2}(\varphi) \quad (i = 1, 3, j = 1, 3),$$

запишем:



$$s_{11}^{\varphi_1}(\varphi) = -2E_1(\varphi_1) - A(\varphi) \cos^2(\varphi_1) + (F(\varphi) + 0,5E(\varphi)) \sin(2\varphi_1) - 2D(\varphi) \cos(2\varphi_1),$$

$$s_{12}^{\varphi_1}(\varphi) = D_1(\varphi_1) - (A(\varphi) + 0,5D(\varphi)) \sin \varphi_1 - (F(\varphi) + E(\varphi)) \cos(\varphi_1),$$

$$s_{13}^{\varphi_1}(\varphi) = 2A_1(\varphi_1) - (2D(\varphi) + 0,5A(\varphi)) \sin(2\varphi_1) - (F(\varphi) + 0,5E(\varphi)) \cos(2\varphi_1),$$

$$s_{22}^{\varphi_1}(\varphi) = A(\varphi), \quad s_{23}^{\varphi_1}(\varphi) = -F_1(\varphi_1) - (A(\varphi) + 0,5D(\varphi)) \cos(\varphi_1) + (E(\varphi) + F(\varphi)) \sin(\varphi_1),$$

$$s_{33}^{\varphi_1}(\varphi) = 2E_1(\varphi_1) - A(\varphi) \sin^2(\varphi_1) - (F(\varphi) + 0,5E(\varphi)) \sin(2\varphi_1) + 2D(\varphi) \cos(2\varphi_1),$$

$$s_{11}^{\varphi_2}(\varphi) = -2E_2(\varphi_2) + A(\varphi) \cos^2(\varphi_1) - 0,5E(\varphi) \sin(2\varphi_1),$$

$$s_{12}^{\varphi_2}(\varphi) = D_2(\varphi_2) + F(\varphi) \cos(\varphi_1) + 0,5D(\varphi) \sin \varphi_1,$$

$$s_{13}^{\varphi_2}(\varphi) = 2A_2(\varphi_2) + 0,5A(\varphi) \sin(2\varphi_1) + 0,5E(\varphi) \cos(2\varphi_1), \quad s_{22}^{\varphi_2}(\varphi) = -A(\varphi),$$

$$s_{23}^{\varphi_2}(\varphi) = -F_2(\varphi_2) - F(\varphi) \sin(\varphi_1) + 0,5D(\varphi) \cos(\varphi_1),$$

$$s_{33}^{\varphi_2}(\varphi) = 2E_2(\varphi_2) + A(\varphi) \sin^2(\varphi_1) + 0,5E(\varphi) \sin(2\varphi_1);$$

$$\tilde{\mathbf{a}}_O(t) = \mathbf{A}_y \mathbf{A}_c \tilde{\mathbf{r}}_C + (\boldsymbol{\omega}_1 \boldsymbol{\omega}_1^T - \boldsymbol{\omega}_1^T \boldsymbol{\omega}_1 \mathbf{E} + \tilde{\mathbf{A}}_\varepsilon) (\mathbf{A}_y \tilde{\mathbf{r}}_{O_1} + \tilde{\mathbf{r}}_O),$$

$$\tilde{\mathbf{g}} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{g} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{r}}_C = \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_C \\ \ddot{\mathbf{Y}}_C \\ \ddot{\mathbf{Z}}_C \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{r}}_{O_1} = \begin{pmatrix} x_{O_1} \\ y_{O_1} \\ z_{O_1} \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{r}}_O = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ Y_O \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{A}}_\varepsilon = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & -\varepsilon_{Z1}(t) & \varepsilon_{Y1}(t) \\ \varepsilon_{Z1}(t) & \mathbf{0} & -\varepsilon_{X1}(t) \\ -\varepsilon_{Y1}(t) & \varepsilon_{X1}(t) & \mathbf{0} \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{\omega}_1 = \mathbf{A}_y \begin{pmatrix} \dot{\psi} \sin \theta + \dot{\gamma} \\ \dot{\psi} \cos \theta \cos \gamma + \dot{\theta} \sin \gamma \\ -\dot{\psi} \cos \theta \sin \gamma + \dot{\theta} \cos \gamma \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_1(t) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{X1}(t) \\ \varepsilon_{Y1}(t) \\ \varepsilon_{Z1}(t) \end{pmatrix} = \mathbf{A}_y \begin{pmatrix} \varepsilon_x(t) \\ \varepsilon_y(t) \\ \varepsilon_z(t) \end{pmatrix},$$

$$\varepsilon_x(t) = \dot{\omega}_x(t) = \ddot{\psi} \sin \theta + \ddot{\gamma} + \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta,$$

$$\varepsilon_y(t) = \dot{\omega}_y(t) = \ddot{\psi} \cos \theta \cos \gamma + \ddot{\theta} \sin \gamma - \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta \cos \gamma - \dot{\psi} \dot{\gamma} \cos \theta \sin \gamma + \dot{\theta} \dot{\gamma} \cos \gamma,$$

$$\varepsilon_z(t) = \dot{\omega}_z(t) = -\ddot{\psi} \cos \theta \sin \gamma + \ddot{\theta} \cos \gamma + \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta \sin \gamma - \dot{\psi} \dot{\gamma} \cos \theta \cos \gamma - \dot{\theta} \dot{\gamma} \sin \gamma;$$

$$\mathbf{p}_1(\varphi) = \begin{pmatrix} m_1 \begin{pmatrix} -x_{C_1} \sin \varphi_1 + z_{C_1} \cos \varphi_1 \\ \mathbf{0} \\ -x_{C_1} \cos \varphi_1 - z_{C_1} \sin \varphi_1 \end{pmatrix} + m_3 \begin{pmatrix} -\left(x_{C_3} \sin\left(\theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) + y_{C_3} \cos\left(\theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right)\right) \sin \varphi_1 \\ \mathbf{0} \\ -\left(x_{C_3} \sin\left(\theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) + y_{C_3} \cos\left(\theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right)\right) \cos \varphi_1 \end{pmatrix} + m_3 \begin{pmatrix} -\left(\frac{x_{C_3}}{2} \cos\left(\theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) - \frac{y_{C_3}}{2} \sin\left(\theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) - z_{C_3}\right) \cos \varphi_1 \\ -\frac{x_{C_3}}{2} \sin\left(\theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) - \frac{y_{C_3}}{2} \cos\left(\theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \\ + \left(\frac{x_{C_3}}{2} \cos\left(\theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) - \frac{y_{C_3}}{2} \sin\left(\theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) - z_{C_3}\right) \sin \varphi_1 \end{pmatrix} \right),$$

$$\mathbf{p}_2(\boldsymbol{\varphi}) = \begin{pmatrix} m_2 \begin{pmatrix} -x_{C_2} \sin \varphi_2 + z_{C_2} \cos \varphi_2 \\ 0 \\ -x_{C_2} \cos \varphi_2 - z_{C_2} \sin \varphi_2 \end{pmatrix} + m_3 \begin{pmatrix} \left( \frac{x_{C_3}}{2} \cos \left( \theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) - \frac{y_{C_3}}{2} \sin \left( \theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) \right) \cos \varphi_1 \\ \frac{x_{C_3}}{2} \sin \left( \theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \frac{y_{C_3}}{2} \cos \left( \theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) \\ - \left( \frac{x_{C_3}}{2} \cos \left( \theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) - \frac{y_{C_3}}{2} \sin \left( \theta_0 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) \right) \sin \varphi_1 \end{pmatrix} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_c = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \theta & -\sin \psi \cos \theta \\ -\cos \psi \sin \theta \cos \gamma + \sin \psi \sin \gamma & \cos \theta \cos \gamma & \sin \psi \sin \theta \cos \gamma + \cos \psi \sin \gamma \\ \cos \psi \sin \theta \sin \gamma + \sin \psi \cos \gamma & -\cos \theta \sin \gamma & -\sin \psi \sin \theta \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_y = \begin{pmatrix} \cos \psi_y \cos \theta_y & \sin \theta_y & -\sin \psi_y \cos \theta_y \\ -\cos \psi_y \sin \theta_y \cos \gamma_y + \sin \psi_y \sin \gamma_y & \cos \theta_y \cos \gamma_y & \sin \psi_y \sin \theta_y \cos \gamma_y + \cos \psi_y \sin \gamma_y \\ \cos \psi_y \sin \theta_y \sin \gamma_y + \sin \psi_y \cos \gamma_y & -\cos \theta_y \sin \gamma_y & -\sin \psi_y \sin \theta_y \sin \gamma_y + \cos \psi_y \cos \gamma_y \end{pmatrix},$$

$$A(\boldsymbol{\varphi}) = 0,5(A_3 - B_3) \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + F_3 \sin(\varphi_2 - \varphi_1),$$

$$F(\boldsymbol{\varphi}) = 0,5(B_3 - A_3) \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + F_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_1),$$

$$E(\boldsymbol{\varphi}) = E_3 \cos(0,25\pi + 0,5(\varphi_2 - \varphi_1)) - D_3 \sin(0,25\pi + 0,5(\varphi_2 - \varphi_1)),$$

$$D(\boldsymbol{\varphi}) = E_3 \sin(0,25\pi + 0,5(\varphi_2 - \varphi_1)) + D_3 \cos(0,25\pi + 0,5(\varphi_2 - \varphi_1)),$$

$$F_1(\varphi_1) = F_1 \cos(\varphi_1) + D_1 \sin(\varphi_1), \quad F_2(\varphi_2) = F_2 \cos(\varphi_2) + D_2 \sin(\varphi_2),$$

$$D_1(\varphi_1) = D_1 \cos(\varphi_1) - F_1 \sin(\varphi_1), \quad D_2(\varphi_2) = D_2 \cos(\varphi_2) - F_2 \sin(\varphi_2),$$

$$A_1(\varphi_1) = (0,5(A_1 - C_1 - C_3) + 0,25(A_3 + B_3)) \cos(2\varphi_1) - E_1 \sin(2\varphi_1),$$

$$A_2(\varphi_2) = 0,5(A_2 - C_2) \cos(2\varphi_2) - E_2 \sin(2\varphi_2),$$

$$E_1(\varphi_1) = (0,5(A_1 - C_1 - C_3) + 0,25(A_3 + B_3)) \sin(2\varphi_1) + E_1 \cos(2\varphi_1),$$

$$E_2(\varphi_2) = 0,5(A_2 - C_2) \sin(2\varphi_2) + E_2 \cos(2\varphi_2).$$

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Торшина И.П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации. М.: Логос, 2009. 248 с.
2. Карпов А.И., Стрежнев В.А. Динамика и методы расчета систем автоматического управления стратосферных обсерваторий. Идентификация, декомпозиция, синтез: Монография. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. 175 с.
3. Дулькин Л.З., Земляков А.С., Матросов В.М., Стрежнев В.А., Карпов А.И. Задачи инвариантности и устойчивости в динамике стратосферных обсерваторий // В кн. "Метод функций Ляпунова в динамике нелинейных систем". Новосибирск: Наука, 1983. С. 157-158.
4. Беляков Ю.М., Карпов А.И., Крнев В.А., Молин Д.А. Методика разработки математических моделей автоматических бортовых оптико-электронных систем // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 3. С. 34-39.

5. Карпов А.И., Кренив В.А., Матвеев А.Г., Молин Д.А., Яцык В.С. Разработка компьютерной имитационной модели бортового оптико-электронного прибора // Сб. материалов XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конф. “Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий”. Казань, 2009. Ч. 2. С. 239–241.
  6. Беляков Ю.М., Карпов А.И., Кренив В.А., Матвеев А.Г., Молин Д.А., Яцык В.С. Применение имитационной модели управления зеркалом в пространстве при разработке ОЭП // Тез. докл. научно-практической конф. “Оптика, фотоника и оптоинформатика в науке и технике”. М., 2009. С. 71.
  7. Карпов А.И., Кренив В.А., Матвеев А.Г., Яцык В.С. К вопросу построения математической модели устройства сканирования оптико-электронных систем // Материалы Международной научно-практической конф. “Современные технологии – ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения”. Казань, 2008. Т. 2. С. 56–60.
  8. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. Учебник в 2-х томах. Т. II.: Динамика. М.: Наука, 1979. 544 с.
  9. Аппель П. Теоретическая механика. Том второй. Динамика системы. Аналитическая механика. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. 487 с.
  10. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
-