

## Билет 12

### 1. Модель погрешностей трехстепенного гироскопа (омега перегрузки)

Под действием вредных (возмущающих) моментов гироскоп прецессирует (см. формулу (19)), утрачивая способность сохранять первоначальное положение в инерциальном пространстве. Угол  $\theta$  отклонения гироскопа за заданное время  $\Delta t$  называют дрейфом (или уходом) гироскопа:

$$\theta = \frac{M_{вр}}{H} \Delta t = \omega_{ССП} \Delta t, \quad (33)$$

где  $\omega_{ССП}$  — собственная скорость прецессии (ССП), или скорость дрейфа (ухода) гироскопа.

Практическая гироскопия до конца XX в. была связана во многом с проблемой уменьшения вредных моментов, действующих на гироскоп. Применялись опоры «сухих» гироскопов с малым трением: специальные шарикоподшипниковые, газостатические и упругие опоры, магнитные и электростатические подвесы и т. д. Созданы поплавковые гироскопы (в отличие от «сухих» гироскопов, в которых ротор вращается в герметичной камере-поплавке, помещенной в жидкость); в этом случае архимедова сила разгружает чувствительные опоры — опоры поплавка (см. рис. 20). Впоследствии разрабатываются гироскопы, не имеющие быстровращающегося ротора и карданова подвеса.

Собственная скорость прецессии (дрейфа)

$$\omega_{ССП} = \omega_0 \pm \Delta\omega_{сл}, \quad (34)$$

где  $\omega_0$  — постоянная составляющая ССП (обычно устанавливают при испытаниях гироскопа в заводских условиях или определенных режимах эксплуатации объекта);  $\Delta\omega_{сл}$  — случайная составляющая ССП.

Величину  $\omega_0$  можно учитывать при обработке информации, алгоритмической компенсации погрешностей гироскопа или компенсировать приложением управляющего (компенсационного) момента  $M_{упр} = H\omega_0$ .

В 1960-е годы появился термин «модель погрешности гироскопа», под которым подразумевалась, как правило, аналитическая зависимость скорости дрейфа от условий эксплуатации: перегрузки, температуры, времени эксплуатации и др.

Применение этого термина имело следующие цели:

- разработка унифицированного паспорта giroприбора (независимо от фирмы-изготовителя);

- создание единой методики оценки погрешностей гироскопов на стадии изготовления и приемосдаточных испытаний, которая позволяет вмешиваться в процесс балансировки и регулировки прибора для повышения его точности;

- разработка методики прогнозирования погрешности giroприбора в процессе эксплуатации и методов алгоритмической компенсации погрешностей giroприборов и гиросистем.

Рассмотрим простейшую модель погрешности трехстепенного гироскопа с шарикоподшипниковыми опорами (рис. 31, а) при наличии линейной перегрузки  $n_\zeta = \frac{W_\zeta}{g}$ ,  $n_\eta = \frac{W_\eta}{g}$ ,  $n_\xi = \frac{W_\xi}{g}$ , где  $W_\xi$ ,  $W_\eta$ ,  $W_\zeta$  — проекции ускорений объекта на оси  $O\xi$ ,  $O\eta$ ,  $O\zeta$ .

Возмущающий (вредный) момент шарикоподшипниковой опоры внутренней рамки гироскопа

$$M_{шп} = M_0 + K_r F_r + K_a F_a, \quad (35)$$

где  $M_0$  — составляющая возмущающего момента опоры, которая не зависит от нагрузки;  $F_r$ ,  $F_a$  — радиальная и осевая силы, действующие на опору;  $K_r$ ,  $K_a$  — коэффициенты, определяемые по справочнику в зависимости от типа, конструкции и условий эксплуатации шарикоподшипников.

В рассматриваемом случае

$$F_r = m \sqrt{W_\zeta^2 + W_\eta^2} = mW_r = Gn_r;$$

$$F_a = mW_\xi = Gn_\xi,$$

где  $m$  — масса гиروزла (ротора и внутренней рамки);

$$n_r = \sqrt{W_\zeta^2 + W_\eta^2} / g.$$

Учтем разбалансировку гиروزла, характеризуемую смещением центра масс гиروزла относительно т.  $O$  в осевом  $l_z$  и радиальном  $l_y$  направлениях (рис. 31, б). Момент, вызванный разбалансировкой,

$$M_{px} = mW_\zeta l_z - mW_\eta l_y = G(l_z n_\zeta - l_y n_\eta). \quad (36)$$

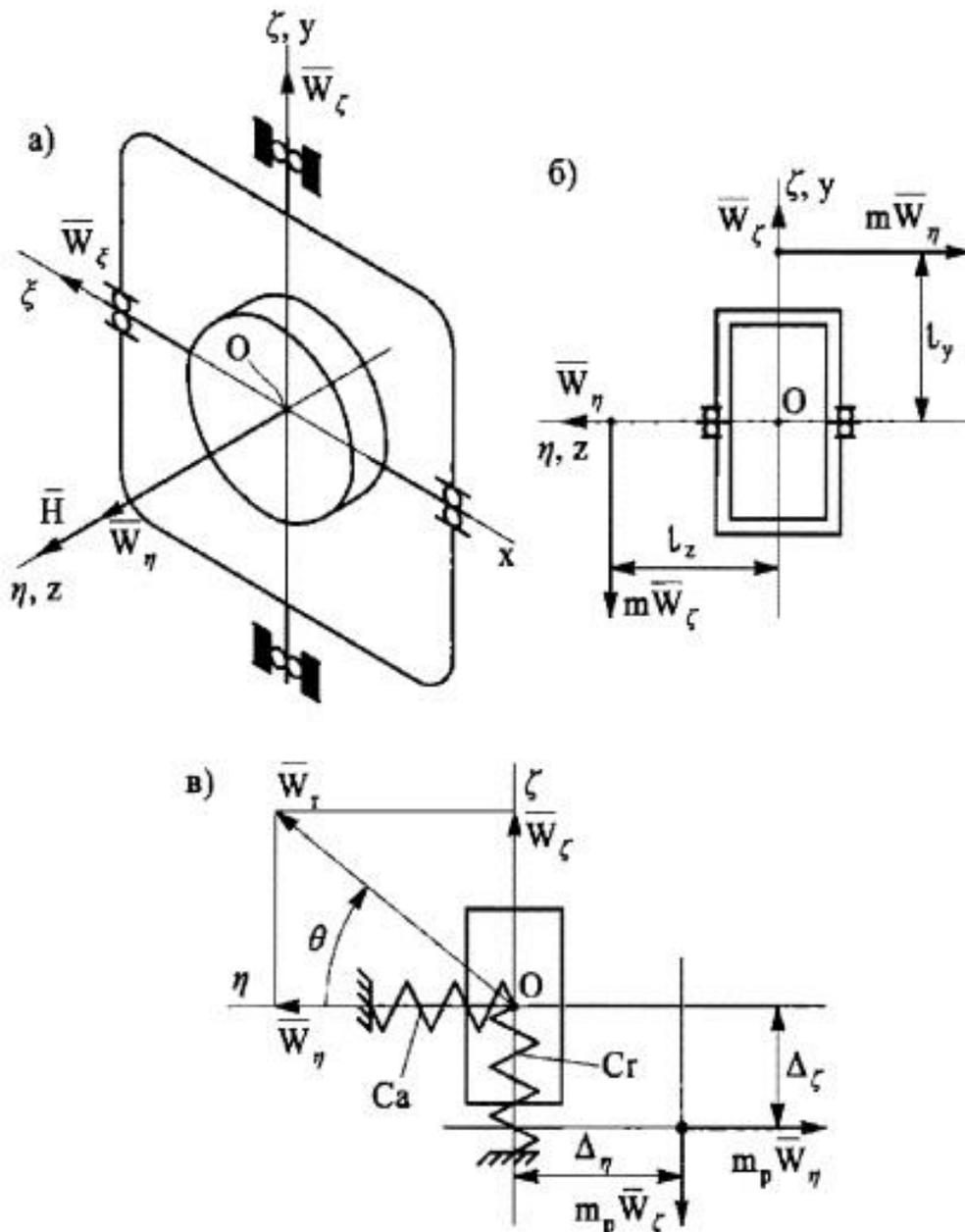


Рис. 31. К определению моментов, действующих вокруг оси  $Ox$  гиروزла

Для упрощения выкладок учтем только осевую разбалансировку:

$$M_{px} = Gl_z n_\zeta. \quad (37)$$

Определим момент, вызванный неравножесткостью крепления ротора в главных опорах гироскопа. Механическая модель ротора показана на рис. 31, в, где  $C_r, C_a$  — приведенные жесткости крепления ротора в радиальном и осевом направлениях.

Инерционная сила  $m_p W_\zeta$  вызовет смещение центра масс  $m_p$  ротора  $\Delta_\zeta = \frac{m_p W_\zeta}{C_r}$ , а  $m_p W_\eta$  — смещение  $\Delta_\eta = \frac{m_p W_\eta}{C_a}$ . Следовательно, вокруг оси  $Ox$  возникает возмущающий момент, вызванный нежестким креплением ротора:

$$M_{нж} = m_p W_\eta \Delta_\zeta - m_p W_\zeta \Delta_\eta = m_p^2 W_\zeta W_\eta \left( \frac{1}{C_r} - \frac{1}{C_a} \right). \quad (38)$$

Обычно  $C_r > C_a$ ; обозначив  $K_{нж} = \frac{1}{C_a} - \frac{1}{C_r}$ ,  $W_\zeta = W_r \cos \theta$ ,  $W_\eta = W_r \sin \theta$ , получим  $M_{нж} = -0,5 G_p^2 n_r^2 K_{нж} \sin 2\theta$  и максимальные значения ( $n_r = W_r/g$ )

$$M_{нж \max} = -0,5 K_{нж} G_p^2 n_r^2. \quad (39)$$

Просуммируем уравнения (35), (37), (38) и разделим сумму моментов на  $H$ . Тогда

$\omega_{ССП}(n) = \omega_0 + \omega_{1r}(g)n_r + \omega_{1a}(g)n_\xi + \omega_{1p6}(g)n_\zeta + \omega_2(g^2)n_r^2$ ;  
где  $\omega_0 = \frac{M_0}{H}$ ,  $\omega_{1r}(g) = \frac{K_r G}{H}$ ,  $\omega_{1a}(g) = \frac{K_a G}{H}$ ,  $\omega_{1p6}(g) = \frac{l_z G}{H}$ ,  
 $\omega_2(g^2) = \frac{0,5 K_{нж} G_p^2}{H}$  — удельные составляющие скорости дрейфа (ССП).

Приняв  $n_r = n_\zeta = n_\xi = n$ , получим более простую зависимость для зависимости скорости дрейфа от перегрузки:

$$\omega_{др}(n) = \omega_0 + \omega_1(g)n + \omega_2(g^2)n^2, \quad (40)$$

где  $\omega_1(g) = \omega_{1r}(g) + \omega_{1a}(g) + \omega_{1p6}(g)$ .

Нелинейность жесткостных характеристик главных опор гироскопа, погрешности геометрической формы шарикоподшипниковых опор и другие несовершенства конструкции при-

водят к более сложной зависимости модели погрешности гироскопа от степени перегрузки:

$$\omega_{др} = \sum_{i=0}^{i=n} \omega_i (g^i) n^i. \quad (41)$$

При больших перегрузках степени  $i$  могут быть нецелыми числами (например,  $i = 1,5$ ); максимальная степень  $i \leq 5$ .

Зависимость погрешности гироскопа от температуры  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) с учетом скорости изменения температуры (модель погрешности) имеет вид

$$\omega_{др}(\Delta t \text{ } ^{\circ}\text{C}) = \sum_{i=0}^{i=m} \omega_i (\Delta t^i) \Delta t^i + K_{\Delta t} \frac{\Delta t}{t}, \quad (42)$$

где  $\omega_i(\Delta t^i)$ ,  $K_{\Delta t}$  — удельные составляющие ССП.

В инженерной практике  $m \leq 2$ , т. е.  $i$  принимает значение 0, 1, 2; наиболее часто выбирают  $i = 1$ .

Временные зависимости  $\omega_{др}$  более сложные, и их определяют экспериментальным путем. В одном запуске часто  $\omega_{др}$  в среднем изменяется по экспоненциальному закону (рис. 32, а), реже по линейной зависимости и др. Время переходного процесса может быть значительным — до нескольких часов в зависимости от типа конструкции гироскопа. Всегда имеется разброс  $\Delta\omega$  среднего значения  $\omega_{др}$  от запуска к запуску прибора (рис. 32, б), что затрудняет алгоритмическую компенсацию погрешностей гироскопа.

## 2. Добротность лазерного ДУС

(полностью про ЛДУС есть в 11 билете)

Важной характеристикой ЛДУС является коэффициент добротности, который учитывает отношение энергии  $N$ , поступающей в резонатор, к потерям энергии  $N_{\pi}$  (за счет отражения, дифракции и т. д.):

$$Q = \omega_0 \frac{N}{N_{\pi}} = 2\pi f_0 \frac{N}{N_{\pi}}, \quad (113)$$

где  $f_0 = f_{01} = f_{02}$  — частота встречных бегущих волн генерации (лучи 1 и 2) при  $\Omega_z = 0$ .

За время  $t_0$  обхода лучом оптического контура  $L$  потери энергии

$$N_{\pi} = \frac{\eta N}{t_0} = \frac{\eta N c}{L},$$

где  $\eta$  — коэффициент потерь энергии.

Подставив  $N_{\pi}$  в формулу (113), получим

$$Q = 2\pi \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{NL}{\eta N c} = 2\pi \frac{L}{\lambda \eta} = 2\pi \frac{m}{\eta},$$

где  $\lambda = 0,633$  мкм — длина волны неона.

Коэффициент  $\eta$  мал, поэтому добротность ЛДУС достаточно высокая ( $Q \approx 10^9$ ) по сравнению с ВОГ, что обеспечивает высокую чувствительность ЛДУС.