

Рис. 1.7. К определению моментных возмущений, действующих на ротор

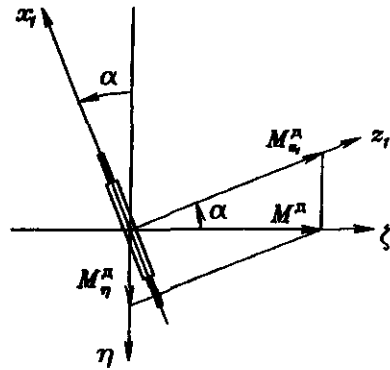


Рис. 1.8. К определению моментного возмущения со стороны двигателя

Только одна из этих составляющих, а именно $M_{z_1}^A$, передается на ротор. Составляющая M_{η}^A уравнивается реакциями в опорах двигателя. Разложим момент $M_{z_1}^A$, приложенный к ротору, на две составляющие, направленные по осям y' и z' , связанным с ротором:

$$\begin{aligned} M_{y'}^A &= -M_{z_1}^A \sin \beta \cong -M^A \beta; \\ M_{z'}^A &= M_{z_1}^A \cos \beta \cong M^A. \end{aligned} \quad (1.32)$$

Составляющая $M_{z'}^A$ уравнивается моментом газодинамического сопротивления вращению ротора, а составляющая $M_{y'}^A$ учитывается в уравнениях (1.28).

Итак, окончательно выражения для проекций моментов, действующих на ротор, во вращающейся системе координат $x'y'z'$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} M_{x'} &= M_{x'}^T = k_{\beta} \beta + D_{\beta} \dot{\beta}; \\ M_{y'} &= -M_{y_1}^R + M_{y'}^A = -M_{y_1}^R - M^A \beta. \end{aligned} \quad (1.33)$$

Для получения выражений проекций моментов M_x и M_y , действующих на ротор, в невращающейся системе координат $x y z$ спроецируем зависимости (1.33) на оси x и y и добавим в них проекции внешних моментов M_{ξ}^B и M_{η}^B , действующих относительно осей опорного трехгранника (например, моменты датчиков момента). Тогда на основании рис. 1.9 для малых углов α_1, β_1 имеем

$$\begin{aligned} M_x &= M_{x'} \cos \varphi - M_{y'} \sin \varphi - M_{\eta}^B; \\ M_y &= M_{x'} \sin \varphi + M_{y'} \cos \varphi + M_{\xi}^B, \end{aligned} \quad (1.34)$$

или с учетом (1.33)

$$\begin{aligned} M_x &= k_{\beta} \beta \cos \varphi + D_{\beta} \dot{\beta} \cos \varphi + M^A \beta \sin \varphi + M_{y_1}^R \sin \varphi - M_{\eta}^B; \\ M_y &= k_{\beta} \beta \sin \varphi + D_{\beta} \dot{\beta} \sin \varphi - M^A \beta \cos \varphi - M_{y_1}^R \cos \varphi + M_{\xi}^B. \end{aligned} \quad (1.35)$$

Подставим сюда выражение для момента реакции кольца $M_{y_1}^R$ из (1.20):

$$\begin{aligned} M_x &= k_{\beta} \beta \cos \varphi + D_{\beta} \dot{\beta} \cos \varphi + M^A \beta \sin \varphi + B_1 \ddot{\alpha} \sin \varphi + D_{\alpha} \dot{\alpha} \sin \varphi + \\ &+ [k_{\alpha} + (C_1 - A_1) \dot{\varphi}^2] \alpha \sin \varphi + B_1 (\dot{\omega}_{\xi} \cos \varphi + \dot{\omega}_{\eta} \sin \varphi) \sin \varphi - \\ &- (B_1 + C_1 - A_1) \dot{\varphi} \omega_{\xi} \sin^2 \varphi + (B_1 + C_1 - A_1) \dot{\varphi} \omega_{\eta} \cos \varphi \sin \varphi - M_{\eta}^B; \\ M_y &= k_{\beta} \beta \sin \varphi + D_{\beta} \dot{\beta} \sin \varphi - M^A \beta \cos \varphi - B_1 \ddot{\alpha} \cos \varphi - D_{\alpha} \dot{\alpha} \cos \varphi - \\ &- [k_{\alpha} + (C_1 - A_1) \dot{\varphi}^2] \alpha \cos \varphi - B_1 (\dot{\omega}_{\xi} \cos \varphi + \dot{\omega}_{\eta} \sin \varphi) \cos \varphi + \\ &+ (B_1 + C_1 - A_1) \dot{\varphi} \omega_{\xi} \sin \varphi \cos \varphi - (B_1 + C_1 - A_1) \dot{\varphi} \omega_{\eta} \cos^2 \varphi + M_{\xi}^B. \end{aligned} \quad (1.36)$$

Поскольку уравнения движения ротора гироскопа (1.21) отнесены к системе координат $x y z$, положение которой задано углами α_1, β_1 , необходимо в выражениях для моментов M_x, M_y перейти от координат α, β к координатам α_1, β_1 . Для этого воспользуемся выражениями (1.8), (1.9), (1.10):

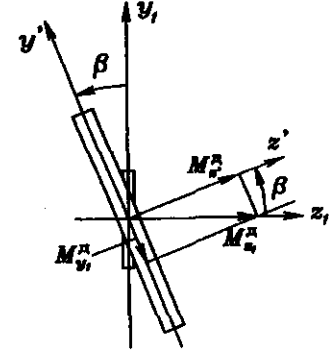


Рис. 1.9. К определению моментного возмущения со стороны двигателя

$$\begin{aligned}
M_x = & k_p \cos \varphi (-\alpha_1 \sin \varphi + \beta_1 \cos \varphi) + D_p \cos \varphi (-\dot{\alpha}_1 \sin \varphi - \\
& - \dot{\varphi} \alpha_1 \cos \varphi + \dot{\beta}_1 \cos \varphi - \dot{\varphi} \beta_1 \sin \varphi) + M^a \sin \varphi (-\alpha_1 \sin \varphi + \\
& + \beta_1 \cos \varphi) + B_1 \sin \varphi (\ddot{\alpha}_1 \cos \varphi - 2\dot{\alpha}_1 \dot{\varphi} \sin \varphi - \dot{\varphi}^2 \alpha_1 \cos \varphi + \\
& + \ddot{\beta}_1 \sin \varphi + 2\dot{\beta}_1 \dot{\varphi} \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \beta_1 \sin \varphi) + D_\alpha \sin \varphi (\dot{\alpha}_1 \cos \varphi - \\
& - \dot{\varphi} \alpha_1 \sin \varphi + \dot{\beta}_1 \sin \varphi + \dot{\varphi} \beta_1 \cos \varphi) + [k_\alpha + (C_1 - A_1) \dot{\varphi}^2] \sin \varphi \times \\
& \times (\alpha_1 \cos \varphi + \beta_1 \sin \varphi) + B_1 (\dot{\omega}_\xi \cos \varphi + \dot{\omega}_\eta \sin \varphi) \sin \varphi - \\
& - (B_1 + C_1 - A_1) \dot{\varphi} \omega_\xi \sin^2 \varphi + (B_1 + C_1 - A_1) \dot{\varphi} \omega_\eta \cos \varphi \sin \varphi - M_\eta^a;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_y = & k_p \sin \varphi (-\alpha_1 \sin \varphi + \beta_1 \cos \varphi) + D_p \sin \varphi (-\dot{\alpha}_1 \sin \varphi - \\
& - \dot{\varphi} \alpha_1 \cos \varphi + \dot{\beta}_1 \cos \varphi - \dot{\varphi} \beta_1 \sin \varphi) + M^a \cos \varphi (-\alpha_1 \sin \varphi + \\
& + \beta_1 \cos \varphi) - B_1 \cos \varphi (\ddot{\alpha}_1 \cos \varphi - 2\dot{\alpha}_1 \dot{\varphi} \sin \varphi - \dot{\varphi}^2 \alpha_1 \cos \varphi + \\
& + \ddot{\beta}_1 \sin \varphi + 2\dot{\beta}_1 \dot{\varphi} \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \beta_1 \sin \varphi) - D_\alpha \cos \varphi (\dot{\alpha}_1 \cos \varphi - \\
& - \dot{\varphi} \alpha_1 \sin \varphi + \dot{\beta}_1 \sin \varphi + \dot{\varphi} \beta_1 \cos \varphi) - [k_\alpha + (C_1 - A_1) \dot{\varphi}^2] \cos \varphi \times \\
& \times (\alpha_1 \cos \varphi + \beta_1 \sin \varphi) - B_1 (\dot{\omega}_\xi \cos \varphi + \dot{\omega}_\eta \sin \varphi) \cos \varphi + \\
& + (B_1 + C_1 - A_1) \dot{\varphi} \omega_\xi \sin \varphi \cos \varphi - (B_1 + C_1 - A_1) \dot{\varphi} \omega_\eta \cos^2 \varphi + M_\xi^a.
\end{aligned}$$

Далее учтем известные соотношения

$$\begin{aligned}
\cos^2 \varphi &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\varphi; \\
\sin^2 \varphi &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\varphi; \\
\sin \varphi \cos \varphi &= \frac{1}{2} \sin 2\varphi.
\end{aligned}$$

Подставляя эти выражения в (1.37) и пренебрегая составляющими моментов, изменяющимися с частотой, равной удвоенной частоте вращения ротора, окончательно имеем

$$\begin{aligned}
M_x = & \frac{1}{2} k_p \beta_1 - \frac{1}{2} D_p \dot{\varphi} \alpha_1 + \frac{1}{2} D_p \dot{\beta}_1 - \frac{1}{2} M^a \alpha_1 - B_1 \dot{\varphi} \dot{\alpha}_1 + \\
& + \frac{1}{2} B_1 \ddot{\beta}_1 - \frac{1}{2} B_1 \dot{\varphi}^2 \beta_1 - \frac{1}{2} D_\alpha \dot{\varphi} \alpha_1 + \frac{1}{2} D_\alpha \dot{\beta}_1 + \frac{1}{2} [k_\alpha + \\
& + (C_1 - A_1) \dot{\varphi}^2] \beta_1 + \frac{1}{2} B_1 \dot{\omega}_\eta - \frac{1}{2} (B_1 + C_1 - A_1) \dot{\varphi} \omega_\xi - M_\eta^a; \\
M_y = & -\frac{1}{2} k_p \alpha_1 - \frac{1}{2} D_p \dot{\varphi} \alpha_1 - \frac{1}{2} D_p \dot{\varphi} \beta_1 - \frac{1}{2} M^a \beta_1 - B_1 \dot{\varphi} \dot{\beta}_1 - \\
& - \frac{1}{2} B_1 \ddot{\alpha}_1 + \frac{1}{2} B_1 \dot{\varphi}^2 \alpha_1 - \frac{1}{2} D_\alpha \dot{\varphi} \alpha_1 - \frac{1}{2} D_\alpha \dot{\varphi} \beta_1 - \frac{1}{2} [k_\alpha + \\
& + (C_1 - A_1) \dot{\varphi}^2] \alpha_1 - \frac{1}{2} B_1 \dot{\omega}_\xi - \frac{1}{2} (B_1 + C_1 - A_1) \dot{\varphi} \omega_\eta + M_\xi^a.
\end{aligned}$$

Подставляя выражения (1.39) в динамические уравнения Эйлера (1.28), получаем уравнения движения ДНГ в невращающейся системе координат $x y z$:

$$\begin{aligned}
\left(A + \frac{1}{2} B_1 \right) \ddot{\alpha}_1 + \frac{1}{2} (D_\alpha + D_p) \dot{\alpha}_1 + \left[\frac{1}{2} (k_\alpha - k_p) - \frac{1}{2} (A_1 + B_1 - C_1) \dot{\varphi}^2 \right] \alpha_1 + \\
+ (C + B_1) \dot{\varphi} \dot{\beta}_1 + \frac{1}{2} (D_\alpha + D_p) \dot{\varphi} \beta_1 + \frac{1}{2} M^a \beta_1 = \\
= - \left(A + \frac{1}{2} B_1 \right) \dot{\omega}_\xi - \left(C + \frac{C_1 + B_1 - A_1}{2} \right) \dot{\varphi} \omega_\eta + M_\xi^a; \\
\left(A + \frac{1}{2} B_1 \right) \ddot{\beta}_1 + \frac{1}{2} (D_\alpha + D_p) \dot{\beta}_1 + \left[\frac{1}{2} (k_\alpha - k_p) - \frac{1}{2} (A_1 + B_1 - C_1) \dot{\varphi}^2 \right] \beta_1 - \\
- (C + B_1) \dot{\varphi} \dot{\alpha}_1 - \frac{1}{2} (D_\alpha + D_p) \dot{\varphi} \alpha_1 - \frac{1}{2} M^a \alpha_1 = \\
= - \left(A + \frac{1}{2} B_1 \right) \dot{\omega}_\eta + \left(C + \frac{C_1 + B_1 - A_1}{2} \right) \dot{\varphi} \omega_\xi + M_\eta^a.
\end{aligned}$$

1.3. Анализ уравнений движения ДНГ. Условие динамической настройки

В гироскопических индикаторных стабилизаторах ДНГ выполняет роль датчика положения платформы и должен иметь при этом

минимальный собственный дрейф. Однако анализ полученных уравнений движения гироскопа (1.40) показывает, что без принятия специальных мер эти условия не соблюдаются.

Действительно, при отсутствии внешних моментов $M_{\xi}^B = 0$, $M_{\eta}^B = 0$ и движения основания $\omega_{\xi} = 0$, $\omega_{\eta} = 0$ с учетом обозначений

$$J_1 = \frac{1}{2}(A_1 + B_1 - C_1), \quad k = \frac{1}{2}(k_{\alpha} + k_{\beta}), \quad D = \frac{1}{2}(D_{\alpha} + D_{\beta}) \quad (1.41)$$

установившееся движение гироскопа определяется уравнениями

$$\begin{aligned} (k - J_1 \dot{\phi}^2) \alpha_1 + D \dot{\phi} \beta_1 + \frac{1}{2} M^a \beta_1 &= 0; \\ (k - J_1 \dot{\phi}^2) \beta_1 - D \dot{\phi} \alpha_1 - \frac{1}{2} M^a \alpha_1 &= 0, \end{aligned} \quad (1.42)$$

которые получаются из (1.40), если приравнять нулю члены, содержащие производные от α_1 , β_1 . Решение этих уравнений имеет вид

$$\alpha_1 = 0, \quad \beta_1 = 0.$$

Таким образом, при произвольном положении неподвижного корпуса прибора отклонение гироскопа относительно корпуса, определяемое углами α_1 , β_1 , отсутствует, т. е. гироскоп оказывается связанным с корпусом. При этом отсутствует информация о положении корпуса гироскопа, что не позволяет использовать такой прибор в качестве датчика положения платформы стабилизатора, на которую он установлен.

Причиной такого положения является наличие в вибрационном гироскопе упругих (т. е. пропорциональных углам α_1 , β_1 отклонения гироскопа относительно корпуса) моментов, определяемых членами в левых частях уравнений (1.42). Наибольшими среди них являются инерционные моменты, возникающие при вращении кольца со скоростью $\dot{\phi}$, и упругие моменты подвеса. Осредненные за период выражения для суммы этих моментов в проекциях на оси x , y представлены первыми слагаемыми уравнений (1.42):

$$(k - J_1 \dot{\phi}^2) \beta_1; \quad (k - J_1 \dot{\phi}^2) \alpha_1.$$

Для снижения упругих моментов в ДНГ применяют следующие меры. Прежде всего, параметры гироскопа выбирают таким образом, чтобы выполнялось условие

$$k - J_1 \dot{\phi}^2 = 0, \quad (1.43)$$

которое называют условием динамической настройки. Выполнение условия (1.43) обеспечивает равенство в среднем за период инерционных моментов, возникающих при вращении кольца, и упругих моментов подвеса гироскопа и освобождает ДНГ от наибольшего из упругих моментов, определяемого первым слагаемым уравнения (1.42).

Кроме того, в ДНГ принимают меры по уменьшению демпфирующих моментов. Для этого обычно вакуумируют внутренний объем вибрационного гироскопа. Это обеспечивает малость коэффициента демпфирования D , который теперь определяется в основном внутренним трением в материале торсионов, а также газодинамическими моментами. В результате вакуумирования оказывается малым и момент M^a , определяемый разностью момента двигателя и момента трения шарикоподшипников, который уравновешивается моментом газодинамического сопротивления вращению ротора. Выполнение указанных выше условий обеспечивает низкий уровень упругих моментов, определяемых вторым и третьим слагаемыми уравнений (1.42).

Однако на практике условие динамической настройки не может быть выполнено абсолютно точно. Также невозможно обеспечить равенство нулю коэффициентов демпфирования. Это приводит к тому, что при больших углах α_1 , β_1 отклонения ротора гироскопа от корпуса нескомпенсированные упругие моменты оказываются значительными, что приводит к неприемлемо большому собственному дрейфу ДНГ. Для повышения точности ДНГ применяют режим слежения корпуса прибора за гироскопом (в гиросtabilизаторе) или гироскопа за корпусом прибора (в ДУС). Для этого ДНГ устанавливают на платформу гиросtabilизатора, работающего по сигналам рассогласования ротора гироскопа и корпуса. При появлении углов α_1 , β_1 автоматические системы стабилизации поворачивают платформу гиросtabilизатора с расположенным на ней гироскопом до обнуления указанного рассогласования. Это приводит к тому, что в процессе работы ДНГ углы α_1 , β_1 оказываются

очень малыми (несколько единиц угловых секунд). В связи с тем, что упругие моменты, определяемые левыми частями уравнений (1.42), пропорциональны углам α_1 , β_1 , они оказываются незначительными, что часто позволяет не учитывать упругие моменты в расчетах стабилизаторов на ДНГ, относя их к инструментальным погрешностям прибора.

Такой же результат получается при работе прибора в режиме слежения ротора ДНГ за корпусом (режим «ДНГ – ДУС»).

Кроме того, ограничение углов рассогласования между ротором и корпусом приводит к более точному выполнению условия динамической настройки (1.43). Это объясняется тем, что при больших углах α_1 , β_1 в материале упругих опор возникают нелинейные жесткостные эффекты, что приводит к изменению коэффициента k и к соответствующему нарушению условия (1.43).

Таким образом, применение ДНГ в качестве чувствительного элемента гиросtabilизатора или в режиме ДУС одновременно позволяет значительно повысить точностные характеристики самого гироскопа.

Если считать, что в результате введения вышеперечисленных мер упругие моменты оказываются пренебрежимо малыми, то с учетом (1.42) и в отсутствие внешних моментов M_ξ , M_η уравнения движения ДНГ (1.40) могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \left(A + \frac{1}{2} B_1 \right) \ddot{\alpha}_1 + D \dot{\alpha}_1 + (C + B_1) \dot{\phi} \dot{\beta}_1 = \\ & = - \left(A + \frac{1}{2} B_1 \right) \dot{\omega}_\xi - (C + B_1 - J_1) \dot{\phi} \dot{\omega}_\eta; \\ & \left(A + \frac{1}{2} B_1 \right) \ddot{\beta}_1 + D \dot{\beta}_1 - (C + B_1) \dot{\phi} \dot{\alpha}_1 = \\ & = - \left(A + \frac{1}{2} B_1 \right) \dot{\omega}_\eta + (C + B_1 - J_1) \dot{\phi} \dot{\omega}_\xi. \end{aligned} \quad (1.44)$$

Для установившегося режима движения корпуса и гироскопа, опуская малые моменты демпфирования $D \dot{\alpha}_1$ и $D \dot{\beta}_1$, получаем из (1.44)

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_1 &= - \left(1 - \frac{J_1}{C + B_1} \right) \dot{\omega}_\xi, \\ \dot{\beta}_1 &= - \left(1 - \frac{J_1}{C + B_1} \right) \dot{\omega}_\eta. \end{aligned} \quad (1.45)$$

Введем обозначение

$$1 - \frac{J_1}{C + B_1} = i \quad (1.46)$$

и проинтегрируем (1.45) по времени. Тогда с точностью до постоянных интегрирования получаем

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -i \int \dot{\omega}_\xi dt, \\ \beta_1 &= -i \int \dot{\omega}_\eta dt. \end{aligned} \quad (1.47)$$

Таким образом, динамически настроенный вибрационный гироскоп при отсутствии демпфирования работает в режиме интегрирующего гироскопа с передаточным числом i , определяемым выражением (1.46).

Если $i = 1$, то из (1.47) следует, что углы α_1 , β_1 поворота гироскопа относительно корпуса равны и направлены противоположно соответствующим углам поворота корпуса. В этом случае ДНГ превращается в свободный гироскоп, ось ротора которого в среднем сохраняет неизменное направление в абсолютном пространстве.

Однако при этом из (1.46) следует, что должно быть выполнено условие $J_1 = 0$, или

$$C_1 = A_1 + B_1,$$

и условие настройки (1.43) выполняется лишь при $k = 0$, т. е. только в случае гироскопа с идеальными неупругими опорами. Следовательно, гироскоп с внутренним упругим кардановым подвесом с теоретической точки зрения нельзя считать свободным гироскопом.

Тем не менее, работая в режиме интегрирующего гироскопа, ДНГ играет роль двухосного датчика положения платформы, на которую он установлен, что позволяет применять этот прибор в гиросtabilизаторе. Указанный режим близок к режиму свободного ги-

роскопа, поскольку передаточное число i практически очень близко к единице, как следует из (1.46) в связи с тем, что момент инерции C ротора гироскопа обычно более чем на два порядка больше разностного момента инерции кольца J_1 , т. е. $J_1/C \ll 1$.

1.4. Устойчивость на неподвижном основании

При работе гиросtabilизатора на ДНГ могут возникнуть случаи, когда при включенном гироскопе система стабилизации оказывается выключенной, а платформа — неподвижной (например, при запуске или настройке). Это требует отдельного рассмотрения устойчивости движения ДНГ при неподвижном основании. Для этого воспользуемся уравнениями (1.40), положив в них $\omega_n = \omega_\xi = 0$;

$M_\xi^n = M_n^n = 0$, и с учетом (1.41) введем обозначения

$$\begin{aligned} \left(A + \frac{1}{2}B_1\right) &= A_r; \quad (C + B_1)\dot{\phi} = H; \\ k - J_1\dot{\phi}^2 &= k_n; \quad D\dot{\phi} + \frac{1}{2}M^n = k_d. \end{aligned} \quad (1.48)$$

Тогда из (1.40) получаем

$$\begin{aligned} A_r\ddot{\alpha}_1 + D\dot{\alpha}_1 + H\dot{\beta}_1 + k_n\alpha_1 + k_d\beta_1 &= 0; \\ A_r\dot{\beta}_1 + D\beta_1 - H\dot{\alpha}_1 + k_n\beta_1 - k_d\alpha_1 &= 0. \end{aligned} \quad (1.49)$$

Исключив из (1.49) координату β_1 , эти выражения можно представить в следующем виде:

$$a_0\ddot{\alpha}_1 + a_1\dot{\alpha}_1 + a_2\ddot{\alpha}_1 + a_3\dot{\alpha}_1 + a_4 = 0, \quad (1.50)$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= A_r^2; \quad a_1 = 2A_rD; \quad a_2 = (H^2 + D^2 + 2A_rk_n); \\ a_3 &= 2(Hk_d + Dk_n); \quad a_4 = (k_d^2 + k_n^2). \end{aligned} \quad (1.51)$$

Условия устойчивости по Гурвицу

$$a_j > 0; \quad j = 1, 2, 3, 4, \quad (1.52)$$

$$a_1a_2a_3 - a_0a_3^2 - a_1^2a_4 > 0. \quad (1.53)$$

Подставляя выражения (1.51) в (1.52) и (1.53), получаем следующие условия устойчивости движения ДНГ:

$$\begin{aligned} D &> 0; \\ H^2 + D^2 &> -2A_rk_n; \\ Hk_d &> -Dk_n; \\ D(H^2 + D^2 + 2A_rk_n)(Hk_d + Dk_n) &> \\ &> A_r[(Hk_d + Dk_n)^2 + D^2(k_n^2 + k_d^2)]. \end{aligned} \quad (1.54)$$

Первое условие устойчивости (1.54) всегда выполняется, так как в ДНГ имеется демпфирование (хоть и небольшое) как вследствие внутреннего трения в материале подвеса, так и из-за газодинамических моментов.

Второе условие (1.54) также всегда выполняется, так как в динамически настроенном гироскопе с достаточной точностью справедливо соотношение (1.43), т. е.

$$k_n = k - J_1\dot{\phi}^2 \approx 0.$$

В реальных гироскопах условие (1.43), конечно, не может быть выполнено точно, и упругие моменты имеют место, но они обычно невелики. Поэтому второе неравенство (1.54) все равно выполняется с большим запасом, так как в левой его части стоит большая величина H , составляющая сотни сН·см·с. При этом знак нескомпенсированной жесткости k_n не оказывает большого влияния на устойчивость.

С учетом того, что $D\dot{\phi} \gg \frac{1}{2}M^n$, поскольку демпфирование в ДНГ в основном определяется нормальными силами газодинамического давления [9], то из (1.48) следует

$$k_d = D\dot{\phi}. \quad (1.55)$$

Тогда третье неравенство (1.54) может быть представлено в виде

$$H\dot{\phi} > -k_n.$$

Даже при крайнем значении величины $k_n = -J_1 \dot{\phi}^2$, получим,

$$C + B_1 > J_1, \quad (1.56)$$

что удовлетворяется для ДНГ практически с большим запасом.

Если условие динамической настройки (1.43) выполнено, т. е. $k_n = 0$, то последнее четвертое неравенство (1.54) приобретает вид

$$DH > A_r k_d,$$

или, учитывая (1.48),

$$H > A_r \dot{\phi},$$

откуда

$$\frac{C + B_1}{A + \frac{1}{2} B_1} > 1. \quad (1.57)$$

Неравенство (1.57) практически соответствует условию устойчивости сферического гироскопа [2].

В случае, когда динамическая настройка проведена, но недостаточно точно, т. е. $k_n \neq 0$, то, пренебрегая в левой части последнего неравенства (1.54) только малой величиной D^2 по сравнению с H^2 , получаем после преобразований и учета крайнего значения для величины k_n

$$(C + B_1) \left(\frac{C + B_1}{A + \frac{1}{2} B_1} - 1 \right) > J_1, \quad (1.58)$$

которое заведомо выполняется при условии выполнения соотношения (1.57). Следовательно, учет неточности динамической настройки практически не изменяет условие устойчивости (1.57).

1.5. Структурная схема. Передаточная функция по моменту

Запишем уравнения движения ДНГ (1.40) в операторной форме для случая неподвижного основания ($\omega^{\text{пер}} = 0$) и с учетом обозначений (1.48):

$$\begin{aligned} A_r s^2 \alpha_1 + Ds \alpha_1 + Hs \beta_1 + k_n \alpha_1 + k_d \beta_1 &= M_\xi^B; \\ A_r s^2 \beta_1 + Ds \beta_1 - Hs \alpha_1 + k_n \beta_1 - k_d \alpha_1 &= M_\eta^B. \end{aligned} \quad (1.59)$$

Если положить, что условие динамической настройки выполнено, т. е. $k_n = 0$, и пренебречь демпфированием, т. е. $k_d = 0$, эти уравнения по форме совпадут с уравнениями трехстепенного свободно-го гироскопа:

$$\begin{aligned} A_r s^2 \alpha_1 + Ds \alpha_1 + Hs \beta_1 &= M_\xi^B; \\ A_r s^2 \beta_1 + Ds \beta_1 - Hs \alpha_1 &= M_\eta^B. \end{aligned} \quad (1.60)$$

Структурная схема ДНГ для этого случая представлена на рис. 1.10. Она соответствует многомерной системе автоматического регулирования с двумя входами M_ξ^B , M_η^B и двумя выходами α_1 , β_1 . Передаточная функция ДНГ $\Phi_r(s)$ по одному из выходов (α_1) относительно входа — момента M_ξ^B , действующего по той же оси, имеет вид

$$\Phi_r(s) = \frac{\alpha_1}{M_\xi^B} = \frac{W(s)}{1 + W(s)W_{oc}(s)}, \quad (1.61)$$

где

$$W(s) = \frac{1}{A_r s^2 + Ds}, \quad W_{oc}(s) = \frac{(Hs)^2}{A_r s^2 + Ds}. \quad (1.62)$$

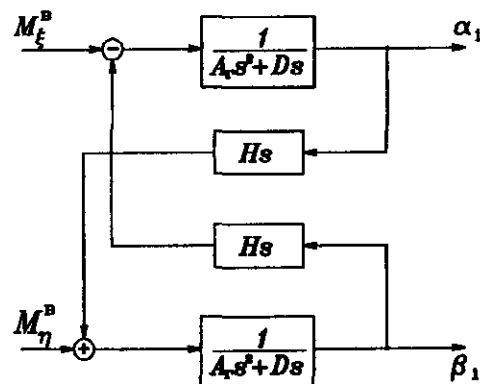


Рис. 1.10. Структурная схема ДНГ ($k_n = 0$; $k_d = 0$)

Подставляя (1.62) в (1.61), получаем

$$\Phi_r(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{A_r s + D}{A_r^2 s^2 + A_r D s + (H^2 + D^2)} \quad (1.63)$$

Пренебрегая D^2 по сравнению с H^2 в знаменателе, можно представить $\Phi_r(s)$ в следующем виде:

$$\Phi_r(s) = \frac{K_1}{s} \cdot \frac{T_n s + 1}{T_n^2 s^2 + 2\xi_n T_n s + 1} \quad (1.64)$$

Здесь

$$K_1 = \frac{D}{H^2}; \quad T_n = \frac{A_r}{D} \quad (1.65)$$

$T_n = \frac{A_r}{H} = \frac{1}{\omega_n}$ (ω_n — круговая частота нутационных колебаний);

$\xi_n = \frac{D}{H}$ — относительный коэффициент затухания нутационных колебаний. Причем, в связи с малостью величины D по сравнению с H , $T_n \ll T_a$.

Вид логарифмической амплитудно-частотной характеристики, соответствующей (1.64), представлен на рис. 1.11.

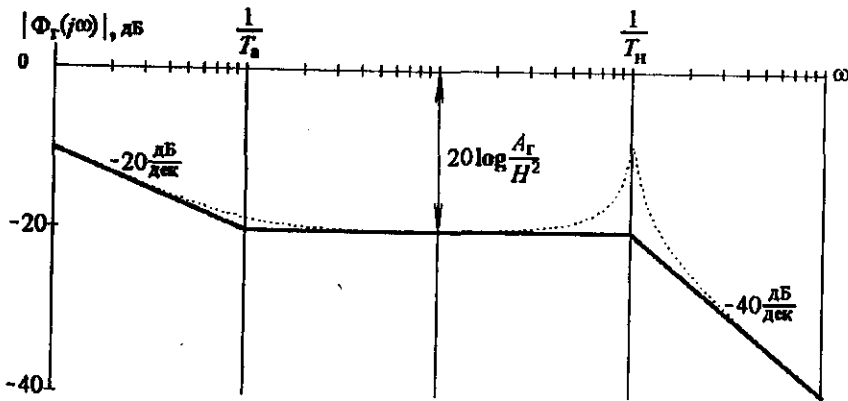


Рис. 1.11. Логарифмическая АЧХ ДНГ ($k_n = 0$; $k_d = 0$)

Особенностью этой характеристики является резкий и значительный подъем в зоне частоты нутационных колебаний, определяющий существенную возмущаемость ДНГ, так же как и трехстепенного свободного гироскопа, при действии моментов на нутационной частоте.

Если считать гироскоп динамически настроенным, но демпфированием не пренебрегать ($k_d \neq 0$), то в более общем виде уравнения ДНГ примут следующий вид:

$$\begin{aligned} A_r s^2 \alpha_1 + D s \alpha_1 + H s \beta_1 + k_d \beta_1 &= M_{\xi}^p; \\ A_r s^2 \beta_1 + D s \beta_1 - H s \alpha_1 - k_d \alpha_1 &= M_{\eta}^p. \end{aligned} \quad (1.66)$$

Соответствующая структурная схема представлена на рис. 1.12.

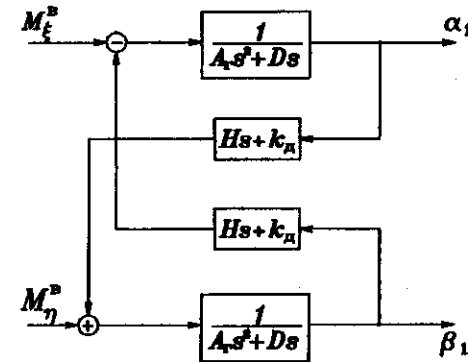


Рис. 1.12. Структурная схема ДНГ ($k_n = 0$; $k_d \neq 0$)

Передаточная функция по α_1 относительно M_{ξ}^p :

$$\Phi_r(s) = \frac{A_r s^2 + D s}{A_r^2 s^4 + 2 A_r D s^3 + (H^2 + D^2) s^2 + 2 H k_d s + k_d^2}$$

По-прежнему пренебрегая D^2 по сравнению с H^2 , представим выражение для передаточной функции в виде

$$\Phi_r(s) = \frac{D}{k_d^2} \cdot \frac{s(T_n s + 1)}{(T_n^2 s^2 + 2\xi_n T_n s + 1)(T^2 s^2 + 2\xi T s + 1)} \quad (1.67)$$

где введенные постоянные времени и коэффициенты определяются следующими приближенными выражениями:

$$T_n = \frac{A_r}{H}; \quad \xi_n = \frac{D}{H}; \quad T = \frac{H}{k_n}; \quad \xi = 1, \quad T_a = \frac{A_r}{D},$$

где $T_n \ll T_a$, а также $T_n \ll T$. Вид ЛАХ, соответствующей (1.71), представлен на рис. 1.13.

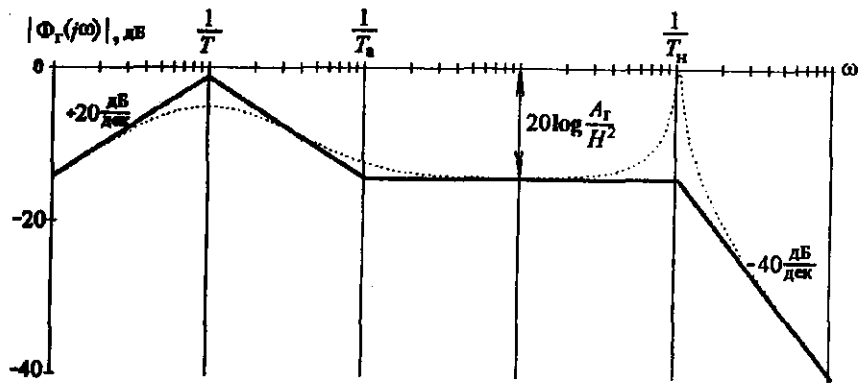


Рис. 1.13. Логарифмическая АЧХ ДНГ ($k_n = 0; k_n \neq 0$)

Наконец, для случая неточного выполнения условия динамической настройки имеем уравнения ДНГ в еще более общем виде, которые получаются из (1.40) при $k_n \neq 0, k_n \neq 0$,

$$\begin{aligned} A_r s^2 \alpha_1 + D s \alpha_1 + H s \beta_1 + k_n \alpha_1 + k_n \beta_1 &= M_\xi^B; \\ A_r s^2 \beta_1 + D s \beta_1 - H s \alpha_1 + k_n \beta_1 - k_n \alpha_1 &= M_n^B. \end{aligned} \quad (1.68)$$

Структурная схема, соответствующая (1.68), дана на рис. 1.14.

Передаточная функция по α_1 относительно момента M_ξ^B имеет вид

$$\Phi_r(s) = \frac{A_r s^2 + D s + k_n}{A_r^2 s^4 + 2 A_r D s^3 + (H^2 + D^2 + 2 A_r k_n) s^2 + (2 H k_n + 2 D k_n) s + (k_n^2 + k_n^2)}$$

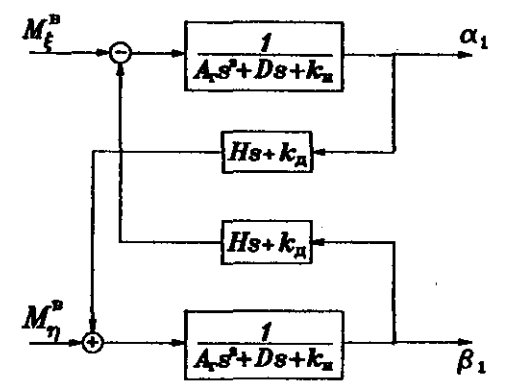


Рис. 1.14. Структурная схема ДНГ ($k_n \neq 0; k_n \neq 0$)

С учетом малости коэффициентов k_n и D последнее соотношение можно представить в виде

$$\Phi_r(s) = \frac{A_r s^2 + D s + k_n}{A_r^2 s^4 + 2 A_r D s^3 + H^2 s^2 + 2 H k_n s + (k_n^2 + k_n^2)}$$

или

$$\Phi_r(s) = \frac{k_n}{k_n^2 + k_n^2} \cdot \frac{T_n^2 s^2 + 2 \xi_n T_n s + 1}{(T_n^2 s^2 + 2 \xi_n T_n s + 1)(T^2 s^2 + 2 \xi T s + 1)} \quad (1.69)$$

Для постоянных времени и коэффициентов затухания имеем приближенные выражения:

$$T_n = \frac{A_r}{H}; \quad \xi_n = \frac{D}{H}; \quad T = \frac{H}{\sqrt{k_n^2 + k_n^2}}; \quad \xi = \frac{k_n}{\sqrt{k_n^2 + k_n^2}};$$

$$T_a = \sqrt{\frac{A_r}{k_n}}, \quad T_n < T_a < T.$$

Следует отметить, что величина k_n зависит от качества динамической настройки и может быть как положительной, так и отрицательной.

Вид ЛАХ, соответствующий (1.69) для $k_n < 0$, представлен на рис. 1.15.

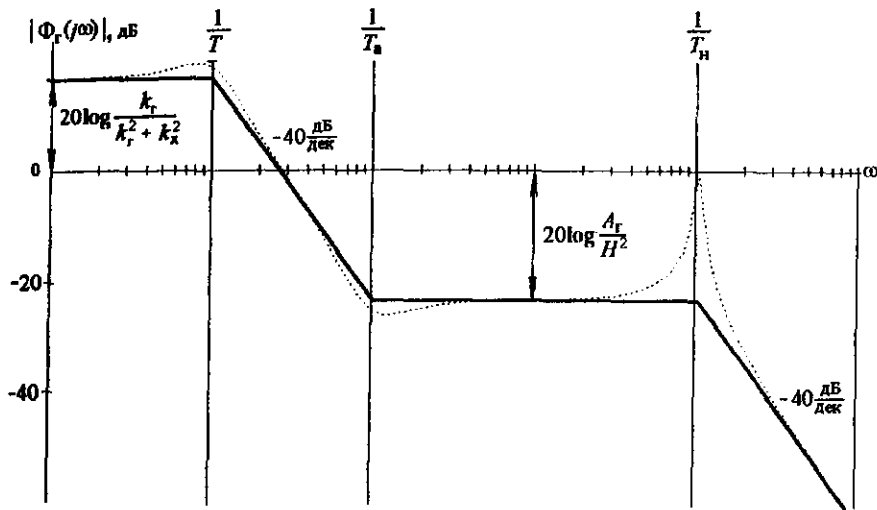


Рис. 1.15. Логарифмическая АЧХ ДНГ ($k_n \neq 0$; $k_d \neq 0$)

Сравнивая графики на рис. 1.11, 1.13, 1.15, можно заметить, что они различаются только на инфранизких частотах, меньших $\frac{1}{T_a} = \frac{D}{A_r}$. В зависимости от точности динамической настройки и

влияния демпфирования поведение ДНГ на неподвижном основании под воздействием инфранизкочастотных возмущающих моментов будет различным. Следует также отметить, что такие параметры гироскопа, как D , k_n , k_d , определяющие низкочастотную часть ЛАХ, очень нестабильны. Они сильно зависят от температуры, времени работы прибора, при этом коэффициент k_n , характеризующий точность динамической настройки, может в одном и том же приборе в течение срока службы даже изменить знак, а низкочастотная часть ЛАХ не только может сильно деформироваться, но и изменять свой вид. Поэтому полученные графики можно использовать для получения только общего качественного представления о поведении ДНГ под воздействием инфранизкочастотных моментов.

Средне- и высокочастотная ЛАХ на всех графиках одинаковы и не зависят от параметров k_d и k_n . Они отличаются наличием острого

резонансного пика на нутационной частоте $\frac{1}{T_n} = \frac{H}{A_r}$, составляющей

обычно сотни герц, что говорит о значительной возмущаемости ДНГ (так же как и трехстепенного свободного гироскопа) при воздействии внешних моментов на этой частоте. Поэтому рекомендуется принимать меры по снижению возмущающих моментов, воздействующих на ДНГ на нутационной и близких к ней частотах.

Тем не менее, в выходном сигнале ДНГ, определяемом углами α_1 и β_1 , всегда имеется составляющая, изменяющаяся с нутационной частотой. Кроме того, необходимо указать на наличие в выходном сигнале ДНГ составляющих, изменяющихся с частотой вращения ротора $\dot{\phi}$ и удвоенной частотой вращения ротора $2\dot{\phi}$, которые были опущены нами при выводе уравнений движения ДНГ. Указанные обстоятельства следует учитывать при проектировании гиросtabilизатора на ДНГ.

1.6. Уравнения движения и передаточная функция ДНГ в комплексной форме

Пусть в системе координат связанной с корпусом, как показано на рис. 1.16, действуют инерционные $A(\ddot{\alpha} + \dot{\omega}_\xi)$, $A(\ddot{\beta} + \dot{\omega}_\eta)$, гироскопические $H(\dot{\alpha} + \omega_\xi)$, $H(\dot{\beta} + \omega_\eta)$ и моменты обратной связи $KW\alpha$, $KW\beta$, направленные таким образом, чтобы заставить ротор ДНГ прецессировать в сторону уменьшения углов его отклонения относительно корпуса α и β . Уравнения движения гироскопа, при этом, имеют вид

$$\begin{aligned} A(\ddot{\alpha} + \dot{\omega}_\xi) + H(\dot{\beta} + \omega_\eta) + KW\beta &= M_\xi; \\ A(\ddot{\beta} + \dot{\omega}_\eta) - H(\dot{\alpha} + \omega_\xi) - KW\alpha &= M_\eta, \end{aligned} \quad (1.70)$$

где ω_ξ , ω_η и M_ξ , M_η – компоненты абсолютных угловых скоростей корпуса и возмущающих моментов.

Преобразуя по Лапласу уравнения (1.70) и складывая их, предварительно умножив второе уравнение на комплексную единицу $j = \sqrt{-1}$, получим передаточную функцию ДНГ по углу отклонения ротора в комплексной форме

$$\theta(s) = \frac{-(As - jH)\omega(s)}{As^2 - j(Hs + KW(s))} + \frac{M(s)}{As^2 - j(Hs + KW(s))} \quad (1.71)$$

где $\theta = \alpha + j\beta$, $\omega = \omega_\xi + j\omega_\eta$, $M = M_\xi + jM_\eta$.

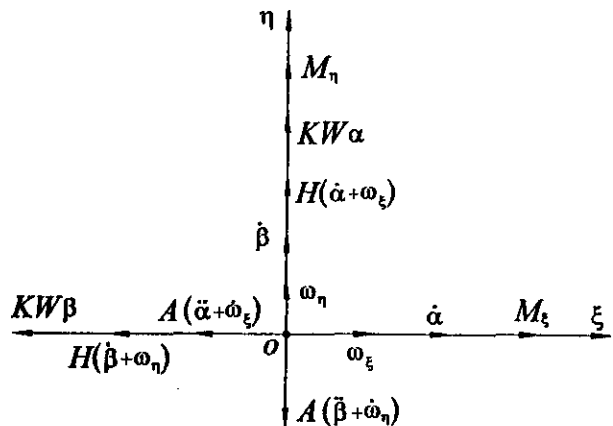


Рис. 1.16. К выводу уравнений движения ДНГ в комплексной форме

Отсюда следует, что скорость разворота ротора относительно корпуса равна

$$\dot{\theta}(s) = s\theta(s) = \frac{-(As - jH)\omega(s)}{As - jH\left(1 + \frac{KW(s)}{Hs}\right)} + \frac{M(s)}{As - jH\left(1 + \frac{KW(s)}{Hs}\right)} \quad (1.72)$$

В частности, при отсутствии обратной связи, из (1.72) получаем известные соотношения

$$\dot{\theta}(s) = -\omega(s) + \frac{M(s)}{As - jH} = -\omega(s) + j \frac{M(s)}{H} \frac{1}{1 + j \frac{s}{\omega_n}} \quad (1.73)$$

где $\omega_n = \frac{H}{A} = \frac{C}{A} \Omega$ — нутационная частота.

Токи обратной связи протекающие по катушкам моментных датчиков формируются следующим образом:

$$J_\xi(s) = K_{\text{дв}} K_J W(s) \alpha(s); \quad J_\eta(s) = K_{\text{дв}} K_J W(s) \beta(s),$$

или в комплексной форме

$$J(s) = J_\xi(s) + jJ_\eta(s) = K_{\text{дв}} K_J W(s) \theta(s),$$

где K_J — масштабный коэффициент моментного датчика гироскопа по скорости управления; $K_{\text{дв}}$ — крутизна датчика угла.

Измеряемые значения угловых скоростей записываются в виде

$$\omega_{\text{изм}}(s) = -\frac{K_M K_{\text{дв}} K_J W(s)}{H} \theta(s) = -\frac{KW(s)}{H} \theta(s), \quad (1.74)$$

где K_M — масштабный коэффициент моментного датчика по величине развиваемого момента, $K = K_M K_{\text{дв}} K_J$ — крутизна контура обратной связи.

Подставляя (1.71) в (1.74) и пренебрегая возмущающими моментами получим передаточную функцию ДНГ по измеряемой скорости

$$\omega_{\text{изм}}(s) = \frac{(s - j\omega_n) \frac{KW(s)}{Hs}}{s - j\omega_n \left(1 + \frac{KW(s)}{Hs}\right)} \omega(s) \quad (1.75)$$

2. КОНСТРУКЦИИ ДНГ

2.1. Конструкция ГВК-3

Основными элементами ГВК-3 являются (рис. 2.1): ротор гироскопа, карданов подвес с упругими торсионами 6 и элементами регулировки 8 и 9, датчик угла 1, датчик момента, состоящий из статора 4, магнита 5 и магнитопровода 3, симметрично расположенный привод обращенного типа, шарикоподшипниковые опоры 2, кольцо карданова подвеса 7 и герметизированный корпус.

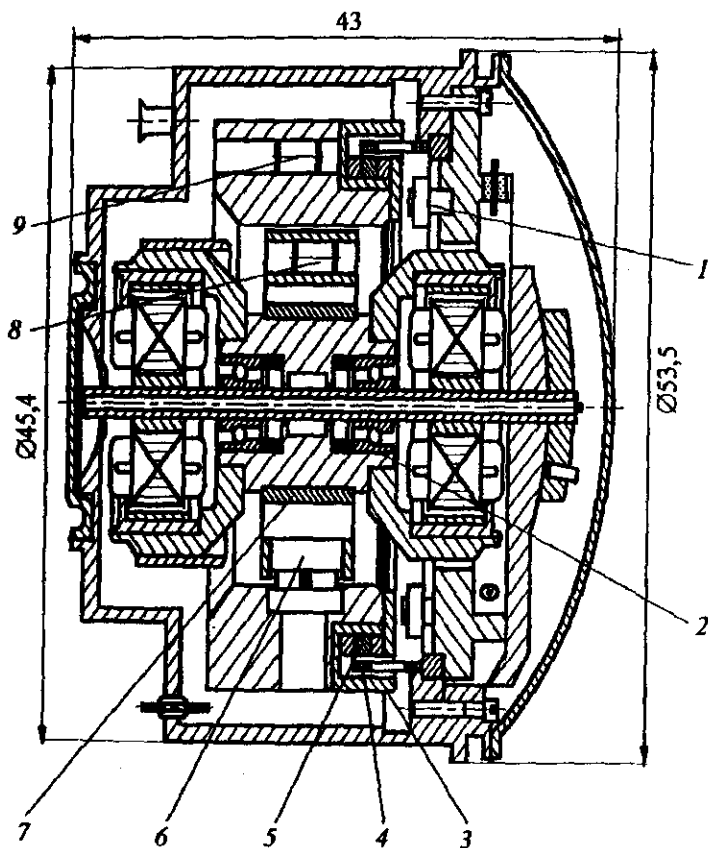


Рис. 2.1. Конструкция ГВК-3

В качестве двигателя применен синхронный гистерезисный двигатель, питание которого осуществляется от статического преобразователя, имеющего высокую стабильность частоты. Двухфазное напряжение питания, имеющее форму прямоугольных импульсов, равно ± 20 В на форсаже (в течение 1 мин при разгоне) и 11,7 В в рабочем режиме с частотой 375 Гц. В гиросtabilизаторе, использующем два ГВК-3, с целью исключения взаимовлияния вибраций для питания второго гироскопа используется частота 375,5 Гц.

В качестве шарикоподшипниковых опор используют радиально-упорные шарикоподшипники. Наружные кольца, вращающиеся вместе с ротором, фиксируются пружинными шайбами, обеспечивающими требуемый натяг, равный 10 Н. При монтаже опоры используют клей ВК9. Стяжка корпусных крышек обеспечивает стабильность осевого натяга.

В первых образцах ГВК-3 в качестве упругих торсионов применялась сборная конструкция: два упругих элемента П-образной формы фиксировались с помощью лазерной сварки или клея. Вследствие погрешностей установки элементов, влияния температуры окружающей среды и т. д. имели место значительные технологические погрешности — неперпендикулярность плоскостей упругих элементов, несовпадение осей опоры и карданова подвеса, неперпендикулярность и непересечение осей подвеса и др. Все это приводило к смещению центров масс кольца и ротора, появлению дополнительных начальных упругих моментов и других возмущающих моментов, которые увеличивали дрейф гироскопа.

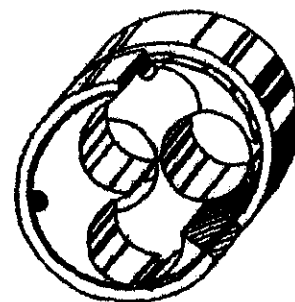


Рис. 2.2. Общий вид монолитной опоры

В настоящее время используется монолитная опора (рис. 2.2), элементы которой также работают на изгиб. Упругие элементы изготавливают путем сверления в заготовке (с последующей доводкой) двух пар отверстий, у которых линии, соединяющие центры каждой пары отверстий, взаимно перпендикулярны. Такая конструкция достаточно технологична и позволяет выполнить жесткие требования по ее геометрии. Несущая способность опоры 60...80 Н.

Угловая жесткость упругого элемента равна $0,02 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$ ($200 \text{ г}\cdot\text{см}/\text{рад}$). Опоры клеивают в кольцо и ротор с зазором $0,01 \dots 0,02 \text{ мм}$.

Датчик угла (ДУ) индуктивного трансформаторного типа с опорной частотой 48 кГц состоит из двух диаметрально расположенных измерительных узлов, включенных по дифференциальной схеме. При отклонении ротора на выходе ДУ появляется сигнал, пропорциональный углу поворота. Магнитопровод ДУ выполнен из феррита.

Датчик момента (ДМ) — магнитоэлектрического типа, при протекании тока в катушке ДМ возникает сила F взаимодействия магнитных полей постоянных магнитов 5 ротора и катушки 4 (см. рис. 2.1). Компенсацию неортогональности осей X и Y моментного датчика осуществляют с помощью дополнительной обмотки. Поэтому статор 4 ДМ содержит помимо двух основных еще одну дополнительную обмотку.

Основные технические характеристики прибора

Габариты	$\text{Ø}52 \times 42$
Вес	3 Н
Кинетический момент	280 сН·см·с (г·см·с)
Угловая жесткость карданова подвеса	100 сН·см/рад
Постоянная времени	$T = 200 \text{ с}$
Частота вращения вала привода	187,5 Гц
(угловая скорость)	$2\pi \cdot 187,5 = 1178 \text{ с}^{-1}$
Потребляемая мощность в рабочем режиме	2 Вт
Нутационная частота	344 Гц
Частота питания	375 Гц
Крутизна ДУ	2,5 мВ/угл. мин
Крутизна ДМ по моменту	0,25 Н·м/мА (2,5 г·см/мА)
Крутизна ДМ по скорости управления	18 (°/ч)/мА
Максимальная угловая скорость управления гироскопом	300 °/ч
Нелинейность крутизны ДМ в диапазоне угловых скоростей управления ± 60 °/ч	не более 0,1 %
Постоянная составляющая ССП, не зависящая от g	< 3 °/ч
Постоянные составляющие ССП, зависящие от g :	
от смещения центра масс вдоль оси вращения	< 1 (°/ч)/ g
от «квадратурного» момента	< 5 (°/ч)/ g

Постоянные составляющие ССП, зависящие от g^2	0,15 (°/ч)/ g^2
Температурная чувствительность ССП	0,01 (°/ч)/°С
Случайная составляющая ССП	< 0,2 °/ч

2.2. Конструкция ГВК-6

На рис. 2.3 показана конструкция ГВК-6. Ротор 1 вращается синхронным гистерезисным двигателем, состоящим из статора 15 и ротора 16. В качестве опоры используют совмещенную шарикоподшипниковую опору 17. Для обеспечения предварительного натяга 10 Н до полимеризации клея между наружными кольцами устанавливают пружину 21. Для фиксации опоры используют клей ВК9. Подвод питания к элементам гироскопа и передачу сигналов осуществляют через гермовводы 11.

Внутренний объем гироскопа заполнен водородом при давлении 20 мм рт. ст. и загерметизирован с помощью винта 6. Для повышения стабильности его параметров гироскоп термостатируют с помощью нагревателей 10 и 14. Рабочая температура гироскопа, контролируемая термодатчиком 12, равна $+75$ °С.

Статическая и динамическая балансировка ротора гироскопа 1 обеспечивается винтами 3 и 8, а динамическая балансировка всей вращающейся части гироскопа — винтами 20 и высверливанием материала упругого упора 5. Для динамической настройки гироскопа используют винты 7, установленные в кольцах карданова подвеса.

Двухкольцевой упругий карданов подвес 4 изготавливают из одного куска металла с высокими упругими свойствами. К нему предъявляют очень жесткие требования по точности изготовления и выставке. Угловая жесткость упругого подвеса равна $0,02 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$ ($200 \text{ г}\cdot\text{см}/\text{рад}$). Ротор имеет упругий упор 5, ограничивающий угловые отклонения ротора в пределах ± 30 угл.мин. Зазор $0,01 \dots 0,02 \text{ мм}$ между посадочным отверстием в шарикоподшипнике и хвостовиком карданова подвеса 18 заполняется клеем ВК-9. Фиксация карданова узла в шарикоподшипниковой опоре осуществляется стопорной гайкой 19.

Датчик угла состоит из четырех измерительных элементов 22 (статоры) и магнитомягкого кольца 23 (ротор) индуктивного типа, попарно включенных по мостовой схеме. При отклонении ротора изменяется индуктивность диаметрально противоположных изме-

рительных элементов (при уменьшении зазора индуктивность увеличивается, а при увеличении — уменьшается) и на выходе ДУ появляется сигнал, пропорциональный углу поворота ротора гироскопа.

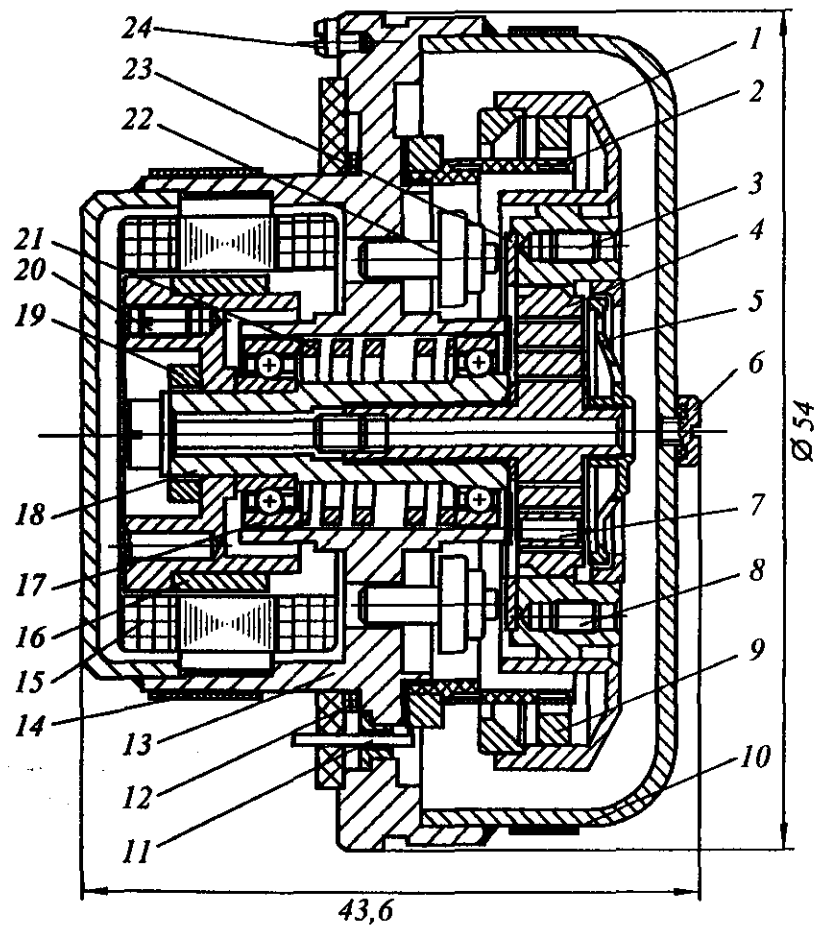


Рис. 2.3. Конструкция ГВК-6

Датчик момента — магнитоэлектрического типа. При протекании тока в катушке ДМ возникает сила F взаимодействия магнитных полей постоянного магнита 9, установленного в магнитопроводе 1, и катушки 2. Компенсацию неортогональности осей X и Y моментного датчика осуществляют с помощью дополнительной обмотки.

Для точной выставки корпуса 13 гироскопа вокруг оси Z (ось вращения двигателя) на платформе гиросtabilизатора используют юстировочный эксцентрик 24.

Основные технические характеристики прибора

Питание двигателя: двухфазное напряжение прямоугольной формы частотой $480 \pm 0,096$ Гц:

в форсажном режиме $18 \pm 2,7$ В
в рабочем режиме 10 ± 1 В

Потребляемая мощность:
в форсажном режиме 20 ВА
в рабочем режиме 3 ВА

Датчики момента:

крутизна характеристики основного ДМ 95 ± 20 ($^{\circ}/ч$)/мА
компенсационного ДМ 30 ± 6 ($^{\circ}/ч$)/мА
нестабильность крутизны основного ДМ $\pm 0,05$ %
компенсационного ДМ $\pm 0,5$ %
нелинейность крутизны $\pm 0,05$ %

Датчик угла:

крутизна характеристики $4,7 \pm 0,7$ мВ
нулевой сигнал 1 мВ
фазовый сдвиг выходного сигнала ДУ $\leq \pm 30^{\circ}$

модуляция сигналов ДУ на частотах 240 Гц и 480 Гц ≤ 6 угл. с
питание $\sim 2,5 \pm 0,125$ В,
 $19200 \pm 19,2$ Гц
 ≤ 70 мА

потребляемый ток

Система обогрева потребляет 70 ВА и имеет:

две обмотки термодатчика с общим сопротивлением 758 Ом,
два нагревательных элемента с общим сопротивлением 200 Ом,
нагревательные элементы питаются напряжением 115 В частотой 400 Гц.

Технические характеристики ГВК-6

Систематическая составляющая скорости дрейфа 3 $^{\circ}/ч$
Случайная составляющая скорости дрейфа
в вертикальном положении $0,02$ $^{\circ}/ч$
в курсовом положении $0,056$ $^{\circ}/ч$

Изменение систематической составляющей скорости дрейфа от запуска к запуску, не более:	
в вертикальном положении	0,02 °/ч
в курсовом положении	0,05 °/ч
Систематическая составляющая скорости дрейфа, пропорциональная квадрату ускорения:	
на частотах ≤ 100 Гц	$\leq 0,03$ (°/ч)/g ²
> 100 Гц	$\leq 0,05$ (°/ч)/g ²
Квадратурная составляющая скорости дрейфа	$\leq 5 \pm 0,5$ °/ч
Среднеквадратичное значение переменной составляющей скорости дрейфа:	
в вертикальном положении	$\leq 0,018$ °/ч
в курсовом положении	$\leq 0,075$ °/ч
Температурный коэффициент скорости дрейфа при температуре окружающей среды от +60 °С до +70 °С и изменении температуры термостатирования на 1°С	$\leq 0,03$ (°/ч)/°С
Резонансная частота питания гироблока	480 ± 0,3 Гц
Максимальный угол отклонения ротора до упора	< 30 угл. мин
Время готовности	10 мин
Время непрерывной работы	≤ 8 ч
Срок службы	500 ч
Габариты	∅54×44 мм
Масса	≤ 390 г
Стоимость	5 т.р. (1983 г.)

2.3. Конструкция ГВК-16

Конструкция ГВК-16 представлена на рис. 2.4. Принцип его работы и основные конструктивные элементы идентичны гироскопу ГВК-6. Основное назначение гироскопа — датчик угловой скорости для БИНС и систем угловой стабилизации. Габариты его, как это видно из рис. 2.4, существенно меньше габаритов ГВК-6 и ГВК-3. Он отличается от предыдущих большей измеряемой угловой скоростью (до 300 град/с), что достигается малым кинетическим момен-

том гироскопа (≈ 15 сН·см·с), применением высококоэрцитивного материала (сплава SmCo) магнита моментного датчика, использованием двух магнитных колец 5 для включения в работу обеих сторон катушек ДМ 2, большим числом витков обмотки ДМ.

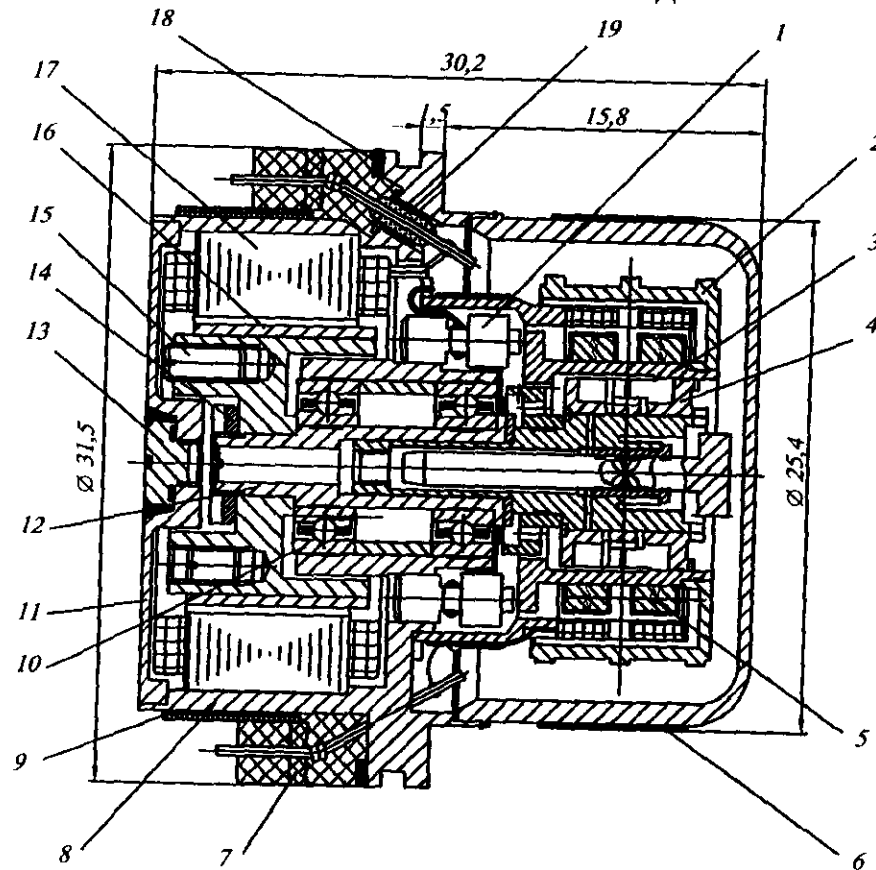


Рис. 2.4. Конструкция ГВК-16

Внутренний объем гироскопа заполнен гелием при давлении 5 мм рт. ст. и загерметизирован с помощью винта 13. Для повышения стабильности его параметров путем алгоритмической компенсации погрешностей контролируется его температура с помощью термодатчика 18.

Статическая и динамическая балансировка ротора гироскопа 2 обеспечивается удалением материала ротора с поясков. Для динамической настройки гироскопа используется центральный винт, установленный в кольце карданова подвеса.

Однокольцевой упругий карданов подвес 4 изготавливается из одного куска металла с высокими упругими свойствами и к нему предъявляются очень жесткие требования по точности изготовления и выставке. Угловая жесткость упругого подвеса 0,01 Н·м/рад (100 г·см/рад).

Основные технические характеристики прибора

Питание двигателя (двухфазное напряжение прямоугольной формы частотой 360 Гц):

в форсажном режиме	14 В
в рабочем режиме	11 В

Датчики момента:

крутизна характеристики основного ДМ	500 (°/с)/А
--------------------------------------	-------------

Датчик угла:

крутизна	2,5 мВ/угл. мин
питание	~2,5 В, 19200 Гц

Система обогрева использует напряжение 115 В частотой 400 Гц.

Технические характеристики ГВК-16

Систематическая составляющая скорости дрейфа	15 °/ч
Случайная составляющая скорости дрейфа в вертикальном положении	0,2 °/ч
Квадратурная составляющая скорости дрейфа	≤ 15 °/ч
Составляющая дрейфа от осевого смещения центра масс	≤ 15 °/ч
Температурный коэффициент скорости дрейфа при температуре окружающей среды от +60 °С до +70 °С и изменении температуры термостатирования на 1 °С	≤ 0,03 (°/ч)/°С
Резонансная частота гироблока	460 ± 0,3 Гц
Максимальный угол отклонения ротора до упора	< 20 угл. мин
Время разгона	3 с
Габариты	Ø31,5×30,2 мм
Масса	≤ 70 г

2.4. Конструкция МГ-4

Принцип работы и основные конструктивные элементы гироскопа МГ-4 (рис. 2.5) идентичны гироскопу ГВК-16. Основное назначение прибора — датчик угловой скорости для БИНС и систем угловой стабилизации. Он отличается от предыдущих конструкций большой измеряемой угловой скоростью — до 150 град/с, что достигается малым кинетическим моментом гироскопа (15 сН·см·с), применением высококоэрцитивного материала (сплав SmCo) магнита 5 моментного датчика, большим числом витков обмотки 7.

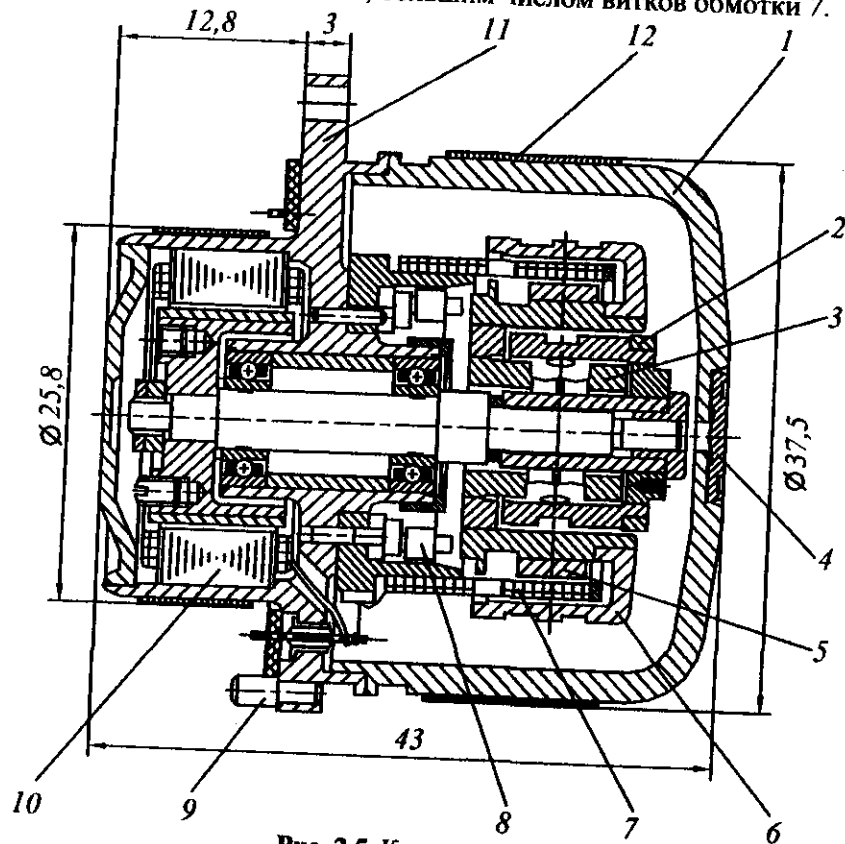


Рис. 2.5. Конструкция МГ-4

Внутренний объем гироскопа заполнен гелием при давлении 45...50 мм рт. ст. Корпус 1 загерметизирован с помощью винта 4.

Для повышения стабильности его параметров путем алгоритмической компенсации погрешностей контролируется его температура с помощью термодатчика, представляющего собой плоскую медную катушку, приклеенную к корпусу 11. Для точной выставки корпуса гироскопа в БИНС используется штифт 9. Втулка 2 обеспечивает ограничение угла отклонения ротора в пределах 20 угл. мин.

Статическая и динамическая балансировка ротора гироскопа 6 обеспечивается удалением материала ротора с поясков. Динамическая настройка гироскопа обеспечивается доводкой угловой жесткости упругого карданова подвеса до величины $120 \text{ сН}\cdot\text{см}/\text{рад} \pm 10 \%$, более высокая точность достигается выбором соответствующей угловой скорости вращения привода.

Однокольцевой упругий карданов подвес 3 изготавливается из одного куска металла с высокими упругими свойствами и к нему предъявляются очень жесткие требования по точности изготовления и выставке.

Основные технические характеристики прибора

Питание двигателя (трехфазное напряжение прямоугольной формы частотой $360 \text{ Гц} \pm 10 \%$):

в форсажном режиме 18 В
в рабочем режиме 10 В

Датчики момента:

крутизна характеристики основного ДМ 500 (°с)/А

Датчик угла:

крутизна 2,8 мВ/угл. мин
питание ~2,5 В, 19200 Гц

Система обогрева использует напряжение 115 В частотой 400 Гц.

Технические характеристики МГ-4

Систематическая составляющая скорости дрейфа < 20 °/ч

Случайная составляющая скорости дрейфа с алгоритмической компенсацией < 0,2 °/ч

Квадратурная составляющая скорости дрейфа ≤ 20 °/ч

Составляющая дрейфа от осевого смещения центра масс ≤ 20 °/ч

Резонансная частота гиросблока $120 \pm 10 \text{ Гц}$

Максимальный угол отклонения ротора до упора < 20 угл. мин

Время разгона

< 3 с

Габариты

∅37,5×43 мм

Масса

≤ 200 г

2.5. Упругие опоры роторных вибрационных гироскопов

На рис. 2.6 представлены основные разновидности упругих кардановых подвесов, наиболее широко используемых в конструкциях динамически настраиваемых вибрационных гироскопов. На рис. 2.6, а изображена схема однокольцевого динамически настраиваемого гироскопа, а на рис. 2.6, б и в — схемы двухкольцевых динамически настраиваемых гироскопов с параллельным и последовательным соединением колец соответственно. Основная причина применения двухкольцевых схем карданова подвеса в ДНГ — это снижение погрешности гироскопа от угловых колебаний корпуса вокруг оси, лежащей в плоскости вращения ротора, на двойной частоте вращения двигателя.

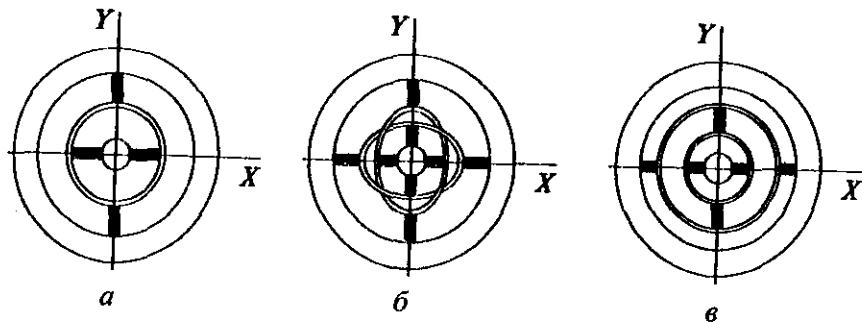


Рис. 2.6. Конструктивные схемы упругих кардановых подвесов

Упругие элементы кардановых подвесов ДНГ и других роторных вибрационных гироскопов обычно бывают двух основных разновидностей (рис. 2.7):

- работающие на изгиб;
- работающие на кручение.

Особенностью упругих элементов карданова подвеса роторных вибрационных гироскопов является их высокая линейная жесткость вдоль трех осей X, Y и Z и высокая угловая жесткость вокруг осей Y

и Z, необходимые для жесткой фиксации положения ротора гироскопа относительно корпуса. Малая угловая жесткость вокруг оси X обеспечивает возможность угловых поворотов ротора гироскопа.

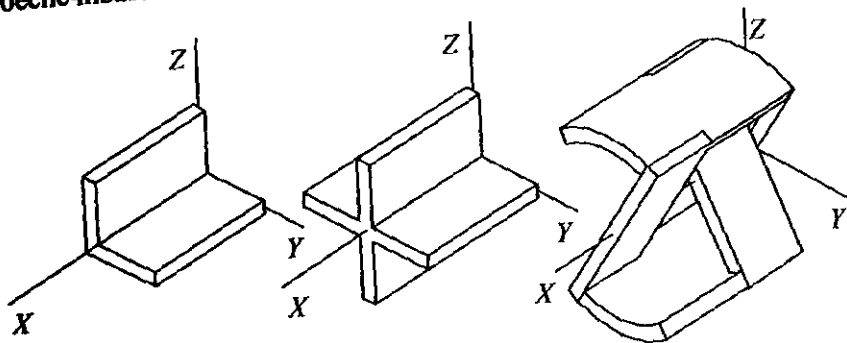


Рис. 2.7. Основные разновидности упругих опор

Опоры карданова подвеса делают либо составными — с жесткой заделкой концевых сечений упругих элементов, либо цельковыми (изготавливают электроэрозионным способом из одного куска материала).

Основные способы соединений упругих элементов в подвесе — клеевое соединение, диффузионная сварка, точечная электросварка и лазерная сварка. Наиболее предпочтительным из этих методов является лазерная сварка, обеспечивающая наиболее жесткое и надежное соединение.

В таблице перечислены материалы, чаще всего используемые для упругих подвесов, и приведены их температурные коэффициенты: линейного расширения (ТКЛР) и модуля упругости (ТКМУ).

Материалы	ТКЛР·10 ⁶	ТКМУ·10 ⁶
36НХТЮ	12–14	200–250
36НХТЮМ5	12–14	200–250
42НХТЮ	9,5–10	10–25
40КХНМ	12–15	200–250
44НХТЮ	8–9	25–30

2.6. Расчет упругого карданова подвеса ДНГ

Для оценки работоспособности подвеса ДНГ в условиях эксплуатации и определения возможности динамической настройки проводят его расчеты на прочность, устойчивость, угловую жесткость вокруг оси наименьшей жесткости, линейную жесткость вдоль трех осей.

2.6.1. Расчет на прочность

Расчет на прочность состоит в определении максимального напряжения действующего в сечении упругого элемента и сравнении полученного напряжения с допустимым для материала значением напряжения. Для обеспечения точностных характеристик гироскопа (а конкретно — уменьшения смещения его центра масс и остаточных напряжений) расчетное напряжение σ не должно превышать допустимого значения

$$\sigma_{\text{доп}} = 0,1 \cdot \sigma_T,$$

где σ_T — предел текучести материала.

Для упругого элемента постоянного сечения напряжения рассчитываются по следующим формулам:

– напряжение от изгиба упругого элемента

$$\sigma_{\text{из}} = \frac{6M}{h\delta^2} = \frac{\alpha_{\text{max}} E \delta}{2L}, \quad (2.1)$$

где M — изгибающий момент; b , δ , L — ширина, толщина и длина упругого элемента; E — модуль упругости первого рода; α_{max} — максимальный угол поворота подвеса;

– напряжение растяжения-сжатия

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{P_{\text{max}}}{h\delta}, \quad (2.2)$$

где P_{max} — максимальная сила, приложенная к упругому элементу и учитывающая все эксплуатационные нагрузки;

– напряжение среза от поперечных сил P_{max} :

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{max}}}{h\delta}, \quad (2.3)$$

— напряжение среза от момента кручения $M_{кр}$:

$$\tau_{ср} = \frac{3M_{кр}}{h\delta^2}. \quad (2.4)$$

Эквивалентное напряжение, определяемое с учетом соотношений (2.1) — (2.4) по формуле

$$\sigma_{экр} = \sqrt{\sigma_{\max}^2 + 4\tau_{\max}^2},$$

не должно превышать допускаемого $\sigma_{экр} \leq \sigma_{доп} = 0,1 \sigma_v$.

2.6.2. Расчет на устойчивость

Расчет на устойчивость состоит в определении критической сжимающей силы, при которой происходит переход прямолинейной формы упругого элемента в криволинейную, и критического значения момента.

Для упругого элемента, показанного на рис. 2.8, критическую силу и момент рассчитывают по формулам

$$P_{кр} = \frac{4\pi^2 EJ}{L^2}; \quad M_{кр} = \frac{2\pi}{L} \sqrt{EJ \cdot GJ_x},$$

где $J = \frac{1}{12} b\delta^3$ — момент инерции сечения упругого элемента при изгибе;

$J_x = \frac{1}{3} b\delta^3$ — момент инерции сечения упругого элемента при кручении;

G — модуль упругости второго рода.

2.6.3. Расчет угловой жесткости

Расчет угловой жесткости вокруг осей наименьшей жесткости необходим для обеспечения условия динамической настройки

$$k - J_1 \Omega^2 = 0,$$

где $k = \frac{1}{2}(k_\alpha + k_\beta)$ — средняя угловая жесткость карданова подвеса;

$J_1 = \frac{1}{2}(A_1 + B_1 + C_1)$ — разностный момент инерции кольца; Ω — угловая скорость собственного вращения ДНГ.

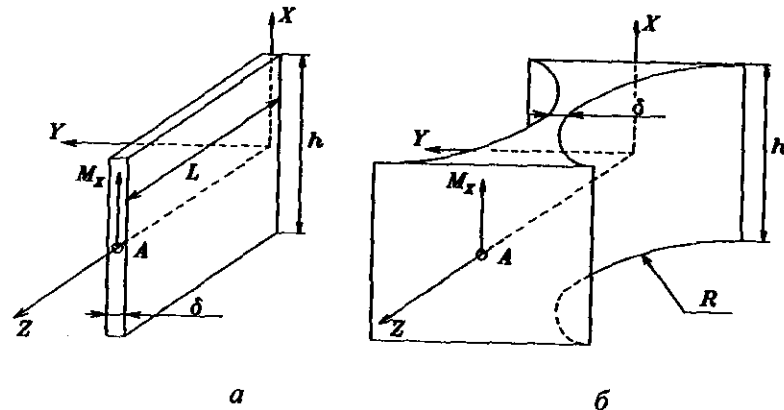


Рис. 2.8. К расчету угловой жесткости упругих элементов различного типа

Угловую жесткость упругих элементов находят по следующим формулам:

— для упругих элементов, работающих на изгиб (см. рис. 2.8, а и б),

$$k_\alpha = k_x = \frac{EJ}{L}; \quad k_\alpha = k_x = \frac{2}{9\pi} E h \delta^2 \sqrt{\frac{\delta}{R}};$$

— для упругого элемента, работающего на кручение (см. рис. 2.8, а),

$$k_\alpha = k_z = \frac{GJ_x}{L}.$$

2.6.4. Расчет жесткости упругого элемента с постоянным поперечным сечением

Расчет линейной жесткости подвеса вдоль трех осей необходим для определения собственных частот ДНГ, которые должны быть исключены из диапазона частот, действующих на гироскоп в процессе эксплуатации и настройки, — это очень важно для ДНГ из-за высокой добротности материала упругих элементов и конструктив-

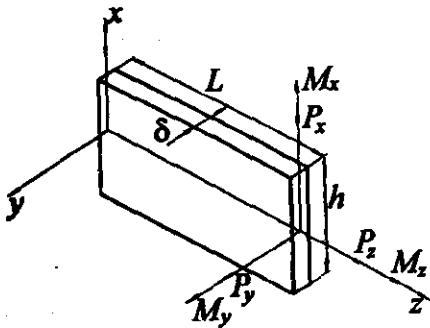


Рис. 2.9. К расчету упругого элемента постоянного сечения

ной особенности этого гироскопа, у которого массивный маховик подвешен на тонких упругих элементах.

Рассмотрим наиболее часто используемый тип упругого элемента карданова подвеса ДНГ, представленный на рис. 2.9. Для этого элемента упругие смещения δ и повороты θ концевое сечения при действии сил и моментов, приложенных в этом сечении, равны

$$\begin{cases} \delta_x = \left(\frac{L^3}{3EJ_x} + \frac{6L}{5GF} \right) P_x + \frac{L^2}{2EJ_x} M_x; & \theta_x = -\frac{L^2}{2EJ_x} P_y + \frac{L}{EJ_x} M_x; \\ \delta_y = \left(\frac{L^3}{3EJ_x} + \frac{6L}{5GF} \right) P_y + \frac{L^2}{2EJ_x} M_y; & \theta_y = \frac{L^2}{2EJ_x} P_x + \frac{L}{EJ_x} M_y; \\ \delta_z = \frac{L}{EF} P_z; & \theta_z = \frac{L}{GJ_x} M_z; \end{cases} \quad (2.5)$$

где $J_x = \frac{h\delta^3}{12}$, $J_y = \frac{\delta h^3}{12}$, $J_z = \frac{h\delta^3}{3}$, $F = h\delta$, $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$.

Иногда равенства (2.5) записывают в векторной форме

$$\begin{aligned} \bar{\delta} &= A \cdot \bar{P} + B \cdot \bar{M}; \\ \bar{\theta} &= B^T \cdot \bar{P} + C \cdot \bar{M}, \end{aligned}$$

где

$$A = \begin{bmatrix} \frac{L^3}{3EJ_x} + \frac{6L}{5GF} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L^3}{3EJ_x} + \frac{6L}{5GF} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L}{EF} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{L^2}{2EJ_x} & 0 \\ -\frac{L^2}{2EJ_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{L}{EJ_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L}{EJ_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L}{GJ_z} \end{bmatrix}.$$

Линейная жесткость этого упругого элемента, с учетом отсутствия поворота его концевое сечения (т.е. $\bar{\theta} = 0$) рассчитывается по формулам

$$\begin{aligned} K_x &= \frac{1}{\frac{L^3}{E\delta h^3} + \frac{6L}{5G\delta h}} = \frac{\frac{E\delta h^3}{L^3}}{1 + 2,4(1+\mu)\frac{h^2}{L^2}}, \\ K_y &= \frac{1}{\frac{L^3}{E\delta^3 h} + \frac{6L}{5G\delta h}} = \frac{\frac{E\delta^3 h}{L^3}}{1 + 2,4(1+\mu)\frac{\delta^2}{L^2}}, \quad K_z = \frac{Eh\delta}{L}. \end{aligned}$$

2.6.5. Расчет жесткости упругого элемента с переменным поперечным сечением

Определим деформации упругого элемента под воздействием сил P_x, P_y, P_z и моментов M_x, M_y, M_z , приложенных к концевому сечению элемента переменного поперечного сечения (рис. 2.10, где h — толщина элемента, R — радиус окружностей формирующих упругую перемычку, δ — минимальная толщина элемента).

Упругий элемент имеет переменную толщину b , как показано на рис. 2.11, изменяемую в соответствии с уравнением

$$b = 2R \left(1 + \alpha - \sqrt{1 - \left(\frac{z}{R} - 1 \right)^2} \right), \quad \text{где } \alpha = \frac{\delta}{2R}.$$