
**КӨЛІК, КӨЛІКТІК ИНЖЕНЕРИЯ
TRANSPORT, TRANSPORT ENGINEERING
ТРАНСПОРТ, ТРАНСПОРТНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ**

УДК 531.383

DOI 10.52167/1609-1817-2024-132-3-19-34

С.Ж. Карипбаев, М.А. Бимагамбетов, А.К. Молдабеков,
Ж.С. Жумадилов, Ж.А. Азелханова

Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан
E-mail: s.karipbaev@agakaz.kz

**ДИНАМИКА ГИРОСКОПА В ШАРОВОМ ПОДШИПНИКОВОМ
ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ПОДВЕСЕ РОТОРА**

Аннотация. Основной причиной возникновения погрешности шарового гироскопа является наличие «полярного» возмущающего момента синхронного гистерезисного двигателя и несферичность ротора, на компенсацию которого уходит значительная часть мощности привода. Влияние люфта между шариками и элементами шарового подвеса на уход гироскопа рассмотрено в работе. Смещение центра масс ротора относительно статора происходит за счет гармонических сил, порождаемых магнитным полем статора гидродвигателя. Чтобы обеспечить заданную точность вращения ротора, для уменьшения упругих смещений, следовательно, и момента сил трения, для ликвидации зазоров между шариками и кольцами, для увеличения жесткостей, как по радиальному, так и по осевому направлениям, в подвижных узлах подшипники при сборке часто устанавливаются с предварительным натягом. При этом величина натяга не сохраняется в процессе хранения и эксплуатации по мере изнашивания тел и дорожек качения. Для этого применяют компенсирующие устройства, поддерживающие постоянным предварительный натяг в процессе эксплуатации, и предусматривают возможность периодического регулирования его в процессе работы механизма.

Рассмотрены уравнения движения ротора гироскопа в случаях, когда каждый шарик имеет предварительный большой натяг и когда натяг шариков не произведен. Рассмотрены прецессионные уравнения движения кинетического момента ротора при центрировании сепараторов по ротору гироскопа и при центрировании сепараторов по статору гироскопа. Получена формула определяющая угловую скорость ухода гироскопа. Проведен количественный анализ ухода шарового гироскопа при наличии возмущающих моментов гистерезисного гироскопического электродвигателя.

Ключевые слова. Шаровой гироскоп, шарикоподшипник, кинетический момент ротора, моменты сил трения, угловая скорость ухода гироскопа, большой предварительный натяг каждого шарика.

Введение.

При большом зазоре между телами качения и кольцами подшипник работает со звуком, напоминающим стук, т.е. приводят к ударам [1]. Осевое и радиальное биение опор ротора вызывает динамические реакции даже в том случае, когда ротор будет статически и динамически уравновешен. При уменьшении радиального зазора наблюдается более быстрый рост шума, чем при увеличении. Это объясняется увеличением нагруженной зоны, контактом большого числа тел качения с дорожками качения, увеличением микропроскальзывания в местах контакта, сопровождающимся шумом высокой частоты, напоминающий свист [3].

В работе [2] рассмотрено влияние люфта между шариками и элементами шарового подвеса на уход гироскопа.

Для ликвидации зазоров между шариками и кольцами, увеличения жесткостей в подвижных узлах подшипники при сборке часто устанавливаются с предварительным натягом [3,4,5,6]. По мере изнашивания тел и дорожек качения величина натяга не сохраняется в процессе хранения и эксплуатации. Для поддержания постоянства предварительного натяга в процессе эксплуатации применяются компенсирующие устройства [7], которые позволяют периодически регулировать его в процессе работы прибора.

Предварительный натяг снижает угловую скорость ухода, гироскопа на шаровом шарикоподшипниковом подвесе, но чрезмерный натяг ухудшает их характеристики, поэтому этот процесс является одной из наиболее трудоемких и сложных операций сборки [3,8]. Необходимое поджатие шариков к опорным поверхностям можно обеспечивать регулировочной прокладкой, регулирующей гайкой или крышкой, доведенной до соприкосновения с кольцами подшипника, а затем повернутой на заранее установленный угол, подсчитанный исходя из шага резьбы и осевого смещения кольца [6].

В гироскопе на шаровом шарикоподшипниковом подвесе. Сущность предварительного натяга заключается в том, что шарикоподшипник получает предварительные нагрузки в направлении общей нормали, проведенной в местах соприкосновения колец и шариков, и ликвидируют зазоры в комплекте, создавая начальную упругую деформацию в местах контакта.

Значение угловой скорости ухода при малом предварительном натяге является существенной и составляет до 35.5 град./час [8]. Под действием большого предварительного натяга уход снижается почти на порядок.

Предварительная нагрузка на подшипники, в гистерезисном гироскопе на шаровом шарикоподшипниковом подвесе в отличие от двигателей общего применения, принципиально необходима, чтобы обеспечить стабильное положение центра его масс [7].

Гироскоп на шаровом шарикоподшипниковом подвесе мгновенно показывая изменения положения объекта при его поворотах в пространстве и на Земле, сохраняет относительно них свое направление. Если возмущения, реально действующие на гироскоп, сохранятся в течение длительного времени, то погрешности могут стать заметными. При чрезмерной величине этих моментов наступает потеря работоспособности прибора. Знание возмущающих моментов необходимо как для определения погрешности прибора, так и для выбора в процессе проектирования его параметров.

Материалы и методы.

Выражение момента сил, показанное в работе [9,16], для электростатического гироскопа, используем для шарового гироскопа.

$$\mathbf{M} = N \iint_{S_j} f_x^*(v_x, \varphi_x) [\mathbf{r}_x, \mathbf{n}_x^{(\varepsilon)}] dS = -kN \sum_{j=1}^2 \rho_{j0}^{3/2} \iint_{S_j} \left[1 + (\rho_{max}, \mathbf{n}_x^{(\varepsilon)}) / \rho_{j0} \right]^{3/2} [\mathbf{r}_x, \mathbf{n}_x^{(\varepsilon)}] / \sqrt{(1 - \mu_x^2)} d\mu_x d\varphi_x, \quad (1)$$

где \mathbf{r}_x – радиус-вектор, проведенный из центра масс ротора в точку, лежащую на поверхности ротора шарового гироскопа;

$f_x^*(v_x, \varphi_x)$ – плотность сил на поверхности ротора радиуса R_x .

Для определения выражения силовых функций для моментов сил первой и второй гармоники шарового подвеса используем формулы, приведенные в работе [9,16].

При нахождении величины равнодействующей поддерживающих сил, задаются законы распределения сближений тел качения с дорожками качения, основанные на теории Герца.

В нагруженном шарикоподшипнике гироскопический момент недостаточен для того, чтобы повернуть шарики, так как угловая скорость собственного вращения ротора намного больше, чем угловая скорость прецессии.

$$W_1 = R_\xi \varepsilon (\beta_1 F_{1\xi} + \beta_2 F_{2\xi} + \beta_3 F_{3\xi}), \quad (2)$$

где $F_{1\xi}, F_{2\xi}, F_{3\xi}$ - проекции на оси трехгранника $O\xi_1\xi_2\xi_3$ главного вектора поддерживающих сил, приложенных к ротору;

$\beta_1 = \beta_{31}, \beta_2 = \beta_{32}, \beta_3 = \beta_{33}$ - направляющие косинусы единичного вектора кинетического момента ротора относительно неподвижного трехгранника.

Силовая функция для моментов сил по второй гармонике, действующих по нормали к поверхности ротора, имеет вид:

$$W_2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij} \beta_i \beta_j. \quad (3)$$

Здесь

$$a_{ij} = 1.5 R_x k N \varepsilon_2 \sum_{j=1}^2 \rho_{j0}^{\frac{3}{2}} \times \\ \times \iint_{S_j} \left[1 + \left(\rho_{max}, n_x^{(e)} \right) / \rho_{j0} \right]^{3/2} / \sqrt{(1 - \mu_x^2) n_i^{(e)} n_j^{(e)}} d\mu_\xi d\varphi_\xi. \quad (4)$$

Тогда

$$W = W_1 + W_2 = R_x \varepsilon (\beta_1 F_{1\xi} + \beta_2 F_{2\xi} + \beta_3 F_{3\xi}) + a_{11} \beta_1^2 + 2a_{12} \beta_1 \beta_2 + 2a_{13} \beta_1 \beta_3 + \\ 2a_{23} \beta_2 \beta_3 + a_{22} \beta_2^2 + a_{33} \beta_3^2. \quad (5)$$

В случае осесимметричной поверхности ротора, проекция момента на оси $O\xi_i$ принимает вид:

$$M_{1\xi} = \beta_2 \frac{\partial W}{\partial \beta_3} - \beta_3 \frac{\partial W}{\partial \beta_2} \\ = \beta_2 \{ R_x \varepsilon F_{3\xi} + 2a_{13} \beta_1 + 2a_{23} \beta_2 + 2a_{33} \beta_3 \} \\ - \beta_3 \{ R_x \varepsilon F_{2\xi} + 2a_{12} \beta_1 + 2a_{23} \beta_3 + 2a_{22} \beta_2 \}, \\ M_{2\xi} = \beta_3 \frac{\partial W}{\partial \beta_1} - \beta_1 \frac{\partial W}{\partial \beta_3} \\ = \beta_3 \{ R_x \varepsilon F_{1\xi} + 2a_{11} \beta_1 + 2a_{12} \beta_2 + 2a_{13} \beta_3 \} \\ - \beta_1 \{ R_x \varepsilon F_{3\xi} + 2a_{13} \beta_1 + 2a_{23} \beta_2 + 2a_{33} \beta_3 \}, \\ M_{3\xi} = \beta_1 \frac{\partial W}{\partial \beta_2} - \beta_2 \frac{\partial W}{\partial \beta_1} = \beta_1 \{ R_x \varepsilon F_{2\xi} + 2a_{12} \beta_1 + 2a_{23} \beta_3 + 2a_{22} \beta_2 \} - \\ - \beta_2 \{ R_x \varepsilon F_{1\xi} + 2a_{11} \beta_1 + 2a_{12} \beta_2 + 2a_{13} \beta_3 \}. \quad (6)$$

Выберем ориентацию осей трехгранника ξ так, чтобы в рабочем режиме положение оси $x_3 = r_x(v_x, \varphi_x) \cos v_x$ совпадало с осью $\xi_3 = r_\xi(v_\xi, \varphi_\xi) \cos v_\xi$, тогда

$$\beta_1 = \beta_2 = 0, \beta_3 = 1. \quad (7)$$

Тогда проекции на оси ξ_i главного момента поддерживающих сил будут иметь вид:

$$\begin{aligned} M_{1\xi} &= -\beta_3 \frac{\partial W}{\partial \beta_2} = -\{R_x \varepsilon F_{2\xi} + 2a_{23}\}, \\ M_{2\xi} &= \frac{\partial W}{\partial \beta_1} = \{R_x \varepsilon F_{1\xi} + 2a_{13}\}, \quad M_{3\xi} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

В линейном приближении по смещению центра масс тела выражения для проекции моментов на оси трехгранника ξ имеют вид:

$$\begin{aligned} M_{1\xi} &= -\rho_{2\xi} (R_x \varepsilon D + 2E_5), \\ M_{2\xi} &= \rho_{1\xi} (R_x \varepsilon D + 2E_5), \\ M_{3\xi} &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

При $\rho_{1\xi} = \rho_{2\xi} = \rho_{3\xi} = 0$

$$M_{1\xi} = M_{2\xi} = M_{3\xi} = 0, \quad (10)$$

так как

$$a_{11} = a_{22} = E_1, a_{33} = E_7, a_{21} = a_{12} = a_{31} = a_{13} = a_{32} = a_{23} = 0.$$

Таким образом, рассмотрены и определены силовые функции моментов первой и второй гармоники. Получено выражение упругой силы, появляющейся в местах контакта шариков со сферическими элементами шарового гироскопа.

Будем считать, что подшипники прикреплены к ротору гироскопа [12,13,14]. С целью уменьшения уводящих моментов ось динамической симметрии ротора совмещается с кинетическим моментом ротора. Действующие на ротор моменты определяются лишь углом γ между внешней нагрузкой (перегрузкой) G и осью прибора z_3^* .

При сделанных предположениях в неподвижной системе координат, связанной со статором, прецессионное движение кинетического момента H записывается уравнением:

$$H \dot{e}_3 = M. \quad (11)$$

Здесь e_3 - единичный вектор кинетического момента ротора; M - момент сил, приложенных к ротору гироскопа в шаровом подвесе, и зависит от его приложения относительно подвеса, а состоит он из векторной суммы консервативных M_k и неконсервативных $M_{нк}$ моментов [9,12,13,14,15]:

$$M = M_k + M_{нк}. \quad (12)$$

В свою очередь

$$M_k = M_k(\gamma) e_2, \quad M_{нк} = M_{нк}(\gamma) [e_3, e_2], \quad (13)$$

где $e_2 = [e_3, g^*] / \sin(\gamma)$ - единичный вектор оси x_2 , g^* - единичный вектор вектора перегрузки G .

Зависимость моментов M_k и $M_{нк}$ от угла γ объясняется тем, что эти моменты зависят от величины нормальных сил, возникающих в местах контакта шариков с кольцами, и определяемые по формуле:

$$F_x = kN \sum_{j=1}^2 \rho_{j0}^{3/2} \iint_{S_j} \left[1 + \left(\rho_{max}, n_x^{(\epsilon)} \right) / \rho_{j0} \right]^{3/2} / \sqrt{(1 - \mu_x^2)} n_x^{(\epsilon)} d\mu_x d\varphi_x, \quad (14)$$

Здесь интегрирование производится по телесному углу Δv_x , под которым комплекты шариков видны из геометрического центра ротора, и определяемого следующим образом $\Delta v_x = 2a_0/R_x$, а через φ_x и $\mu_x = \cos v_x$ обозначены произвольные сферические координаты с началом в центре ротора; v_x - угол между осью динамической симметрии ротора и радиус-вектором местной точки, а $(90^\circ - v_x)$ определяет угол контакта в шарикоподшипнике; N - число шариков в одном сепараторе; k - коэффициент пропорциональности Герца; $n_x^{(\epsilon)}$ - единичный вектор внешней нормали;

τ - угол между внешней нормалью и вектором максимального смещения от внешней нагрузки; радиус площадки контакта определяется следующим образом [8,11]:

$$a_0 = [3\pi F_x^0 R^* / (4E^*)]^{1/3}. \quad (15)$$

Здесь F_x^0 - модуль равнодействующей вектора силы, действующей по нормали к поверхности контакта на два комплекта шариков до деформации; R^* и E^* вычисляются по формулам

$$1/R^* = 1/r_{ш} - 1/R_x, \quad 1/E^* = 2(1 - \nu^2) / (\pi E), \quad (16)$$

где $\nu = 0.3$; $F_x^0 = 7.384$ (Н), соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона; $r_{ш}$ - радиус шарика, R_x - радиус ротора.

Скалярное произведение векторов ρ_{max} и $n_x^{(\epsilon)}$ в (13) определяется через угол γ между вертикалью и кинетическим моментом ротора шарового гироскопа.

$$\rho_{max} = O_\xi O_x / (r_c - R_x), \quad (17)$$

где r_c - радиус статора, O_x и O_ξ соответственно геометрический центр ротора и статора.

Вектор ρ_{max} по модулю равен максимальному смещению ротора от центра статора и совпадает с направлением внешней нагрузки G , так как каждый шарик в обоих комплектах шариков для снижения момента упругих разбалансировок находится под действием большого предварительного натяга.

Составляющая момента M в (12), направленная по орту e_3 , не вызывает уходов ротора гироскопа, а лишь приводит к его разгону или торможению [14].

Величина консервативного момента $M_k(\gamma)$ определяется нормальными силами, действующими в местах контакта шарика со сферическими кольцами, а величина неконсервативного момента $M_{нк}(\gamma)$ создается силами, в местах контакта шариков с кольцами и является суммой составляющих моментов, действующих на ротор со стороны шариков в контактах с наружным кольцом, т.е. это есть уводящий момент, перпендикулярный кинетическому моменту H .

Результаты.

В работах [9,12,13,15] моменты, действующие на гироскоп в электростатическом подвесе, представлены в виде суммы консервативных и неконсервативных моментов, которые определяются лишь углом между вертикалью и осью прибора. Неконсервативные моменты создаются тангенциальными силами, действующими на поверхности ротора,

причем локально эти силы направлены против скорости. Консервативный момент состоит из линейных и квадратичных частей. Линейные возмущения возникают из-за осевого дебаланса тела. Нелинейная часть обусловлена наличием второй гармоники в форме тела, т.е. несферичностью ротора.

В рассматриваемом гироскопе в сферическом шарикоподшипниковом подвесе неконсервативными моментами $M_{нк}(\gamma)$ являются моменты сил трения верчения и качения [9], появляющиеся в местах контакта шариков с кольцами, и направленные противоположно абсолютным угловым скоростям верчения и качения, соответственно. Эти угловые скорости определяются следующим образом:

$$\omega_c^x = R_x(\Omega_x, n_x^{(e)})/2r_{ш}, \quad (18)$$

а угловая скорость верчения шарика относительно наружного кольца имеет вид:

$$\omega_x^x = R_x(\Omega_x, n_x^{(e)})/2r_{ш} - (\Omega_x, n_x^{(e)}) = r_c(\Omega_x, n_x^{(e)})/2r_{ш}. \quad (19)$$

$$\text{и} \quad \Omega_c^k = -(R_x/2r_{ш}) \left[n_{\xi}^{(e)}, [n_{\xi}^{(e)}, \Omega_x] \right]. \quad (20)$$

Модуль этой скорости запишется в виде:

$$\left| [n_{\xi}^{(e)}, [n_{\xi}^{(e)}, \Omega_x]] \right| = \left(\Omega_{\xi}^2 - (n_{\xi}^{(e)}, \Omega_x)^2 \right)^{1/2}, \quad (21)$$

где Ω_{ξ} – модуль абсолютной угловой скорости ротора на осях статора; $n_{\xi}^{(e)}$ – внешняя нормаль, проведенная к поверхности статора, Ω_x – абсолютная угловая скорость несущего опорного элемента (ротора гироскопа).

Моменты сил трения верчения и качения определяются формулами:

$$M_{нк}(\gamma) = -m^e n_{\xi}^{(e)} N \pi a_0^2, \quad (22)$$

$$\text{где } m^e = \frac{\left(\frac{r_c}{2r_{ш}}\right) M^e \text{sign}(\Omega_x, n_x^{(e)})}{(\pi a_0^2)}.$$

$$M_p^k = -(r_c/2r_{ш}) f^k F_x \Omega_p^k / |\Omega^k|, \quad (23)$$

где угловая скорость качения Ω^k определяется по формуле:

$$\Omega_x^k = -(r_c/2r_{ш}) \left\{ [n_{1x}(n_x^{(e)}, \Omega_x) - \Omega_{1x}] e_1 + [n_{2x}(n_x^{(e)}, \Omega_x) - \Omega_{2x}] e_2 + [n_{3x}(n_x^{(e)}, \Omega_x) - \Omega_{3x}] e_3 \right\}, \quad (24)$$

где e_1, e_2, e_3 – единичные векторы трехгранника x , жестко связанного с ротором гироскопа.

Консервативный момент определяется силой, действующей по нормали к поверхности ротора, и выражается формулой:

$$M = N \iint_{S_j} f_x^*(v_x, \varphi_x) [r_x, n_x^{(e)}] dS = -kN \sum_{j=1}^2 \rho_{j0}^{3/2} \iint_{S_j} \left[1 + (\rho_{\max, n_x^{(e)}}) / \rho_{j0} \right]^{3/2} [r_x, n_x^{(e)}] / \sqrt{(1 - \mu_x^2)} d\mu_x d\varphi_x, \quad (25)$$

где r_x – радиус-вектор, проведенный из центра масс ротора в точку, лежащую на поверхности ротора шарового гироскопа; $f_x^*(v_x, \varphi_x)$ – плотность сил на поверхности ротора радиуса R_x .

Подставляя значение единичного вектора e_2 в выражение (13), получим:

$$M_k = M_k(\gamma) [e_3, g^*] / \sin(\gamma), \quad M_{HK} = M_{HK}(\gamma) [e_3, [e_3, g^*]] / \sin(\gamma) = M_{HK}(\gamma) \{e_3 \cos \gamma - g^*\} / \sin(\gamma). \quad (26)$$

Из выражения (26) видно, что эти два момента периодически зависят от угла γ между кинетическим моментом H ротора и внешней нагрузкой G .

Уравнение движение (11), после подстановки в него выражения (26), запишем в проекциях на оси трехгранника ξ . Для этого определим компоненты единичных векторов e_3 и g^* на оси трехгранника ξ :

$$e_3 = \{\cos \sigma \sin \delta, \sin \sigma \sin \delta, \cos \delta\}, \quad g^* = \{g_1^*, g_2^*, g_3^*\}. \quad (27)$$

Векторное произведение e_3 и g^* равно

$$[e_3, g^*] = (\sin \sigma \sin \delta - \cos \delta) i_1 + (\cos \delta - \cos \sigma \sin \delta) i_2 + \sin \delta (\cos \sigma - \sin \sigma) i_3, \quad (28)$$

а скалярное произведение этих векторов выражается следующим образом:

$$\cos \gamma = \cos \sigma \sin \delta \sin \alpha + \sin \sigma \sin \delta + \cos \delta \cos \alpha. \quad (29)$$

Здесь i_1, i_2, i_3 – единичные векторы неподвижного трехгранника ξ ;

δ, σ – углы перехода от системы координат x к системе координат ξ ;

α – угол ориентации перегрузки относительно оси симметрии шарового подвеса.

Производные от единичного вектора e_3 по осям трехгранника ξ представим в виде:

$$\dot{e}_3 = \begin{bmatrix} \dot{\delta} \cos \sigma \cos \delta - \dot{\sigma} \sin \sigma \sin \delta \\ \dot{\delta} \sin \sigma \cos \delta + \dot{\sigma} \cos \sigma \sin \delta \\ -\dot{\delta} \sin \delta \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Подставляя выражения (26-28), (30) в уравнение (11), получим уравнения движения в проекциях на оси трехгранника ξ :

$$\begin{aligned} H[\dot{\delta} \cos \sigma \cos \delta - \dot{\sigma} \sin \sigma \sin \delta] &= \\ &= \{M_k(\gamma)(\sin \sigma \sin \delta - \cos \delta) + M_{HK}(\gamma)(\cos \sigma \sin \delta \cos \gamma - 1.)\} / \sin \gamma, \\ H[\dot{\delta} \sin \sigma \cos \delta + \dot{\sigma} \cos \sigma \sin \delta] &= \\ &= \{M_k(\gamma)(\cos \delta - \cos \sigma \sin \delta) + M_{HK}(\gamma)(\sin \sigma \sin \delta \cos \gamma - 1.)\} / \sin \gamma, \\ -H\dot{\delta} \sin \delta &= \{M_k(\gamma)(\cos \sigma - \sin \sigma) \sin \delta + M_{HK}(\gamma)(\cos \delta \cos \gamma - 1.)\} / \sin \gamma. \end{aligned} \quad (31)$$

Подставляя в уравнения движения (31) значение $\cos\gamma$ из выражения (29), и разрешая полученные соотношения относительно $\dot{\sigma}$ и $\dot{\delta}$, найдем:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \{[M_k(\gamma)(\cos\delta - \cos\sigma\sin\delta) + M_{HK}(\gamma)(\sin^2\sigma\sin^2\delta - 1.)]\cos\sigma - [M_k(\gamma)(\sin\sigma\sin\delta - \cos\delta) + M_{HK}(\gamma)(\cos^2\delta\sin^2\delta - 1.)]\sin\sigma\}/H\sin\delta\sin\gamma, \\ \dot{\delta} &= -\{M_k(\gamma)(\cos\delta - \sin\sigma)\sin\delta - M_{HK}(\gamma)\sin^2\delta\}/H\sin\delta\sin\gamma. \end{aligned} \quad (32)$$

Рассмотрим случай, когда внешняя нагрузка G направлена по оси статора ξ_3 . В этом случае уравнения движения (32) имеют следующий вид:

$$\dot{\sigma} = -M_k(\gamma)/(H\sin\gamma), \quad \dot{\delta} = M_{HK}(\gamma)\sin\delta/(H\sin\gamma). \quad (33)$$

Рассмотрим движение ротора шарового гироскопа под действием только неконсервативных моментов, т.е. положим $M_k(\gamma) = 0$. Тогда, очевидно

$$\dot{\sigma} = 0, \quad M_{HK}(\gamma)\sin\delta/(H\sin\gamma), \quad (34)$$

Сначала рассмотрим уравнения движения ротора без предварительного натяга

$$M_{HK}(\gamma) = (4/3) f C^* (G \cos\gamma / (N \cos v_x^1))^{1/3} G \sin\gamma, \quad (35)$$

подставив $C^* = (3/16)[3\pi R^*/(4E^*)]^{1/3}$ в уравнение (34), получим:

$$\dot{\sigma} = 0, \quad \dot{\delta} = (4/3) f C^* (G \cos\gamma / (N \cos v_x^1))^{1/3} G \sin\delta / H. \quad (36)$$

После интегрирования уравнение (2.95) приводится к следующему виду:

$$\sigma = const, \quad tg(\delta/2) = tg(\delta_0/2) exp(B_0 t), \quad (37)$$

где δ_0 - начальное значение угла δ ; t - время,

$$B_0 = (4/3) f C^* ((N \cos v_x^1))^{-1/3} G^{4/3} / H.$$

Предполагая [22]

$$\begin{aligned} f &= 0.15; E = 197 \left(\frac{\Gamma H}{M^2}\right); r_{ш} = 1.98 \times 10^{-3} (\text{м}); r_c = 6.35 \times 10^{-3} (\text{м}); \\ v &= 0.3; N = 11; v_x^1 = 55^\circ; G = 7.384 (\text{Н}); \gamma = 2^\circ, \end{aligned}$$

вычислим угловую скорость ухода из уравнения (2.96):

$$\dot{\delta} = B_0 \cos^{1/3} \delta \sin\delta = 2 \times 10^{-4} (\text{с}^{-1}). \quad (38)$$

Значение полученного ухода по порядку совпадает с результатом работы [8]. В конкретных практических применениях гироскопа, эта угловая скорость ухода считается существенной.

Так как для стабильности положения центра масс ротора гироскопа играет важную роль предварительный натяг, то он является основным параметром в рассматриваемых уравнениях движения.

Рассмотрим уравнения движения ротора с большим предварительным натягом на каждом шарике. В этом случае уводящий момент сил трения верчения представляется в виде:

$$M_{\text{нк}}(\gamma) = (2/9) f C^* P_0^{-2/3} G^2 \sin 2\gamma / (N \cos v_x^1), \quad (39)$$

где P_0 - сила натяга на каждом шарике.

После подстановки выражение (39) в прецессионное уравнения движения (31), будем иметь:

$$\dot{\sigma} = 0, \dot{\delta} = A_0 \cos \delta \sin \delta, A_0 = (4/9) f C^* P_0^{-2/3} G^2 / (H N \cos v^{(1)}). \quad (40)$$

После интегрирования уравнения (40), получим:

$$\sigma = \text{const}, \quad \text{tg} \delta = \text{tg} \delta_0 \exp(A_0 t). \quad (41)$$

При $P_0 = 6,679 \text{ Н}$ и вышеприведенных значениях остальных переменных, вычислим угловую скорость ухода из уравнения (40):

$$\dot{\delta} = 2 \times 10^{-5} (\text{с}^{-1}). \quad (42)$$

По мере увеличения величины натяга P_0 , уменьшается угловая скорость ухода. В работе [8] показано, что если величина натяга имеет порядок перегрузки, то угловая скорость ухода гироскопа в исследуемом подвесе снижается почти на 90 %.

Величина усилий предварительной затяжки имеет важное значение для работы гироскопического прибора. Чрезмерная затяжка шарикоподшипника в главных опорах гироскопа приводит к увеличению момента сил трения в них, однако под действием рабочей нагрузки влияние чрезмерного натяга на внутреннее трение практически не сказывается.

Напишем прецессионное уравнение для кинетического момента ротора в проекциях на оси статора:

$$\begin{aligned} H_{1\xi}^x &= H[\dot{\delta} \cos \sigma \cos \delta - \dot{\sigma} \sin \sigma \sin \delta] = M_1^p, \\ H_{2\xi}^x &= H[\dot{\delta} \sin \sigma \cos \delta + \dot{\sigma} \cos \sigma \sin \delta] = M_2^p. \end{aligned} \quad (43)$$

В правой части уравнения (43) находится момент сил трения с большим предварительным натягом, при центрировании сепараторов по ротору гироскопа. Так как кинетический момент ротора не перпендикулярен к моменту сил трения и к уходу приводят составляющие, перпендикулярные кинетическому моменту ротора, то M_1^p, M_2^p определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} M_1^p &= M_{1\xi}^p - (M_{1\xi}^p \gamma_1^2 + M_{2\xi}^p \gamma_1 \gamma_2 + M_{3\xi}^p \gamma_1 \gamma_3), \\ M_2^p &= M_{2\xi}^p - (M_{1\xi}^p \gamma_1 \gamma_2 + M_{2\xi}^p \gamma_2^2 + M_{3\xi}^p \gamma_2 \gamma_3), \end{aligned} \quad (44)$$

в свою очередь $M_{1\xi}^p, M_{2\xi}^p, M_{3\xi}^p$ состоят из суммы слагаемых моментов, определяемых по формулам:

$$\begin{aligned} M_{1\xi}^k &= M_{1x}^k \beta_{11} + M_{2x}^k \beta_{21} + M_{3x}^k \beta_{31}, M_{2\xi}^k = M_{1x}^k \beta_{12} + M_{2x}^k \beta_{22} + M_{3x}^k \beta_{32}, \\ M_{3\xi}^k &= M_{1x}^k \beta_{13} + M_{2x}^k \beta_{23} + M_{3x}^k \beta_{33}. \end{aligned} \quad (45)$$

Здесь β_{ij} - направляющие косинусы трехгранника x в трехграннике ξ ; $M_{1x}^k, M_{2x}^k, M_{3x}^k$ определяют проекции момента сил трения качения в проекциях на оси ротора и представляются следующим образом:

$$\begin{aligned} M_{1x}^k &= c_0 \rho_{1x} (1 - \mu_x^2) + c_0 \rho_{1x} \{c_2 - 2(c_2 - 2\rho_{3x}^2) \mu_x^2 + (c_2 - 4\rho_{3x}^2) \mu_x^4\} / c_1, \\ M_{2x}^k &= c_0 \rho_{2x} (1 - \mu_x^2) + c_0 \rho_{2x} \{c_2 - 2(c_2 - 2\rho_{3x}^2) \mu_x^2 + (c_2 - 4\rho_{3x}^2) \mu_x^4\} / c_1, \\ M_{3x}^k &= c_0 \rho_{3x} \mu_x^2 + 4c_0 \rho_{3x} \{3c_2 + (-3c_2 + 2\rho_{3x}^2) \mu_x^2\} \mu_x^2 / (3c_1). \end{aligned} \quad (46)$$

Здесь $c_0 = -3\pi k N \rho_0^{1/2} \Delta v f^k$, $c_1 = 1/(128\rho_0^2)$, $c_2 = \rho_{1x}^2 + \rho_{2x}^2$,

$$\begin{aligned} M_{1\xi}^k &= A_1 A_2 \rho_{1\xi} \rho_{3\xi}, M_{2\xi}^k = 2A_1 A_2 \rho_{2\xi} \rho_{3\xi}, M_{3\xi}^k = A_1 \{-2\mu_\xi [\rho_0^2 + 0.5(\rho_{1\xi}^2 + \rho_{2\xi}^2)] - \\ &[2\rho_{3\xi}^2 - (\rho_{1\xi}^2 + \rho_{2\xi}^2)](A_2 + \mu_\xi)\}, \end{aligned} \quad (47)$$

где $\rho_{1\xi}, \rho_{2\xi}, \rho_{3\xi}$ определяются по формуле,

$$\begin{aligned} M_{1\xi}^k &= c_0^* \rho_{1\xi} (1 - \mu_\xi^2) + c_0^* \rho_{1\xi} \{c_2^* - 2(c_2^* - 2\rho_{3\xi}^2) \mu_\xi^2 + (c_2^* - 4\rho_{3\xi}^2) \mu_\xi^4\} / c_1, \\ M_{2\xi}^k &= c_0^* \rho_{2\xi} (1 - \mu_\xi^2) + c_0^* \rho_{2\xi} \{c_2^* - 2(c_2^* - 2\rho_{3\xi}^2) \mu_\xi^2 + (c_2^* - 4\rho_{3\xi}^2) \mu_\xi^4\} / c_1, \\ M_{3\xi}^k &= -c_0^* \rho_{3\xi} \mu_\xi^2 + 4c_0^* \rho_{3\xi} \{3c_2^* + (-3c_2^* + 2\rho_{3\xi}^2) \mu_\xi^2\} \mu_\xi^2 / (3c_1). \end{aligned} \quad (48)$$

Здесь $c_0^* = -3\pi k N \rho_0^{1/2} \Delta v_\xi f^k$, $c_1 = 1/(128\rho_0^2)$, $c_2^* = \rho_{1\xi}^2 + \rho_{2\xi}^2$.

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ являются компонентами единичного вектора e_3 кинетического момента ротора.

Подставляя выражения (44) в уравнение (43), определим уход гироскопа

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= -(M_1^p \sin \sigma - M_2^p \cos \sigma) / (H \sin \delta), \\ \dot{\delta} &= (M_2^p - H \dot{\sigma} \sin \delta \cos \sigma) / (H \cos \delta \sin \sigma). \end{aligned} \quad (49)$$

Напишем прецессионное уравнение движения кинетического момента ротора при центрировании сепараторов по статору гироскопа

$$\begin{aligned} H_{1\xi}^{\xi} &= H [\dot{\delta} \cos \sigma \cos \delta - \dot{\sigma} \sin \sigma \sin \delta] = M_1^{\xi}, \\ H_{2\xi}^{\xi} &= H [\dot{\delta} \sin \sigma \cos \delta + \dot{\sigma} \cos \sigma \sin \delta] = M_2^{\xi}. \end{aligned} \quad (50)$$

где

$$\begin{aligned} M_1^{\xi} &= M_{1\xi}^{\xi} - (M_{1\xi}^{\xi} \gamma_1^2 + M_{2\xi}^{\xi} \gamma_1 \gamma_2 + M_{3\xi}^{\xi} \gamma_1 \gamma_3), \\ M_2^{\xi} &= M_{2\xi}^{\xi} - (M_{1\xi}^{\xi} \gamma_1 \gamma_2 + M_{2\xi}^{\xi} \gamma_2^2 + M_{3\xi}^{\xi} \gamma_2 \gamma_3). \end{aligned}$$

Здесь $M_{1\xi}^{\xi}, M_{2\xi}^{\xi}, M_{3\xi}^{\xi}$ состоят из суммы, определяемые по формулам

$$\begin{aligned} M_{1\xi}^k &= c_0^* \rho_{1\xi} (1 - \mu_\xi^2) + c_0^* \rho_{1\xi} \{c_2^* - 2(c_2^* - 2\rho_{3\xi}^2) \mu_\xi^2 + (c_2^* - 4\rho_{3\xi}^2) \mu_\xi^4\} / c_1, \\ M_{2\xi}^k &= c_0^* \rho_{2\xi} (1 - \mu_\xi^2) + c_0^* \rho_{2\xi} \{c_2^* - 2(c_2^* - 2\rho_{3\xi}^2) \mu_\xi^2 + (c_2^* - 4\rho_{3\xi}^2) \mu_\xi^4\} / c_1, \\ M_{3\xi}^k &= -c_0^* \rho_{3\xi} \mu_\xi^2 + 4c_0^* \rho_{3\xi} \{3c_2^* + (-3c_2^* + 2\rho_{3\xi}^2) \mu_\xi^2\} \mu_\xi^2 / (3c_1). \end{aligned} \quad (51)$$

Здесь $c_0^* = -3\pi k N \rho_0^{1/2} \Delta v_\xi f^k$, $c_1 = 1/(128\rho_0^2)$, $c_2^* = \rho_{1\xi}^2 + \rho_{2\xi}^2$.

Обсуждение.

Определена зависимость углов σ и δ , определяющих ориентацию вектора кинетического момента H , направленного по орту e_3 трехгранника z^* , от параметров системы в неподвижной системе координат ξ .

Пренебрегая нутационными колебаниями, получены решения уравнений движения, справедливые в течение ограниченного промежутка времени, когда ось, по которой направлен вектор кинетического момента, остается достаточно близко к оси симметрии подвеса.

Основной задачей при действии моментов трения на шаровой гироскоп является обеспечение допустимой величины ухода для заданных условий эксплуатации. При этом должны быть удовлетворены в первую очередь ограничения на требуемые углы прокачки ротора относительно корпуса прибора. Это есть измеряемые углы, фиксируемые емкостными датчиками угла. Для данного прибора эти углы составляют около 0.3 рад.

На движение гироскопа в большей степени оказывают влияние предварительный натяг, угловая скорость собственного вращения ротора гироскопа, перегрузка, коэффициенты трения и др.

Движения оси прибора определяются через направляющие косинусы $\beta_1 = \cos\sigma\sin\delta$, $\beta_2 = \sin\sigma\sin\delta$, $\beta_3 = \cos\delta$ единичного вектора кинетического момента ротора шарового гироскопа в трехграннике ξ , связанного с неподвижным корпусом прибора.

При рассмотрении кинематики шарового гироскопа была использована гипотеза ведущего кольца, в которой шарик совершает чистое качение по одной кольце, а по другой относительно верчение и качение. Эта гипотеза имеет место и в динамике свободного гироскопа.

Проведен сравнительный количественный анализ влияние параметров подвеса на характеристики прецессионного движения кинетического момента ротора шарового гироскопа относительно неподвижной системы координат, связанной со статором гироскопа, в двух случаях – при установлении сепараторов по опорному элементу и несущему опорному элементу. При центрировании сепараторов по статору, поскольку контактные нагрузки будут равны, и контакт шарика со статором имеет более тесное прилегание, чем контакт с ротором, шарик совершает чистое качение по опорному элементу, а на роторе наблюдается относительно верчение и качение. При установлении сепараторов на роторе будет наоборот.

Вначале рассмотрим движение конца единичного вектора кинетического момента ротора при центрировании сепараторов по статору.

При числовом расчете использованы следующие базовые данные параметров гироскопа:

$$f = 0.15; f^k = 10^{-5}(\text{м}); E = 197 \left(\frac{\text{ГН}}{\text{м}^2} \right); r_{\text{ш}} = 1.98 \times 10^{-3}(\text{м});$$
$$r_c = 6.35 \times 10^{-3}(\text{м});$$
$$v = 0.3; N = 11; v_x^1 = 55^\circ; G = 7.384(\text{Н}); R_x = 10.3 \times 10^{-3}(\text{м}); P_0 = 6.7(\text{Н}); H = 4.5 \times 10^{-3}(\text{Нмс}); \alpha = \beta = 0^\circ; \sigma_0 = 10^{-4}(\text{рад}); \delta_0 = 0.2(\text{рад})$$

Зависимость получена при работе гироскопа за 20 с.

Проанализировано зависимость систематического ухода от предварительного натяга. При малом натяге $P_0 = 0.7(\text{Н})$ ось прибора будет уходит от осей ξ_1, ξ_3 , наиболее приближаясь к оси ξ_1 . Если увеличить натяг до $P_0 = 6.7(\text{Н})$, то вектор кинетического момента будет уходит от оси симметрии подвеса ξ_3 к осям ξ_1 и ξ_2 . При этом систематический уход намного уменьшится.

Если коэффициент трения качения отличается от базового на $4 \times 10^{-5}(\text{м})$, то характеристика гироскопа ухудшается. Причиной систематического ухода также является перегрузка. При уменьшении внешней силу, порождаемого перегрузкой, уменьшается отклонение оси прибора. При увеличении кинетического момента на $H = 2 \times 10^{-4}(\text{Нмс})$ наблюдается некоторое уменьшение ухода гироскопа.

При увеличении натяга от $P_0 = 0.7 (\text{Н})$ до $P_0 = 6.7 (\text{Н})$ и на роторе, и на статоре будет происходить уменьшение отклонение оси прибора от заданного. При малом натяге, когда сепараторы установлены на роторе, будет наблюдаться увеличение ухода гироскопа, т.е. за 20 с работы прибора уход по углу δ составляет 0.78 (рад), что превосходит допустимое значение ухода почти 5 раз. При базировании сепараторов по статору уход составит 0.1 (рад). Если увеличить натяг до $P_0 = 6.7 (\text{Н})$, то уход составит 0.027 (рад), когда сепараторы на роторе, а когда на статоре – 0.016 (рад). По углу σ , если на роторе, ухода не будет, когда на статоре при малом натяге уход уменьшается на 0.00066 (рад), при большом натяге увеличивается, и составляет 0.0002 (рад).

При увеличении коэффициента трения качения ухудшается характеристика гироскопа. Когда сепараторы на роторе при $f^k = 10^{-5}(\text{м})$ уход по углу δ более интенсивен и составляет 0.176 (рад), по углу σ постоянен. Если сепараторы на статоре в этом случае уход составляет 0.094 (рад). По углу σ составит 0.0013 (рад).

При уменьшении внешней силу, порождаемого перегрузкой, от 7.4 (Н) до 1.4 (Н) происходит уменьшение систематического ухода прибора. Когда сепараторы на роторе уход по углу δ составит всего 0.0047 (рад), по углу σ постоянен, а когда на статоре по δ составляет 0.0029 (рад), а по σ - 0.00003 (рад).

При увеличении скорости ротора на 40 (рад/с) при базировании сепараторов по ротору уход по δ уменьшится от 0.028 (рад) до 0.027 (рад). Если на статоре, то уменьшится от 0.017 (рад) до 0.016 (рад).

Таким образом, в работе оценены и сравнены ухода гироскопического прибора в случаях, когда сепараторы сферического шарикоподшипника центрированы к опорному и несущему опорному элементам. Показано, что в первом случае угол между вектором кинетического момента и направлением вектора перегрузки нарастает медленнее, чем во втором.

Заключение.

1. Рассмотрена динамика гироскопа в шаровом подшипниковом осесимметричном подвесе ротора. Определены силовая функция для момента сил по первой гармонике, действующих на поверхности твердого тела и силовая функция моментов сил по второй гармонике, действующих по нормали к поверхности ротора.

2. Рассмотрена кинематика трехстепенного гироскопа на шарикоподшипниковом подвесе.

3. Определены уводящие моменты «сухого» трения.

4. Составлены и исследованы уравнения динамики прецессионного движения кинетического момента ротора. Оценены и сравнены ухода гироскопического прибора в случаях, когда сепараторы центрированы к опорному и к несущему опорному элементам. Показаны, что в первом случае угол между вектором кинетического момента и направлением вектора перегрузки нарастает медленнее, чем во втором.

Эффективность и область применения: Полученные результаты теоретических исследований позволяют

улучшить работу приборов и устройств, применяемых в гироскопических системах ориентации, стабилизации и навигации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Anfinoqenov A.S., Gusinsky V.Z., Parfenov O.I. - Electrostatic gyro. // The second soviet - Chinese symposium on Inertial technology. 9-15 October 1992. - S.-Petersburg, 1992. pp. 71-80.
- [2] Ковалев М.П., Сивоненко И.М., Явленский К.Н. Опоры приборов. – М.: Машиностроение, 1967. – 192 с.
- [3] Ковалев М.П. Опоры и подвесы гироскопических устройств. – М.: Машиностроение, 1970. – 287 с.
- [4] Колосов Ю.А., Ляховецкий Ю.Г., Рахтеенко Е.Р. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем / Под ред. проф. Д.С. Пельпора – М.: Высшая школа, 1977-197 с.
- [5] Abel D.J. Means for supporting and torquing a rotor of a multiple degree of freedom gyroscope. - Пат. 3.499.333 (США). Заявл. 14.02.67, опубл. 10.03.70: 74-5.7.
- [6] Iddings L.A. 2-Axis. Nonfloated ball bearing gyroscope. - Пат. 3.408.874 (США). Заявл. 18.11.65: опубл. 05.11.68: 74-5.
- [7] Делекторский Б.А., Мастяев Н.З., Орлов И.Н. Проектирование гироскопических электродвигателей. – М.: Машиностроение, 1968. – 252 с.
- [8] Гу А. Анализ ухода гироскопа со сферическим шарикоподшипниковым подвесом // Тр. амер. об-ва инж.-мех. Проблемы трения и смазки. Серия F.-1975. – Т.97. - №1. – С. 77-86.
- [9] Мартыненко Ю.Г. Движение твердого тела в электрических и магнитных полях. – М.: Наука, 1988. – 368 с.
- [10] Гу А. Анализ ухода гироскопа со сферическим шарикоподшипниковым подвесом // Тр. амер. об-ва инж.-мех. Проблемы трения и смазки. Серия F. – 1975. – Т.97. - №1. – С. 77-86.
- [11] Распопов В.Я., Иванов Ю.И. Гироскопы с шаровым шарикоподшипниковым подвесом. – Деп. в ВИНТИ. Тула, 1983, №3262. – 164 с.
- [12] Денисов Г.Г., Комаров В.Н. Неконсервативные моменты и их влияние на прецессию неконтактного гироскопа // Изв. АН СССР. Сер.: Механика твердого тела. – 1979. - №3.
- [13] Ган К.Г. Методика расчета минимальной допустимой нагрузки в скоростных малонагруженных подшипниках качения // Вестник МГТУ. Сер.: Машиностроение. – 1994. - №1. – С. 32-38.
- [14] Байжуманов М.М., Карипбаев С.Ж., Сартаев К.З. Построение силовой функции возмущающих моментов ротора шарового гироскопа // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы информатики и процессов управления», посвященной 70-летию заслуженного деятеля науки Республики Казахстан, академика АН ВШ РК, доктора технических наук, профессора Айсағалиева С.А. 15-16 ноября 2012 года, Алматы, Казахстан.
- [15] Кобрин А.И., Сартаев К.З. Погрешности гироскопа с центральной сферической опорой, вызванные влиянием возмущающих моментов двигателя // Вестник МГТУ. Серия: Приборостроение. – 1994. - №2. – С.87-91.
- [16] Карипбаев С.Ж., Ландау Б.Е., Мартыненко Ю.Г., Подалков В.В. Зависимость угловой скорости электростатического гироскопа от температуры окружающей среды // Изв. РАН. МТТ. -1993.-№3.-С.42-49.

REFERENCES*

- [1] Anfinoqenov A.S., Gusinsky V.Z., Parfenov O.I. - Electrostatic gyro. // The second soviet - Chinese symposium on Inertial technology. 9-15 October 1992. - S.-Petersburg, 1992. pp. 71-80.

[2] Kovalev M.P., Sivonenko I.M., Javlenskij K.N. Opory priborov. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 192 s.

[3] Kovalev M.P. Opory i podvesy giroskopicheskikh ustrojstv. – M.: Mashinostroenie, 1970. – 287 s.

[4] Kolosov Ju.A., Ljahoveckij Ju.G., Rahtenko E.R. Giroskopicheskie sistemy. Proektirovanie giroskopicheskikh sistem / Pod red.prof. D.S.Pel'pora. – M.: Vysshaja shkola, 1977-197 s.

[5] Abel D.J. Means for supporting and torquing a rotor of a multiple degree of freedom gyroscope. - Pat.3.499.333(SShA). Zajavl.14.02.67, opubl.10.03.70:74-5.7.

[6] Iddings L.A. 2-Axis. Nonfloated ball bearing gyroscope. - Pat. 3.408.874 (SShA). Zajavl. 18.11.65: opubl. 05.11.68: 74-5.

[7] Delektorskij B.A., Mastjaev N.Z., Orlov I.N. Proektirovanie giroskopicheskikh jelektrodvigatelij. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 252 s.

[8] Gu A. Analiz uhoda giroskopa so sfericheskim sharikopodshipnikovym podvesom//Tr. amer. ob-va inzh.-meh. Problemy trenija i smazki. Serija F.-1975. – T.97. - №1. – S. 77-86.

[9] Martynenko Ju.G. Dvizhenie tverdogo tela v jelektricheskikh i magnitnyh poljah. – M.: Nauka, 1988. – 368 s.

[10] Gu A. Analiz uhoda giroskopa so sfericheskim sharikopodshipnikovym podvesom // Tr. amer. ob-va inzh.-meh. Problemy trenija i smazki. Serija F. – 1975. – T.97. - №1. – S. 77-86.

[11] Raspopov V.Ja., Ivanov Ju.I. Giroskopy s sharovym sharikopodshipnikovym podvesom. – Dep. v VINITI. Tula, 1983, №3262. – 164 s.

[12] Denisov G.G., Komarov V.N. Nekonservativnye momenty i ih vlijanie na precessiju nekontaktnogo giroskopa// Izv. AN SSSR. Ser.: Mehanika tverdogo tela. – 1979. - №3.

[13] Gan K.G. Metodika rascheta minimal'noj dopustimoj nagruzki v skorostnyh malonagruzhennyh podshipnikah kachenija // Vestnik MGTU. Ser.: Mashinostroenie. – 1994. - №1. – S. 32-38.

[14] Bajzhumanov M.M., Karipbaev S.Zh., Sartaeв K.Z. Postroenie silovoj funkcii vozmushhajushhix momentov rotora sharovogo giroskopa // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Aktual'nye problemy informatiki i processov upravlenija», posvjashhennoj 70-letiju zaslužennogo dejatelja nauki Respubliki Kazahstan, akademika AN VSh RK, doktora tehničeskix nauk, professora Ajsagalieva S.A. 15-16 nojabrja 2012 goda, Almaty, Kazahstan.

[15] Kobrin A.I., Sartaeв K.Z. Pogreshnosti giroskopa s central'noj sfericheskoj oporoj, vyzvannye vlijaniem vozmushhajushhix momentov dvigatelja // Vestnik MGTU. Serija: Priborostroenie. – 1994. - №2. – S.87-91.

[16] Karipbaev S.Zh., Landau B.E., Martynenko Ju.G., Podalkov V.V. Zavisimost' uglovoj skorosti jelektrostaticheskogo giroskopa ot temperatury okružhajushhej sredy//Izv.RAN.MTT. -1993.-№3.-S.42-49.

Салиакын Карипбаев, т.ғ.к., PhD, доцент, Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан, s.karipbayev@agakaz.kz

Махмедия Бимагамбетов, т.ғ.к., доцент, Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан, m.bimagambetov@agakaz.kz

Айдос Молдабеков, х.ғ.к., доцент, Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан, a.moldabekov@agakaz.kz

Жандос Жұмаділов докторант, Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан, zhandos.zhumadilov@agakaz.kz

Жанар Азелханова, сеньор лектор, Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан, zh.azelkhanova@agakaz.kz

ШАРИКТІ МОЙЫНТИРЕКТЕ РОТОРДЫҢ ОСЕСИМЕТРИЯЛЫҚ БЕКІТІЛГЕНДЕГІ ГИРОСКОПТЫҢ ДИНАМИКАСЫ

Аңдатпа. Шарлы гироскоптың қателігінің пайда болуының негізгі себебіне синхронды гистерезис қозғалтқышының полярлы толқыту моментінің болуынан және ротордың сфералық еместігінен жетек қуатының әжептәуір бөлігінің жұмсалуды да жатады. Жұмыста шариктер мен шарлы аспаның элементтері арасындағы саңылаулардың гироскоптың ауытқуына әсері де қарастырылған. Ротордың масса центрінің статорға қатысты орын ауыстыруы гироскоптың статорының магнит өрісі тудыратын гармоникалық күштердің әсерінен болатыны айқындалған. Ротордың айналуының берілген дәлдігін қамтамасыз ету, серпімді орын ауыстыруларды, демек, үйкеліс күштерінің моментін азайту, шариктер мен сақиналар арасындағы саңылауларды жою, радиалды, сол сияқты өстік бағыттарда қатаңдықты ұлғайту үшін құрастыру кезінде жылжымалы түйіндерде алдын-ала тартылған шариктіподшипниктер жиі қолданылады. Мұндай жағдайда денелер мен тербелу жолдары тозған сайын сақтау және пайдалану кезінде алдын-ала тарту мөлшері сақталмайды. Ол үшін пайдалану процесінде алдын-ала тарту мөлшерін тұрақты түрде қамтамасыз ететін және оны механизмнің жұмыс процесінде кезеңді түрде реттеу мүмкіндігін қарастыратын компенсациялық құрылғылар қолданылады.

Әрбір шарикті алдын ала үлкен тарту жүргізілген және шариктерді тарту болмаған жағдайлардағы гироскоп роторының қозғалыс теңдеулері қарастырылған. Сепараторлардың гироскоп роторы бойынша және сепараторлардың гироскоптың статоры бойынша центрленгендегі ротордың кинетикалық моменті қозғалысының прецессиялық теңдеулері қарастырылған. Гироскоптың ауытқуының бұрыштық жылдамдығын анықтайтын формула алынған. Гистерезистік гироскопиялық электр қозғалтқышының толқу моменттері болған кездегі шарлы гироскоптың ауытқуына сандық талдау жасалған.

Түйінді сөздер. Шарлы гироскоп, шариктімойынтірек, ротордың кинетикалық моменті, үйкеліс күштерінің моменттері, гироскоптың бұрыштық ауытқу жылдамдығы, әрбір шарикті алдын ала үлкен тарту.

Saliakyn Karipbayev, candidate of technical sciences, PhD, docent, Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan, s.karipbayev@agakaz.kz

Mahmedia Bimagambetov, candidate of technical sciences, docent, Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan, m.bimagambetov@agakaz.kz

Aidos Moldabekov, candidate of chemical sciences, docent, Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan, a.moldabekov@agakaz.kz

Zhandos Zhumadilov, doctoral student, Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan, zhandos.zhumadilov@agakaz.kz

Zhanar Azelkhanova, senior lecturer, Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan, zh.azelkhanova@agakaz.kz

THE DYNAMICS OF THE GYROSCOPE IN THE CASE OF AXISYMMETRIC FIXING OF THE ROTOR ON THE BALL BEARING

Abstract. The main reason for the error of the ball gyroscope is also the presence of the polar disturbing moment of the synchronous hysteresis motor and the non-sphericity of the rotor,

which takes a significant part of the drive power to compensate. The influence of the backlash between the balls and the elements of the globular suspension on the gyroscope drift is considered in the work. The displacement of the center of mass of the rotor relative to the stator occurs due to harmonic forces generated by the magnetic field of the gyro motor stator. To ensure a given accuracy of rotation of the rotor, to reduce elastic displacements, and hence the moment of friction forces, to eliminate gaps between balls and rings, to increase stiffness, both in the radial and axial directions, in moving units, bearings during assembly are often installed with preload. At the same time, the preload value is not preserved during storage and operation as the rolling bodies and raceways wear out. For this, compensating devices are used that maintain a constant preload during operation, and provide for the possibility of periodically adjusting it during the operation of the mechanism. The equations of motion of the gyroscope rotor are considered in cases where each ball has a large preload and when the balls are not preloaded. The precession equations of motion of the kinetic moment of the rotor are considered when the separators are centered along the gyroscope rotor and when the separators are centered along the gyroscope stator.

A formula is obtained that determines the angular velocity of the gyroscope departure. A quantitative analysis of the drift of a ball gyroscope in the presence of disturbing moments of a hysteresis gyroscopic electric motor has been carried out.

Keywords. Ball gyroscope, ball bearing, kinetic moment of the rotor, moments of friction forces, angular deflection speed of the gyroscope, large pull each ball in advance.
