==

Инновациялық технология және аваиациялық техника
Инновационные технологии и авиационная техника
Innovative technology and aviation technics

==

DOI 10.53364/24138614_2021_21_2_11
УДК 531.383

В.В.Подалков[1], С.Ж. Карипбаев[2]
[1]Московский энергетический институт, г. Москва, РФ
[2]Академия гражданской авиации, г. Алматы, РК.

[1]*E-mail: PodalkovVV@mpei.ru**
[2]*E-mail: kczh.1957@mail.ru*

АСФЕРИЗАЦИЯ РОТОРА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА
ЭЛЕКТРОСТАТИКАЛЫҚ ГИРОСКОП РОТОРЫНЫҢ АСФЕРИЗАЦИЯСЫ
ASPHERIZATION OF THE ROTOR OF AN ELECTROSTATIC GYROSCOPE

Аннотация. Разработано полное теоретическое обоснование процесса асферизации ротора электростатического гироскопа (ЭСГ) при предварительной обработке его поверхности под равномерным давлением. Задача об асферизации ротора ЭСГ с учетом четвертой гармоники в форме поверхности ротора была решена с привлечением методов пространственной теории упругости. В этом случае уравнений внутренней поверхности ротора было представлено таким образом, что при проведении его асферизации появилась возможность избавиться не только от второй, но и от четвертой гармоник. Приведены формулы для расчета давления и указаны случаи, когда подобный технологический прием не дает необходимого результата.

Ключевые слова: Электростатический гироскоп, ротор, угловая скорость, процесс асферизации ротора, кинетический момент, силовая функция, “опорное” напряжение на электродах, интегрирование по поверхностям электродов.

Abstract. A complete theoretical substantiation of the process of aspherization of the rotor of an electrostatic gyroscope (ESG) during preliminary processing of its surface under uniform pressure has been developed. The problem of aspherization of the ESG rotor taking into account the fourth harmonic in the form of the rotor surface was solved using the methods of the spatial theory of elasticity. In this case, the equations of the inner surface of the rotor were presented in such a way that when it was aspherized, it became possible to get rid of not only the second, but also the fourth harmonics. Formulas for calculating pressure are given and cases are indicated when such a technological method does not give the required result.

Key words: Electrostatic gyroscope, rotor, angular velocity, rotor aspherization process, angular momentum, force function, “reference” voltage on electrodes, integration over electrode surfaces.

Аңдатпа. Электростатикалық гироскоптың (ESG) роторының оның бетін алдын-ала біркелкі қысыммен өңдеу кезінде оның асферизациалану процесінің толық теориялық негіздемесі жасалған. Ротор беті түріндегі төртінші гармониканы ескере отырып, ESG роторын асферизациялау мәселесі серпімділіктің кеңістіктік теориясының әдістерін қолдана отырып шешілді. Бұл жағдайда ротордың ішкі бетінің теңдеулері осылай келтірілген, ол оны асферирлегенде тек екінші емес, төртінші гармоникадан да арылуға

мүмкіндік туды. Қысымды есептеу формулалары келтірілген және мұндай технологиялық әдіс қажетті нәтиже бермейтін жағдайлар көрсетілген.

Түйін сөздер: Электростатикалық гироскоп, ротор, бұрыштық жылдамдық, ротордың асфералану процесі, бұрыштық импульс, күш функциясы, электродтардағы «сілтеме» кернеуі, электродтардың беттері бойынша интеграция.

Основная часть. Для проведения асферизации ротора электростатического гироскопа вращаем его вокруг оси динамической симметрии $0x_3$. При этом угол нутации $\vartheta = 0$, откуда следует, что проекции вектора угловой скорости на ось x_1 $a = 0$, на ось x_3 $\omega = L/I_3$. Поставляя эту проекцию угловой скорости в

$$u_r = \frac{\rho\omega^2R^3}{3G(7+5\mu)}[(I+\mu)r^3 - (3+2\mu)R^2r]P_2(æ) \quad , (1.1)$$

получим уравнения деформации ротора при вращении его вокруг $0x_3$

$$u_r(\alpha,\beta) = -\frac{\rho R^3\,(2+\mu)}{2G(7+5\mu)}\left[(\frac{L}{I_3})^2\left(cos^2\,\alpha - \frac{1}{3}\right)\right] \qquad (1.2)$$

Затем, вычитая последнее из (1.1), можно написать уравнение поверхности деформированного ротора в движении, близком к движению Эйлера-Пуансо, с учетом его деформации:

$$r_1 = R + +\left\{-\frac{\rho R^3\,(2+\mu)}{2G(7+5\mu)}\,L^2\left[-sin^2\vartheta\left(\frac{1}{I_3^2}+\frac{1}{2I_1^2}\right)*\left(cos^2\,\alpha-\frac{1}{3}\right)+\right.\right.$$
$$\left.\left.\frac{1}{2I_1I_3}\sin 2\vartheta\sin 2\alpha\cos(\beta-vt)+\frac{1}{2I_1^2}sin^2\,\vartheta\,sin^2\,\alpha\cos(2vt-2\beta)\right]\right\}$$

С учетом (1.3) получим уравнение деформированной поверхности ротора в трехграннике $\xi_1\xi_2\xi_3$, жестко связанном с корпусом ротора в сферических координатах ϑ_1, φ_1

$$r(\vartheta_1,\varphi_1) = R - \frac{\rho R^3\,(2+\mu)}{2G(7+5\mu)}\,L^2\left\{\frac{1}{3}\,sin^2\vartheta\left(\frac{1}{I_3^2}+\frac{1}{2I_1^2}\right) - sin^2\vartheta\left(\frac{1}{I_3^2}+\frac{1}{2I_1^2}\right)[\beta_{31}\sin\vartheta_1\,cos\varphi_1 +\right.$$
$$\beta_{32}\sin\vartheta_1\,sin\varphi_1 + \beta_{33}cos\vartheta_3]^2 + \frac{1}{I_1I_3}\sin\,2\vartheta\,\,(\beta_{31}\sin\vartheta_1\,cos\varphi_1 + \beta_{32}\sin\vartheta_3\,sin\varphi_3 +$$
$$\beta_{33}cos\vartheta_3) * \left\{cosvt(\beta_{11}\sin\vartheta_1\,cos\varphi_1 + \beta_{12}\sin\vartheta_1\,sin\varphi_1 + \beta_{13}cos\vartheta_1) +\right.$$
$$+\frac{1}{2I_1^2}\,sin^2\,\vartheta\cos 2vt\{[\beta_{11}\sin\vartheta_1\,cos\varphi_1 + \beta_{12}\sin\vartheta_1\,sin\varphi_1 + \beta_{13}cos\vartheta_3]^2 +$$
$$+\sin vt\,(\beta_{21}\sin\vartheta_1\,cos\varphi_1 + \beta_{22}\sin\vartheta_1\,sin\varphi_1 + \beta_{23}cos\vartheta_1)\} + [\beta_{21}\sin\vartheta_1\,cos\varphi_1 +$$
$$\left.\beta_{22}\sin\vartheta_1\,sin\varphi_1 + \beta_{23}cos\vartheta_3]^2\right\} + +\frac{1}{I_3^2}sin^2\vartheta\,sin2vt\{(\beta_{11}\sin\vartheta_1\,cos\varphi_1 + \beta_{12}\sin\vartheta_1\,sin\varphi_1 +$$
$$\left.\beta_{13}cos\vartheta_1) * (\beta_{21}\sin\vartheta_1\,cos\varphi_1 + \beta_{22}\sin\vartheta_1\,sin\varphi_1 + \beta_{23}cos\vartheta_1)\}\right\} \qquad (1.4)$$

Подставляя уравнение (1.4) в формулы [1]:

$$M_1 = fR^2\iint\limits_{S_1}(\frac{\partial r}{\partial\vartheta_1}\sin\vartheta_1\sin\varphi_1 + \frac{\partial r}{\partial\varphi_1}\cos\vartheta_1\cos\varphi_1)d\vartheta_1 d\varphi_1$$

$$M_2 = fR^2\iint_{S_1}(-\frac{\partial r}{\partial\vartheta_1}\sin\vartheta_1\cos\varphi_1 + \frac{\partial r}{\partial\varphi_1}\cos\vartheta_1\sin\varphi_1)d\vartheta_1 d\varphi_1$$

$$M_3 = fR^2\iint\limits_{S_1}(-\frac{\partial r}{\partial\vartheta_1}\sin\vartheta_1)\,d\vartheta_1 d\varphi_1$$

и выполняя интегрирование по поверхностям электродов, затем осредняя полученные выражения по явно выходящему времени, имеем для проекции момента поддерживающих сил, действующих со стороны пятого и шестого электродов, следующие выражения, соответственно

$$M_1^{(5)} = M_3^{(5)} = 0, \qquad M_2^{(5)} = f_5 M_0 \gamma_1 \gamma_3$$

(1.5)

$$M_1^{(0)} = M_3^{(0)} = 0, \qquad M_2^{(0)} = f_0 M_0 \gamma_1 \gamma_3$$

где

$$M_0 = \frac{\rho R^3 \,(2+\mu)\pi\, L^2}{2G(7+5\mu) I_3^2}\, sin^2\vartheta \left[-(3\,cos^2\vartheta - 1) + \frac{I_3^2}{I_1^2}(3\,sin^2\vartheta - 1) + 6\frac{I_3}{I_1} cos^2\vartheta\right] \cos\psi\; sin^2\psi$$

В рассматриваемой сферической системе координат интегрирование по поверхностям других электродов затруднительно, однако, учитывая симметрию данной конфигурации электродов подвеса, требуемый результат можно получить при использовании других сферических координат с полярным осями ξ_2 и ξ_3 при интегрировании S_3 и S_4 и соответственно – по S_1 и S_2. Выполнив указанные преобразования, находим

$$M_1^{(3)} = M_2^{(3)} = M_3^{(3)} = 0,$$
$$M_1^{(4)} = M_2^{(4)} = M_3^{(4)} = 0,$$

(1.6)

$$M_1^{(1)} = M_3^{(1)} = 0, \qquad M_2^{(1)} = -f_1 M_0 \gamma_1 \gamma_3$$
$$M_1^{(2)} = M_3^{(1)} = 0, \qquad M_2^{(2)} = -f_2 M_0 \gamma_1 \gamma_3$$

Используя (1.5) и (1.6), находим выражения для проекций суммарного момента, действующего на ротор со стороны всех электродов

$$M_1 = M_3 = 0, \qquad M_2 = (f_5 + f_0 - f_1 - f_2) M_0 \gamma_1 \gamma_3. \qquad (1.7)$$

В общем случае, когда кинетический момент расположен произвольным образом относительно системы координат ξ_1, ξ_2, ξ_3, провода аналогичные рассуждения как и в случае, когда вектор кинетического момента лежит в плоскости $\xi_1\xi_3$, имеем для проекций момента поддерживающих сил, действующих со стороны всех электродов подвеса следующие выражения

$$M_1 = (f_3 + f_4 - f_5 - f_0) M_0 \gamma_2 \gamma_3,$$
$$M_2 = (f_5 + f_0 - f_1 - f_2) M_0 \gamma_3, \gamma_1 \qquad (1.8)$$
$$M_3 = (f_1 + f_2 - f_3 - f_4) M_0 \gamma_1 \gamma_2.$$

Введем в рассмотрение функцию

$W = W(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$

Производные по углам γ_1, γ_2, γ_3 от функции (1.9) дают проекции моментов сил, действующих по нормали к поверхности ротора на оси неподвижного трехгранника $\xi_1\xi_2\xi_3$ [1]:

$$M_1 = \gamma_2 \frac{\partial W}{\partial \gamma_3} - \gamma_3 \frac{\partial W}{\partial \gamma_2},$$
$$M_2 = \gamma_3 \frac{\partial W}{\partial \gamma_1} - \gamma_1 \frac{\partial W}{\partial \gamma_3}, \qquad (1.10)$$
$$M_3 = \gamma_1 \frac{\partial W}{\partial \gamma_2} - \gamma_2 \frac{\partial W}{\partial \gamma_1}$$

Из (1.8), (1.9) и (1.10) видно, что в рассматриваемом случае силовая функция моментов сил является квадратичной формой направляющих косинусов вектора кинетического момента ротора

$$W = \frac{M_0}{2}[(f_1+f_2)\gamma_1^2 + (f_3+f_4)\gamma_2^2 + (f_5+f_6)\gamma_3^2] \qquad (1.11)$$

В случае, когда твердое тело неподвижно в неконтактном подвесе, главный вектор поддерживающих сил F уравновешивается главным вектором массовых сил, приложенных к телу (массовыми силами являются сила тяготения, сила инерции переносного движения и т. д.). Таким образом, силовая функция (1.11) представляет собой силовую функцию маятника, у которого масса равна массе тела, а центр масс смещен из центра неконтактного подвеса на величину $R_1\varepsilon_1$. При этом возмущения, определяемые силовой функцией (1.11), будут линейными. (Возмущения называются линейными, если для них можно построить силовую функцию, линейно зависящую от направляющих косинусов осп симметрии тела с неизменно ориентированными в пространстве осями ξ_1, ξ_2, ξ_3.

Принимая во внимание формулы для плотности поддерживающих сил (1.6), перепишем силовую функцию в виде

$$W = -\frac{M_o}{16\pi d^2 R^2}\sum_{j=1}^{3}\left[u_{2j-1}^2 + u_{2j}^2 - 2u_b(u_{2j-1} + u_j)\right]\gamma_0^2 \qquad (1.12)$$

Для последующего анализа моментов необходимо конкретизировать выражения для потенциалов u_j.

Электроды, отвечающие разным каналам системы регулирования подвеса, не должны пересекаться, поэтому величина $\mu_0 = \cos\psi_0$ в (1.6) удовлетворяет неравенству $1/\sqrt{2} < \mu_0 < 1 \quad (0 < \psi < \frac{\pi}{4})$. Следовательно, начиная с пятой гармоники, можно выбрать такой угол ψ_0, определяющий размер электрода, чтобы

$P_{k-1}(\cos\psi_0) - P_{k+1}(\cos\psi_0) = 0$

При указанном выборе ψ_0 момент, обусловленный наличием k-й гармоники в форме тела, будет тождественно равен нулю. В частности, при k =5 корень уравнения (1.73) $\psi \approx 40°$, $\psi \approx 34°$ при k = 6, $\psi \approx 29°$ при k =7 и т. д.

Остановимся на рассмотрении системы регулирования на постоянном токе. В этом случае потенциалы электродов u_j удовлетворяют неравенству [1]:

$$0 \le u_j \le 2V_0$$

Здесь V_0- "опорное" напряжение на электродах. Если пренебречь динамикой системы регулирования, то закон управления потенциалами электродов можно записать

$$u_{2j-1} = V_0 - V_j, \qquad u_{2j} = V_0 + V_j, \qquad |V_j| \le V_0. \quad (1.14)$$

где $V_j = const$ – добавочное напряжение, подаваемое системой регулирования на электроды для обеспечения стабилизации положения центра масс ротора на оси подвеса.

$$V_j = -\frac{\pi h^2 F_j}{\left(\sqrt{2}\,arctg\,\frac{1}{\sqrt{2}}\right)V}$$

$$F_j = \frac{1}{2\pi\sqrt{2}h^2}\left(arctg\,\frac{1}{\sqrt{2}}\right)\left(u_{2j-1}^2 - u_{2j}^2\right)$$

Согласно [1] при линейном законе регулирования потенциалов электродов величину $u_{2j-1}^2 + u_{2j}^2 - 2u_b(u_{2j-1} + u_j)$ в (1.12) можно выразить через проекцию на ось ξ_2 главного вектора поддерживающих сил, приложенных к телу

$$u_{2j-1}^2 + u_{2j}^2 - 2u_b\left(u_{2j-1} + u_{2j}\right) = 2V(V - 2u_b) + \frac{8d^4F_j^2}{(V+u_b)^2(1-cos^2\psi)^2} \qquad (1.15)$$

Представим проекции равнодействующей поддерживающих сил F на оси ξ_1, ξ_2 и ξ_3 в виде

$$F_1 = Fsin\,\vartheta_1\cos\varphi_1, \qquad F_2 = Fsin\,\vartheta_1\sin\varphi_1, \qquad F_3 = \cos\,\vartheta_1,$$

Здесь два угла ϑ_1 и φ_1 сферической системы координат с полярной осью ξ_3, характеризует положение главного вектора массовых сил.

Потенциалы электродов не могут быть произвольными: установившимся режиме работы электростатического гироскопа на неподвижном основании главный вектор поддерживающих сил F уравновешивается силой тяжести ротора P.

Подставляя (1.13) с учетом (1.15), (1.17) и проекции вектора поддерживающих сил (1.10) получим квадрат модуля моментов сил, действующих на незаряженный ротор со стороны электростатического поля

$$M^2(\lambda,\zeta,\vartheta_1,\varphi_1) = (M^*)^2\{sin^2 2\lambda[sin^2\zeta f_1^2(\vartheta_1\varphi_1)+\ cos^2\zeta f_2^2(\vartheta_1\varphi_1)] + +sin^4\lambda\ sin^2 2\xi f_3^2(\vartheta_1\varphi_1)\},$$

где $f_1(\vartheta_1\varphi_1) = cos^2\vartheta_1 - sin^2\varphi_1 sin^2\vartheta_1,\qquad f_3(\vartheta_1\varphi_1) = sin^2\vartheta_1\cos 2\varphi_1,$

$$f_2(\vartheta_1\varphi_1) = cos^2\vartheta_1 - cos^2\varphi_1 sin^2\vartheta_1,$$

$$M^* = -\frac{M_o}{2\pi R^2}\left[\frac{d\ mg}{V(4+3cos\psi)(1-cos^2\psi)}\right]^2.$$

Исследуем зависимость возмущающего момента от ориентации вектора кинетического момента. Видно, что в случае, когда λ=0, т.е., когда вектор кинетического момента направлен по оси ξ_3 момент равен нулю.

Максимального значения момент достигает в случае, когда сила тяжести коллинеарна одной из осей симметрии электродов, т.е. когда в (1.11) $F_1 = mg$ [1, стр. 88.].

Числовой пример1.3. Рассмотрим электростатический гироскоп, у которого физические и геометрические характеристики описаны в примере 1.1. Опорные напряжение, подаваемые на электроды $V_0 = 450$ B, относительно зазор между ротором и электродами $d = 6 * 10^{-3}$. Пусть вектор кинетического момента лежит в плоскости $\xi_1\xi_3$. Угол, определяющий геометрический размер электродов, $\psi_0 = \arccos(5\backslash 6)$. По формуле (1.60) получаем $M_{max} = 3.2 * 10^{-4}$ г см^2/с^2. Это значение достигается, когда $\vartheta = \pi/2$ и когда вектор кинетического момента образуется осью ξ_3 угол $\pi/4$ или $3\pi/4$, т.е. $\gamma_1, \gamma_3 = 0.5$. По формуле M_{max}/L получаем величину возможного ухода электростатического гироскопа $\omega^* = 3.5 * 10^{-2}$ град/час. Для современного прецизионного гироскопа существенным считается уход $10^{-3} - 10^{-5}$ град/час.

Проведем асферизацию с учетом “двойного вращение” ротора. Для этого введем функцию $\tilde{u}_r(\alpha,\beta)$

$$\tilde{u}_r(\alpha,\beta) = -\frac{\rho R^3\,(2+\mu)}{2G(7+5\mu)}q^*\left(\frac{L}{I_3}\right)^2 cos^2\alpha \qquad (1.16)$$

где q^* пока неизвестный коэффициент. Вычитая (1.16) из (1.6), имеем уравнении поверхности деформированного ротора в движении, близком к движению Эйлера-Пуансо, с учетом асферизации ротора

$$r = R + \{-\frac{\rho R^3\,(2+\mu)}{2G(7+5\mu)}L^2\left[\left(\left(b^2 - q^*\frac{L^2}{I_3^2}\right) - \frac{a^2}{2}\right)cos^2\alpha + ab\sin 2\alpha\cos(\beta - \nu t) + \frac{a^2}{2}\ sin^2\alpha\cos(2\nu t - 2\beta)\right]$$

Далее, проделывая аналогичные выкладки, как и выше в рассмотренном случае, получим для M_0 следующее выражение

$$M_0=\frac{\rho R^5\,(2+\mu)\pi\,L^2}{2G(7+5\mu)I_3^2}\left[(3cos^2\vartheta-1)(cos^2\vartheta-q^*)+\frac{I_3^2}{I_1^2}(sin^2\vartheta-1)sin^2\vartheta+6\frac{I_3}{I_1}cos^2\vartheta\,sin^2\vartheta\right]\cos\psi\,sin^2\psi \qquad (1.17)$$

Из (1.10) и (1.11) видно, что при M_0 равном нулю, возмущающий момент, действующий на ротор электростатического поля, тоже обращается в нулю. Следовательно, приравнивая к нулю (1.17), можно найти значения q^*, при котором момент будет равен нулю

$$q^*=\frac{I_3^2}{I_1^2}\frac{sin^2\vartheta(3sin^2\vartheta-1)}{(3cos^2\vartheta-1)}+6\frac{I_3}{I_1}\frac{sin^2\vartheta\,cos^2\vartheta}{(3cos^2\vartheta-1)}*cos^2\vartheta \qquad (1.18)$$

Из (1.18) видно, что переменный коэффициент q^* имеет особенность при $\vartheta=\arccos(\frac{1}{\sqrt{3}})$. Следовательно, имеют место такие режимы движения ротора ЭСГ, при которых избавиться от возмущающих моментов, вызванных инерционными силами, при помощи асферизации, принципиально невозможно.

Точность уравнений теории изгиба тонких оболочек не позволяет получить достоверные результаты для амплитудных значений гармоник выше второй, которые имеют место при проведении асферизации. Поэтому задача об асферизации ротора ЭСГ с учетом четвертой гармоники в форме поверхности ротора была решена с привлечением методов пространственной теории упругости. В этом случае уравнений внутренней поверхности ротора было представлено таким образом, что при проведении его асферизации появилась возможность избавиться не только от второй, но и от четвертой гармоник.

Для уменьшения массы ротора электростатического гироскопа и повышения его перегрузочной способности ротор изготавливается в виде оболочки переменной толщины или в виде сферической оболочки постоянной толщины с кольцевым утолщением в экваториальной части и т.д. (подобные конструкции ротора необходимы для того, чтобы обеспечить неравенство моментов инерции ротора, и, тем самым, уменьшить время готовности приборе к работе, определяемое, в основном, временем демпфирования нутационных колебаний ротора, возникающих во время его раскрутки). При наличии эллипсоидальной полости внутри ротора или кольцевого утолщения в экваториальной области жесткость оболочки в направлении оси симметрии оказывается минимальной, поэтому если внести оболочку в камеру с повышенным давлением, то внешняя поверхность оболочки деформируется в сплюснутый сфероид. Можно обработать внешнюю поверхность оболочки ротора в камере таким образом, чтобы она превратилась в сферу. После снятия внешнего давления силы упругости превратят поверхность оболочки в желаемый вытянутый эллипсоид вращения. Описанная процедура называется асферизацией ротора.

Вначале рассматривается ротор ЭСГ, имеющий форму сферической оболочки постоянной толщины с кольцевым утолщением в экваториальной области. Показано, что процесс асферизации дает возможность избавиться от второй гармоники, которая имела бы место в форме его поверхности при вращении ротора. Однако при этом в разложении поверхности ротора по полиномам Лежандра появляются гармоники высокого порядка, амплитудные значения которых соизмеримы с амплитудными значениями гармоник, возникающих при наличии инерционных сил. Обработка ротора под действием внешнего давления их не компенсирует, т.е. изготовление ротора в форме тонкой сферической оболочки с неоднородностью, локализованной в ее экваториальной зоне, не позволяет эффективно провести его асферизации.

Далее рассматривается задача об асферизации ротора ЭСГ, представляющего собой тонкую оболочку переменной толщины, у которой внешняя поверхность есть сфера радиуса R, в внутренняя поверхность есть поверхность вращения, симметричная относительно экваториальной плоскости ротора.

При помощи метода малого параметра найдены формы ротора при его асферизации с учетом высших гармоник, возникающих как при действии центробежных сил, так и при действии равномерно распределенного внешнего давления, которые взаимно не компенсируются. Проделанные числовые расчеты показывают, что амплитудное значение прогиба при четвертой гормонике после при проведении асферизации может быть лишь в 10 раз меньше, чем при второй гармонике до асферизации.

Точность уравнений теории изгиба тонких оболочек не позволяет получить достоверные результаты для амплитудных значений гармоник выше второй, которые имеют место при проведении асферизации. Поэтому задача об асферизации ротора ЭСГ с учетом четвертой гармоники в форме поверхности ротора была решена с привлечением методов пространственной теории упругости. В этом случае уравнений внутренней поверхности ротора было представлено таким образом, что при проведении его асферизации появилась возможность избавиться не только от второй, но и от четвертой гармоник.

При аварийной остановке ЭСГ необходимо обеспечить возможность скольжения ротора по поверхности кожуха и не допустить разрушения его поверхности. Поэтому ротор ЭСГ покрывается тонкой, устойчивой к фрикционному разрушению пленкой. Внешнее покрытие ротора рассматривается как микронеоднородная композитная среда, математическая модель которой представляет ее как среду, состоящую из случайно перемешанных изотропных составляющих, сцепленных между собой с идеальной адгезией.

Выводы. 1. Разработано полное теоретическое обоснование процесса асферизации ротора при предварительной обработке его поверхности под равномерным давлением. Задача об асферизации ротора ЭСГ с учетом четвертой гармоники в форме поверхности ротора была решена с привлечением методов пространственной теории упругости. В этом случае уравнений внутренней поверхности ротора было представлено таким образом, что при проведении его асферизации появилась возможность избавиться не только от второй, но и от четвертой гармоник.

Недостатком такого способа является то, что расчет не учитывает ряд факторов, влияющих на точность определения частоты вращения ротора, при которой он нечувствителен к изменению пондеромоторных сил. К этим факторам следует отнести:

- разброс входящих в расчетные формулы параметров материала ротора (плотности, модуля упругости и др.);
- поле допусков при изготовлении ротора;
- влияние на точность ЭСГ высших гармоник формы поверхности ротора.

Все эти факторы снижают потенциальную точность ЭСГ, т.к. несовпадение формы поверхности ротора со сферой приводит к появлению момента от действия пондеромоторных сил, направленных по нормали к поверхности, и, следовательно, к возникновению уходов гироскопа.

Задачей настоящего предлложение являются определение частоты вращения ротора ЭСГ, при которой он становится интегрально сферическим (номинальной частоты вращения), что уменьшает уводящие моменты от пондемоторных сил, а следовательно, повышает точность гироскопа. Приведены формулы для расчета давления и указаны случаи, когда подобный технологический прием не дает необходимого результата.

2. При аварийной остановке ЭСГ необходимо обеспечить возможность скольжения ротора по поверхности кожуха и не допустить разрушения его поверхности. Поэтому ротор ЭСГ покрывается тонкой, устойчивой к фрикционному разрушению пленкой. Внешнее покрытие ротора рассматривается как микронеоднородная композитная среда, математическая модель которой представляет ее как среду, состоящую из случайно перемешанных изотропных составляющих, сцепленных между собой с идеальной адгезией.

Список использованных источников

1. Мартыненко Ю. Г. Движение твердого тела в электрических и магнитных полях,— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.- 368 с., ISBN 5-02-013801-0.

2. Карипбаев С.Ж., Ландау В.Е., Мартынанко Ю.Г., Подалков В.В. Зависимость угловой скорости электростатического гироскопа от температуры окружающей среда // Изв. РАН. МТТ.- 1993.- И 3. - С. 42-49.

3. Мартыненко Ю.Г., Омаров А.Ж., Подалков В.В. Движение упругой сферической оболочки в неконтактном подвесе // Изв. АН СССР. МТТ. - 1998.- М.- С. 25-30.

4. Мартыненко Ю.Г., Подалков В.В. О нереализуемости двойного вращения ротора в идеальном электростатическом гироскопе // Гироскопия и навигация.- 1994,- JS2.- С.83.

5. Карипбаев С.Ж. Об асферизации ротора электростатического гироскопа// Всероссийская конференция, Всероссийский выставочный центр, Москва, 28 мая1994 г.

6. Мартыненко Ю.Г., Подалков В.В. О нутациях твердого тела в неконтактном подвесе // Изв. РАН. МТТ.- 1995.- №2.- С. 26-31.

7. Мартыненко Ю.Г., Подалков В.В. О необходимости учета высших гармоник при асферизации полого ротора электростатического гироскопа// Гироскопия и навигация.- 1996.- №4(15).- 0.50-51.

8. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка бескардановых гироскопов с шаровым ротором на электростатическом и коподшипниковом подвесах», (промежуточный), Научный руководитель темы: к.т.н. Карипбаев С.Ж. УДК 531.383; ГРНТИ 30.15.35; № госрегистрации: 0112РК02743, АО Академия ГА, Алматы 2013 г.

References

1. Martynenko İu.G. Dvijenie tverdogo tela v elektricheskih i magnitnyh polяh,— M.: Nauka. Gl. red. fiz. -mat. lit., 1988.- 368 s., ISBN 5-02-013801-0.

2. Karipbaev S.J., Landau V.E., Martynanko İu.G., Podalkov V.V. Zavisimost uglovoi skorosti elektrostaticheskogo giroskopa ot temperatury okrujaei sreda // İzv. RAN. MTT. - 1993.- İ 3. - S. 42-49.

3. Martynenko İu. G., Omarov A.J., Podalkov V.V. Dvijenie uprugoi sfericheskoi obolochki v nekontaktnom podvese // İzv. AN SSSR. MTT. - 1998.- M.- S. 25-30.

4. Martynenko İu.G., Podalkov V.V. O nerealizuemosti dvoinogo vraenia rotora v idealnom elektrostaticheskom giroskope // Giroskopiя i navigasiя.- 1994,- JS2.- S.83.

5. Karipbaev S.J. Ob asferizasii rotora elektrostaticheskogo giroskopa// Vserossiiskaя konferensiя, Vserossiiskii vystavochnyi sentr, Moskva, 28 maя1994.

6. Martynenko İu.G., Podalkov V.V. O nutasiяh tverdogo tela v nekontaktnom podvese // İzv. RAN. MTT. - 1995.- №2.- S. 26-31.

7. Martynenko İu. G., Podalkov V.V. O neobhodimosti ucheta vysşih garmonik pri asferizasii pologo rotora elektrostaticheskogo giroskopa// Giroskopiя i navigasiя.- 1996.- №4(15). - 0.50-51.

8. Otchet o nauchno-issledovatelskoi rabote «Razrabotka beskardanovyh giroskopov s şarovym rotorom na elektrostaticheskom i kopodşipnikovom podvesah», (promejutochnyi), Nauchnyi rukovoditel temy: k.t.n. Karipbaev S.J. UDK 531.383; GRNTİ 30.15.35; № gosregistrasii: 0112RK02743, AO Akademiя GA, Almaty 2013.