

Сомов Е.И., Бутырин С.А.

РЕДУКЦИЯ МОДЕЛИ КЛАСТЕРА ГИРОДИНОВ И ЗАЩИТА ТЕЛЕСКОПА ОТ ЕГО ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Введение

Практика создания космических аппаратов (КА) землеобзора показывает, что бортовой телескоп должен проектироваться из условия, что значения низших частот колебаний элементов его конструкции, включая бленду и крышку объектива, составляют не менее 10 Гц, а основные электромеханические исполнительные органы системы управления движением (СУД) – гиродины (ГД) в составе силового гироскопического кластера (СГК) – имеют низшие частоты колебаний конструкции не менее 100 Гц. Для динамического синтеза цифровых законов управления ориентацией КА с частотой 4 Гц либо 8 Гц необходимы редуцированные модели ГД и СГК. Влияние вибрационных «паразитных» возмущений СГК, обусловленных упругостью крепления и дисбалансом роторов ГД, на движение изображения в фокальной плоскости телескопа целесообразно исследовать автономно, считая корпус КА неподвижным. Эти проблемы детально изучались авторами и опубликованы, например в [1]. Здесь кратко представляются только основные положения [1] – [3] и новые результаты.

1. Динамические модели и постановка задачи

Применяемая модель КА землеобзора учитывает упругие колебания панелей солнечных батарей (СБ) P_1, P_2 и антенн A_1, A_2 (рис. 1), упруго-вязкое крепление конструкции телескопа к корпусу КА с помощью вибрационно-поглощающей фермы P , где учитываются упругость крепления главного M_1 и вторичного M_2 зеркал телескопа, упругость объектива телескопа T с блендой B . Модель каждого гиродина описывает нелинейную динамику его гироротора (ГР) в упругих подшипниках с 5 степенями свободы (рис. 2), упругость подшипников гирокожуха (ГР), упругость и люфт редуктора (рис. 3), динамику вращения ГР с учетом его дисбалансов (рис. 4), динамику редукторного привода с самоторможением и демпфера по оси ГК, а также упругость крепления ГД на корпусе КА. В СГК по схеме $3-SPE$ (рис. 5) применяется шесть ГД с неограниченными углами поворота β_p^g , $p = 1 \div 6$ относительно осей их гирокожухов.

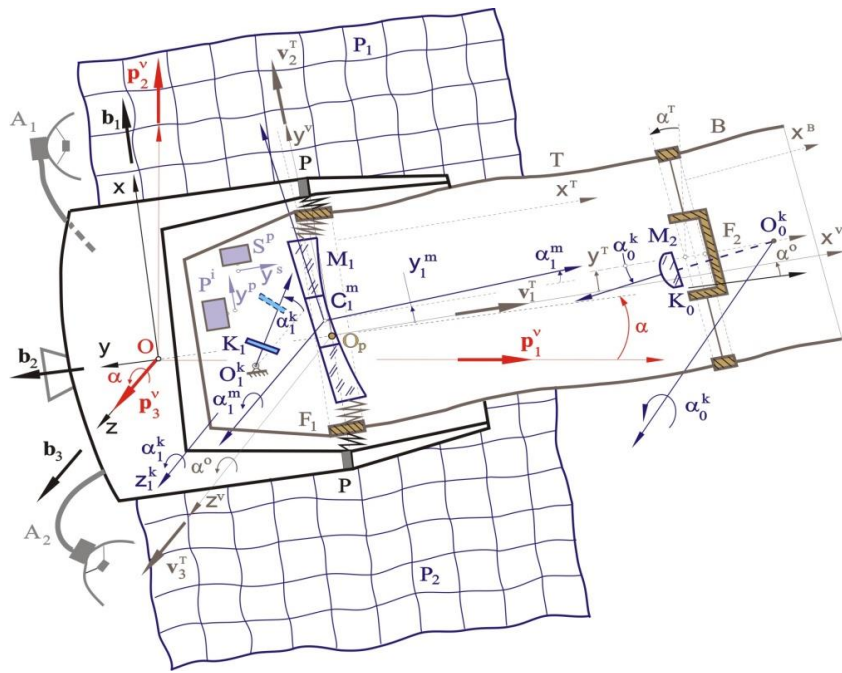


Рис. 1. Схема КА землеобзора с крупногабаритным телескопом

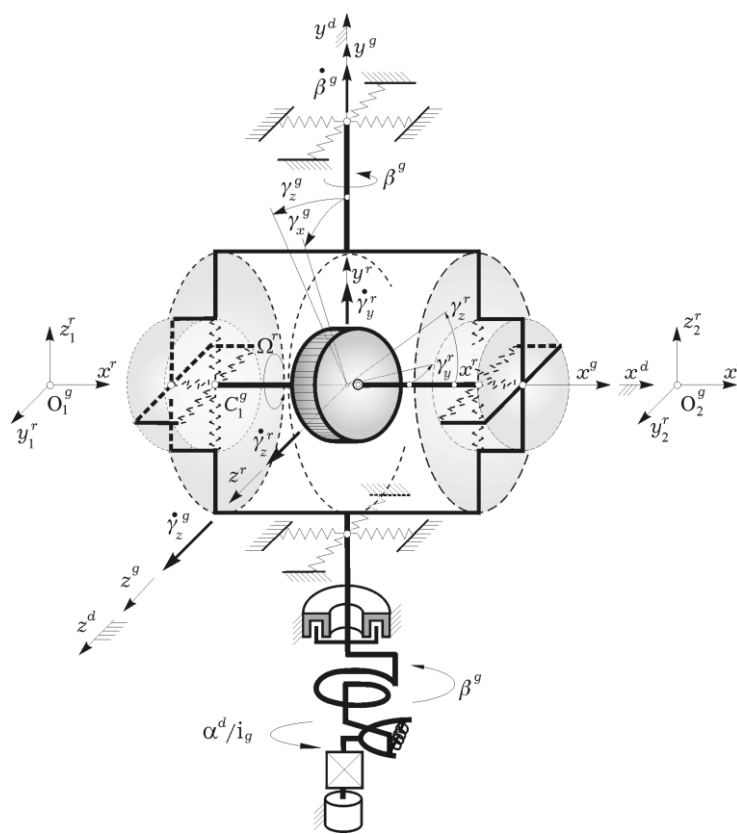


Рис. 2. Динамическая схема гиродин

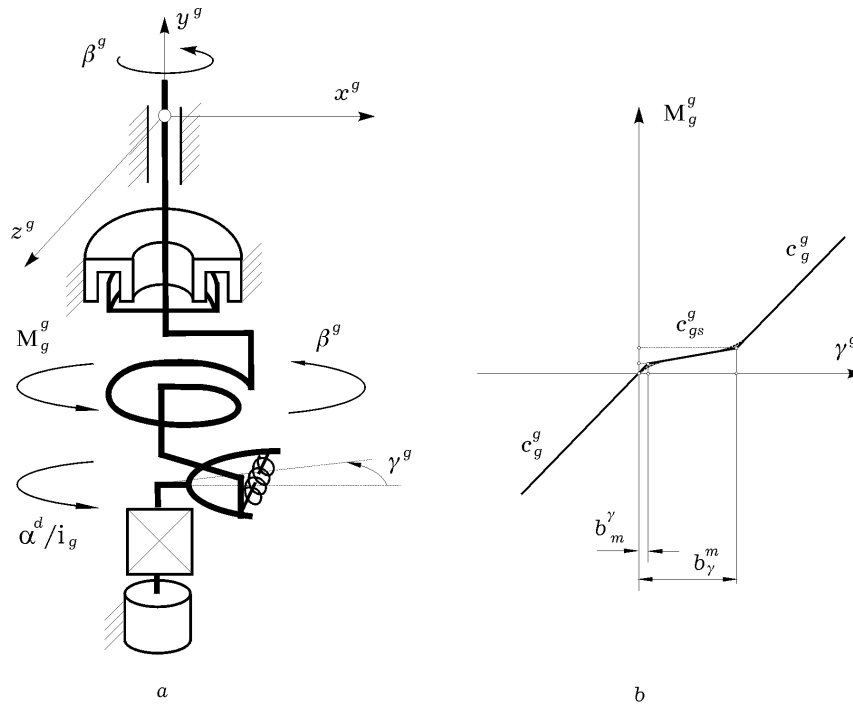


Рис. 3. Моделирование люфта: а) - выборка люфта; б) - моментная характеристика

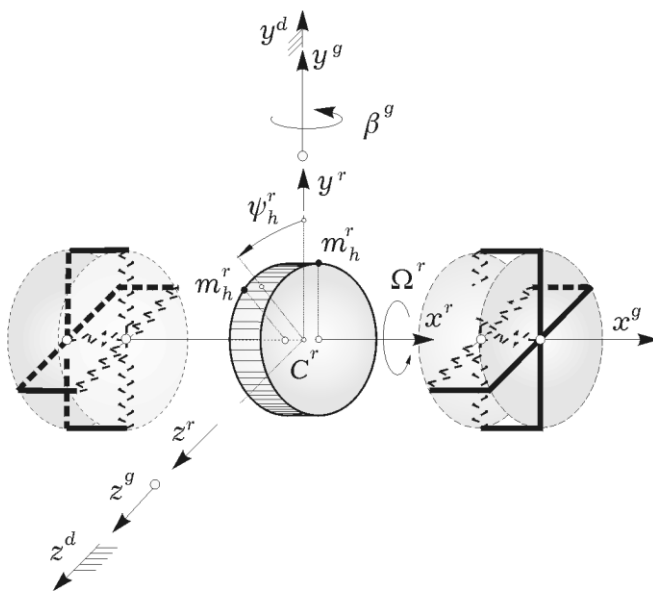


Рис. 4. Модель дисбаланса ротора ГД

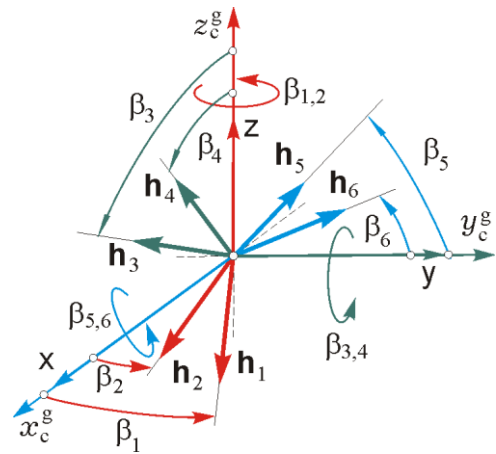


Рис. 5. Коллинеарная схема 3-SPE СГК

Рассматриваются задачи редукции моделей ГД и СГК, а также защиты бортового телескопа от вибрационных возмущений СГК.

2. Редукция модели гиродина и силового гироскопического кластера

Введем обозначения: C^r и $A^r \equiv A_y^r = A_z^r$ – осевой и экваториальные моменты инерции ГР, C^s , A_y^s и A_z^s – моменты инерции ГК, $C^g = C^s + C^r$ и $A_y^g = A^r + A_y^s$, $A_z^g = A^r + A_z^s$ – осевой и экваториальные моменты инерции ГД, Ω^r и $H \equiv h_g = C^r \Omega^r$ – собственный кинетический момент (КМ) гироротора (рис. 2); c^r и c^s – коэффициенты угловой жесткости в подшипниках ротора и кожуха ГД при их упругих деформациях, $c^g = c^r c^s / (c^r + c^s)$ – приведенная жесткость подшипников ГД обоих типов. При использовании фактора упругости $\mu^e = (1 + H^2 / (A^g c^g))^{1/2}$ подшипников ГР и ГК, а также эффективного момента инерции $A^{g*} \equiv A_y^{g*} = A_y^g (\mu^e)^2$ ГД относительно оси ГК, модель динамики ГД по этой оси принимается в приближенном виде $A^{g*} \ddot{\beta}^g = Q_g^g$, где Q_g^g представляет обобщенный момент по выходной оси редукторного привода.

Если считать, что отсутствуют люфт и моменты сил сухого трения по осям двигателя и редуктора в приводе, индуктивность управляющей обмотки двигателя пренебрежимо мала, то при учете влияния упругости редуктора уравнения динамики ГК и двигателя принимают вид $A^{g*} \ddot{\beta}^g = Q_g^g \equiv c_g^g \gamma^g - M_g^s$; $J_d \ddot{\alpha}^d + c_g^g \gamma^g / i_g = k_d^g u_d^g - M_d^s$. Здесь c_g^g – коэффициент крутильной жесткости выходного вала редуктора с коэффициентом редукции i_g , угол деформации этого вала $\gamma^g = (\alpha^d / i_g) - \beta^g$ (рис. 3), α^d – угол поворота двигателя с моментом инерции J_d и коэффициентом усиления k_d^g входного напряжения u_d^g , а M_g^s и M_d^s представляют крутящие моменты сопротивления движению валов редуктора и двигателя.

В [1] установлено, что резонансная частота крутильных колебаний вала редуктора $\tilde{\omega}_g^g \approx (c_g^g \tilde{A}^{g*} / (A^{g*} i_g^2 J_d))^{1/2}$, где эффективный момент инерции $\tilde{A}^{g*} = A^{g*} + i_g^2 J_d$. При проектировании ГД крутильная жесткость выходного вала редуктора выбирается так, чтобы его упругие свойства не проявлялись вплоть до частоты 50 Гц. Поэтому линеаризованная модель движения ГД с редукторным приводом приближенно представляется в виде $\tilde{A}^{g*} \ddot{\beta}^g = i_g k_d^g u_d^g - \tilde{M}_g^s$, где \tilde{M}_g^s – приведенный момент сопротивления движению вала редуктора. Здесь рассмотрена модель редукторного привода ГД, который жестко закреплен на неподвижном корпусе КА. При наличии

угловой скорости перемещения конструкции ГД из-за движения КА либо, что наиболее опасно, за счет упругости крепления ГД на корпусе КА, сразу же возникает сильная гироскопическая связь такой угловой скорости с упругими деформациями кручения вала редуктора.

В локальном контуре управления каждым ГД по оси ГК при формировании напряжения u_d^g используется информация о фактическом значении угла β^g поворота ГК. Такая сильная отрицательная обратная связь позволяет обеспечить известное соотношение $\dot{\beta}^g \approx u^g$ между значениями фактической $\dot{\beta}^g$ и командной u^g угловой скорости каждого ГД, которое применяется в прецессионной теории силовых гироскопов.

Для схемы 3-SPE (рис. 5 с конкретным отсчетом углов β_p) введем обозначения проекций ортов КМ каждого ГД на оси системы координат $Ox_c^g y_c^g z_c^g$ СГК

$$\begin{aligned} x_1 &= C_1 \equiv \cos \beta_1; & x_2 &= C_2 \equiv \cos \beta_2; & y_1 &= S_1 \equiv \sin \beta_1; \\ y_2 &= S_2 \equiv \sin \beta_2; & x_3 &= S_3 \equiv \sin \beta_3; & x_4 &= S_4 \equiv \sin \beta_4; \\ z_3 &= C_3 \equiv \cos \beta_3; & z_4 &= C_4 \equiv \cos \beta_4; & y_5 &= C_5 \equiv \cos \beta_5; \\ y_6 &= C_6 \equiv \cos \beta_6; & z_5 &= S_5 \equiv \sin \beta_5; & z_6 &= S_6 \equiv \sin \beta_6. \end{aligned}$$

Тогда вектор суммарного нормированного КМ такого СГК $\mathbf{h}(\boldsymbol{\beta}) = \Sigma \mathbf{h}_p(\boldsymbol{\beta}_p) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\beta})/\mathbf{h}_g$, где столбец $\boldsymbol{\beta} = \{\beta_p\}$ и матрица Якоби $\mathbf{A}_h(\boldsymbol{\beta}) = \partial \mathbf{h} / \partial \boldsymbol{\beta}$ представляются в виде [2,3]

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 + S_3 + S_4 \\ S_1 + S_2 + C_5 + C_6 \\ C_3 + C_4 + S_5 + S_6 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_h(\boldsymbol{\beta}) = \begin{bmatrix} -S_1 & -S_2 & C_3 & C_4 & 0 & 0 \\ C_1 & C_2 & 0 & 0 & -S_5 & -S_6 \\ 0 & 0 & -S_3 & -S_4 & C_5 & S_6 \end{bmatrix}.$$

При цифровом управлении СГК $\mathbf{u}_k^g(t) = \{u_{pk}^g(t)\}$ с периодом T_u , где $u_{pk}^g(t) = u_{pk}^g$ $\forall t \in [t_k, t_{k+1})$, $t_{k+1} = t_k + T_u$ и $k \in \mathbb{N}_0 \equiv [0, 1, 2, \dots)$, когда управлением считается вектор $\dot{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{u}^g$ скоростей ГД относительно осей их подвеса, вектор управляющего момента СГК формируется по редуцированной модели $\mathbf{M}_k^g(t) = -h_g \mathbf{A}_h(\boldsymbol{\beta}(t)) \mathbf{u}_k^g(t)$; $\dot{\boldsymbol{\beta}}(t) = \mathbf{u}_k^g(t)$.

Получим оценку влияния упругости крепления на корпусе КА каждого ГД в рамках линейной модели, принимая значение угла $\beta^g = \beta^{g*} = 0$ и предполагая абсолютную жесткость подшипников ротора и гирокожуха ГД. Пусть заданы коэффициенты жесткости c_y^{bg} и c_z^{bg} крепления ГД относительно осей Oy^d и Oz^d его приборного базиса $Ox^d y^d z^d$ (рис. 2), а также коэффициенты демпфирования μ_y^{bg} и μ_z^{bg} . Наиболее важной является

оценка влияния упругости крепления ГД на передачу его управляющего гироскопического момента на корпус КА. Модель такого влияния в приборном базисе ГД представляется нормированной передаточной функцией [1]

$$W_H(s) = \frac{(c_z^{bg} + \mu_z^{bg}s)(A_y^g s^2 + \mu_y^{bg}s + c_y^{bg})}{(A_y^g s^2 + \mu_y^{bg}s + c_y^{bg})(A_z^g s^2 + \mu_z^{bg}s + c_z^{bg}) + H^2 s^2}. \quad (1)$$

Для получения аналитических соотношений введем собственные частоты $\tilde{\omega}_s^{bg}, s = y, z$ и нормированные коэффициенты демпфирования $\tilde{\xi}_s^{bg}, s = y, z$ гироскопически несвязанных (при $H=0$) между собой упругих колебаний ГД относительно его приборного базиса на корпусе КА, а также частоту *нутаии* $\tilde{\omega}_H^{bg}$ свободного ГД по формулам

$$\tilde{\omega}_s^{bg} = \sqrt{c_s^{bg} / A_s^g}; \quad \tilde{\xi}_s^{bg} = \tilde{\omega}_s^{bg} (\mu_s^{bg} / c_s^{bg}) / 2, \quad s = y, z; \quad \tilde{\omega}_H^{bg} = H / \sqrt{A_y^g A_z^g}.$$

Тогда передаточная функция (1) представляется в виде

$$W_H(s) = \frac{k_H(s)}{d_H(s)} = \frac{\tilde{\omega}_z^{bg} (2\tilde{\xi}_z^{bg}s + \tilde{\omega}_z^{bg})(s^2 + 2\tilde{\xi}_y^{bg}s + (\tilde{\omega}_y^{bg})^2)}{(s^2 + 2\tilde{\xi}_y^{bg}s + (\tilde{\omega}_y^{bg})^2)(s^2 + 2\tilde{\xi}_z^{bg}s + (\tilde{\omega}_z^{bg})^2) + (\tilde{\omega}_H^{bg})^2 s^2}. \quad (2)$$

представляя её знаменатель $d_H(s)$ в виде $d_H(s) = (s^2 + 2\tilde{\xi}_+^{bg}s + (\tilde{\omega}_+^{bg})^2)(s^2 + 2\tilde{\xi}_-^{bg}s + (\tilde{\omega}_-^{bg})^2)$ и далее, приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях переменной Лапласа s в обоих представлениях полинома $d_H(s)$ в предположении малости нормированных коэффициентов демпфирования $\tilde{\xi}_y^{bg}$ и $\tilde{\xi}_z^{bg}$, получаем явные соотношения для вычисления

всех её четырёх полюсов: $s_{\pm 1,2}^{bg} = \tilde{\omega}_{\pm}^{bg} (-\tilde{\xi}_{\pm}^{bg} \pm j)$, где $\tilde{\omega}_{\pm}^{bg} = \tilde{\omega}_*^{bg} \pm \tilde{\omega}_{\delta}^{bg} / 2$ и $\tilde{\xi}_{\pm}^{bg} = \tilde{\xi}_*^{bg} \pm \tilde{\xi}_{\delta}^{bg} / 2$,

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_*^{bg} &= \sqrt{\tilde{\omega}_y^{bg} \tilde{\omega}_z^{bg} + (\tilde{\omega}_{\delta}^{bg} / 2)^2}; & \tilde{\omega}_{\delta}^{bg} &= \sqrt{(\tilde{\omega}_H^{bg})^2 + (\tilde{\omega}_y^{bg} - \tilde{\omega}_z^{bg})^2}; \\ \tilde{\xi}_*^{bg} &= (\tilde{\xi}_y^{bg} + \tilde{\xi}_z^{bg})(\tilde{\omega}_y^{bg} + \tilde{\omega}_z^{bg}) / (4\tilde{\omega}_{\delta}^{bg}); & \tilde{\xi}_{\delta}^{bg} &= (\tilde{\xi}_y^{bg} - \tilde{\xi}_z^{bg})(\tilde{\omega}_y^{bg} - \tilde{\omega}_z^{bg}) / \tilde{\omega}_{\delta}^{bg}. \end{aligned}$$

Частотная характеристика $W_H(j\omega)$ имеет две резонансные частоты $\tilde{\omega}_-^{bg} < \tilde{\omega}_z^{bg}$, $\tilde{\omega}_+^{bg} > \tilde{\omega}_z^{bg}$ и одну антирезонансную частоту $\tilde{\omega}_y^{bg}$, причем между этими характерными частотами всегда выполняется соотношение $\tilde{\omega}_-^{bg} < \tilde{\omega}_y^{bg} < \tilde{\omega}_+^{bg}$. При $H=0$ передаточная функция (2) принимает вид $W_0(s) = \tilde{\omega}_z^{bg} (2\tilde{\xi}_z^{bg}s + \tilde{\omega}_z^{bg}) / (s^2 + 2\tilde{\xi}_z^{bg}s + (\tilde{\omega}_z^{bg})^2)$ и представляет стандартное ослабление передачи управляющего гироскопического момента на корпус КА за счет упругого крепления ГД, а соответствующая ей частотная характеристика имеет лишь одну резонансную частоту $\tilde{\omega}_z^{bg}$. Свойство *гироскопического связывания* упругих колебаний в креплении ГД на корпусе КА принципиально заключается в том, что несмотря на практически реализуемые условия крепления ГД в виде $\tilde{\omega}_y^{bg} > \tilde{\omega}_z^{bg}$ и $\tilde{\xi}_y^{bg} > \tilde{\xi}_z^{bg}$,

соотношения между частотами $\tilde{\omega}_-^{bg}$ и $\tilde{\omega}_z^{bg}$, а также между соответствующими им пиками модулей $|W_H(j\tilde{\omega}_-^{bg})|$ и $|W_O(j\tilde{\omega}_z^{bg})|$ частотных характеристик проявляются в виде $\tilde{\omega}_-^{bg} \ll \tilde{\omega}_z^{bg} < \tilde{\omega}_y^{bg}$ и $|W_H(j\tilde{\omega}_-^{bg})| > |W_O(j\tilde{\omega}_z^{bg})|$, что объясняется неравенством $\tilde{\xi}_-^{bg} \ll \tilde{\xi}_y^{bg}$ для нормированных коэффициентов демпфирования. Свойства большой (в 2-3 раза) миграции низшей резонансной частоты и ослабления демпфирования гироскопически связанных упругих колебаний в креплении ГД на этой частоте обязательно необходимо учитывать при проектировании гиросиловых СУД информационных КА и понимать, что при наличии упругости конструкции ГД и редуктора эта низшая резонансная частота будет принимать еще меньшее значение. Выбор жесткости крепления ГД на корпусе КА проводится на основе компромисса между точностью передачи управляющего гироскопического момента на корпус КА и ослаблением паразитных возмущений ГД, главными источниками которых являются люфт в редукторе привода ГК и дисбалансы ГР. Здесь наиболее важной является проблема назначения жесткости крепления ГД при известных параметрах упругости подшипников ГР и ГК.

3. Защита телескопа от вибрационных возмущений кластера гиродинов

Силовые и моментные вибрационные возмущения, обусловленные статическим и динамическим дисбалансами быстро вращающегося ротора ГД, учитываются приближенным приемом, принятым в гироскопической технике. Принимается, что маховик каждого ротора имеет радиус r_h^r и ширину l_h^r своего обода. Положение двух точечных масс m^r , расположенных на противоположных (по ширине обода) краевых окружностях маховика в произвольных местах с взаимным углом ψ_h^r (рис. 4) отличается для различных ГД. Это учитывается начальными значениями $\varphi_{p0}^r = \varphi_p^r(t_0)$ углов поворота $\varphi_p^r(t)$ ротора каждого p -го ГД. При обозначениях $\dot{\varphi}_p^r(t) = \Omega_p^r$ и $F_{bp}^r \equiv m_{hp}^r r_h^r (\Omega_p^r)^2$ векторы силы \mathbf{F}_{bp}^r и момента \mathbf{M}_{bp}^r от дисбаланса ротора p -го ГД вычисляются по соотношениям:

$$\mathbf{F}_{bp}^r = \{0, F_{bpy}^r, F_{bpz}^r\}, F_{bpy}^r = F_{bp}^r \cos \varphi_p^r(t), F_{bpz}^r = F_{bp}^r \sin \varphi_p^r(t); \quad \mathbf{M}_{bp}^r = \{0, M_{bpy}^r, M_{bpz}^r\},$$

$$M_{bpy}^r = M_{bp}^r \cos \varphi_p^r(t), \quad M_{bpz}^r = M_{bp}^r \sin \varphi_p^r(t) \text{ с амплитудными значениями компонентов}$$

$$F_{bp}^r = F_{bp}^r (1 + \cos \psi_{hp}^r), F_{bp}^r = F_{bp}^r \sin \psi_{hp}^r; M_{bp}^r = (l_h^r / 2) F_{bp}^r \sin \psi_{hp}^r, M_{bp}^r = (l_h^r / 2) F_{bp}^r (1 - \cos \psi_{hp}^r).$$

Указанные векторы силы \mathbf{F}_{bp}^r и момента \mathbf{M}_{bp}^r вибрационного возмущения, прилагаемые к подшипникам ротора p -го ГД, перепроектируются в базис \mathbf{B} , связанный с корпусом КА. При этом влияние векторов \mathbf{M}_{bp}^r учитывается непосредственно в уравнениях динамики углового движения ГР и ГК с упругими подшипниками, влияние векторов \mathbf{F}_{bp}^r силы вибрационного возмущения p -го ГД, передаваемых через подшипники ГР и ГК на корпус КА, основывается на расчете векторов $\tilde{\mathbf{F}}_{bp}^r$ сил реакции связей гиродинов с корпусом КА и векторов $\tilde{\mathbf{M}}_{bp}^r = \boldsymbol{\rho}_{op}^g \times \tilde{\mathbf{F}}_{bp}^r$ их моментов, где $\boldsymbol{\rho}_{op}^g$ – постоянный вектор расположения начала приборного базиса p -го ГД в связанном базисе \mathbf{B} .

Нетрудно убедиться, что при угловых перемещениях ГД в составе СГК векторы суммарных вибрационных сил и моментов СГК изменяются в базисе \mathbf{B} по модулю и направлению даже при постоянных скоростях вращения роторов гиродинов.

Применяется двухкаскадная защита телескопа от вибрационных возмущений СГК. При реализации первого каскада все гиродины СГК закрепляются на вибрационно-поглощающей ферме в виде трехслойной оболочки, подкрепленной жесткой силовой конструкцией. Эта ферма крепится на корпусе КА только в трех узлах, в окрестности которых устанавливаются наборы динамических поглотителей силовых и моментных вибрационных возмущений СГК в заданных частотных диапазонах [4].

Второй каскад осуществляется закреплением телескопа, с его усиленной высокочастотной виброизоляцией, на корпусе КА в окрестности силового шпангоута главного зеркала телескопа, (рис. 1).

На рис. 6 представлены результаты вибрационного анализа движения изображения $\delta_z^p(t)$ на фотоприёмнике телескопа (рис. 1) в зависимости от частоты вращения несбалансированных роторов шести ГД на шариковых подшипниках без вибрационно-поглощающей фермы для крепления СГК к корпусу КА. Амплитуда вибрации изображения δ_z^p на номинальной частоте 125 Гц вращения ГР составляет $\approx 0,005$ угл. сек.

На рис. 7 приведены погрешности угловой скорости телескопа при стабилизации заданного углового движения КА землеобзора с помощью СГК.

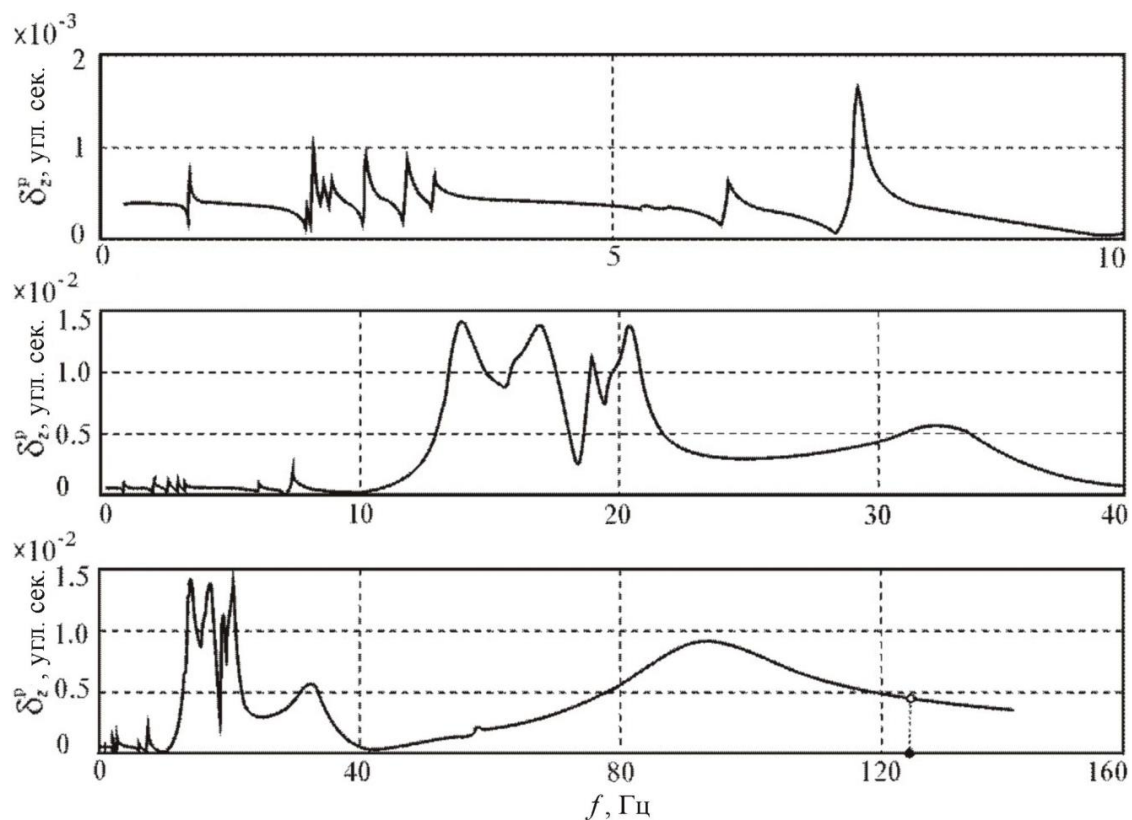


Рис. 6. Зависимость амплитуды колебаний изображения δ_z^p (угл сек) в фокальной плоскости телескопа от частоты вращения f (Гц) несбалансированных роторов ГД

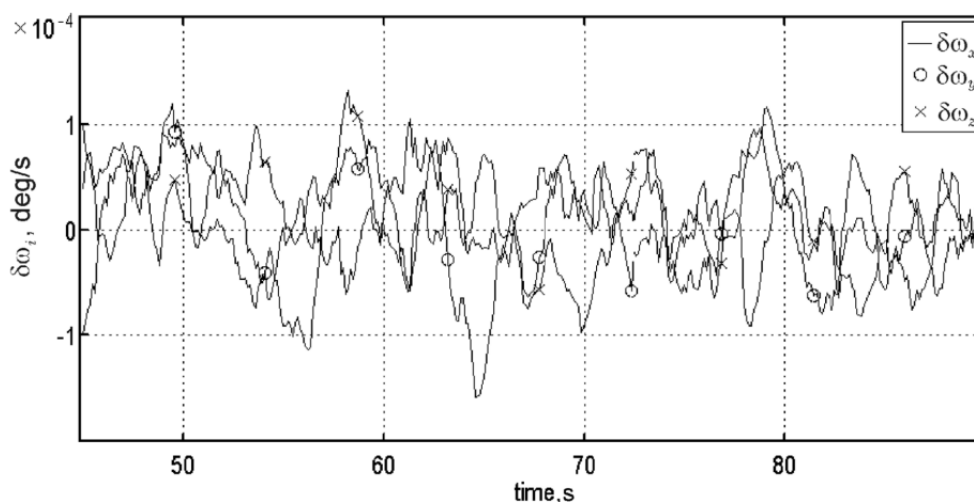


Рис. 7. Ошибки угловой скорости телескопа при стабилизации КА с помощью СГК

Закключение

Кратко представлены методы редукции модели силового гироскопического кластера, который применяется для управления ориентацией космического аппарата землеобзора. Описан метод двухкаскадной защиты телескопа от вибрационных

возмущений такого кластера на основе шести гиродинов и приведены полученные результаты.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 17-48-630637.

Библиографический список

1. Сомов Е.И. Многоуровневое моделирование и локальный анализ динамических свойств систем гиродинов с цифровым управлением [Текст] / Е.И. Сомов // Труды VIII Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления». М.: ИПУ РАН. 2009. С. 1202, 1580-1627.

2. Сомов Е.И. Декомпозиция и редукция моделей систем гиросиловой стабилизации упругих космических аппаратов [Текст] / Е.И. Сомов // Труды IV международной конференции по проблемам управления. М.: ИПУ РАН. 2009. С. 1904-1911.

3. Сомов Е.И. Полётная идентификация и силовая гироскопическая стабилизация слабо демпированной конструкции крупногабаритного спутника [Текст] / Е.И. Сомов, С.А. Бутырин // Проблемы управления. 2013. № 2. С. 51-57.

4. Вибрации в технике: Справочник. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. 456 с.