

### Волоконно-оптический гироскоп

Оптические гироскопы строятся на базе пассивного кольцевого интерферометра (источник излучения — лазер — находится вне оптического контура) и активного интерферометра (кольцевой лазер с оптическим резонатором).

Рассмотрим принцип действия пассивного интерферометра (рис. 92), представляющего собой замкнутый кольцевой световод, в котором луч от внешнего источника (лазера) 4 разделяется с помощью оптического устройства 3 на два (1 и 2) встречно-направленных луча.

Интерферометр имеет регистрирующее устройство, состоящее из оптического смесителя лучей 1, 2 и фотоприемника 5,

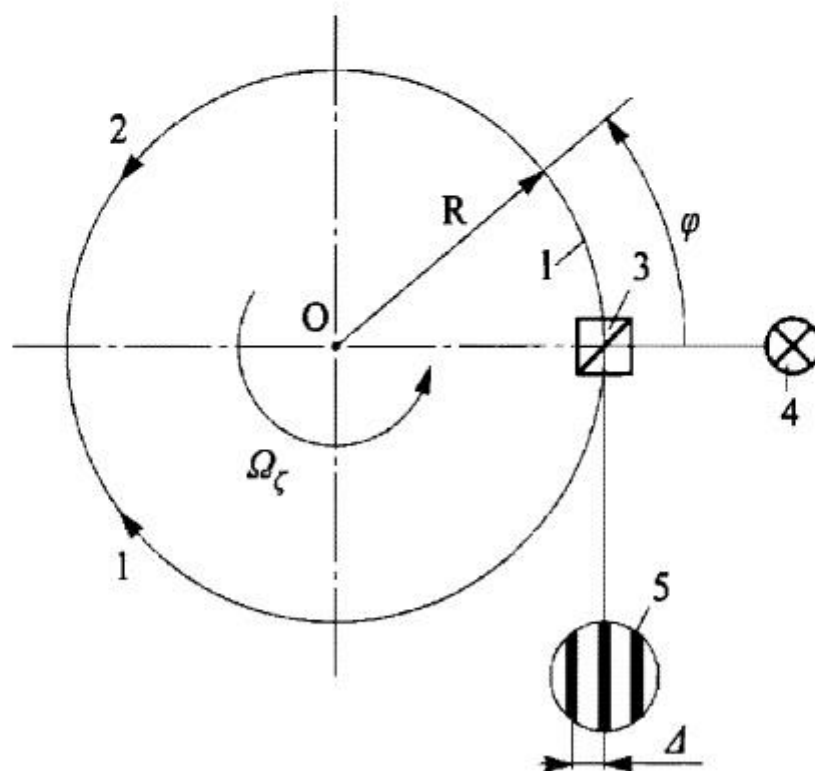


Рис. 92. Схема пассивного интерферометра

на площадке которого образуется интерференционная картина, состоящая из светлых и темных полос.

Если основание, на котором установлен оптический контур, неподвижно относительно инерциального пространства ( $\Omega_\zeta = 0$ ), то разность хода лучей  $\Delta L = L_2 - L_1 = 0$ , а  $L_2 = L_1 = 2\pi R$ , что соответствует неизменной интерференционной картине (при отсутствии потерь в световолокне, отсутствии шумов электронной схемы). Появление абсолютной угловой скорости  $\Omega_\zeta \neq 0$  приводит к тому, что путь луча 2 увеличивается на величину  $l$ , а луча 1 — уменьшается на величину  $l$ .

Разность хода лучей (за время  $t_0$  обхода лучом контура)  $\Delta L = L_2 - L_1 = 2l$  является причиной их фазового сдвига, следовательно, и линейного сдвига интерференционных полос на площадке фотоприемника, величина которого пропорциональна измеряемой угловой скорости  $\Omega_\zeta$ . Разность  $\Delta L = 2l$  хода лучей соответствует разности времени возвращения лучей в исходную точку:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\Delta L}{c} = \frac{2l}{c},$$

где  $l = \Omega_\zeta t_0 R = \frac{2\pi R^2}{c} \Omega_\zeta = \frac{2S}{c} \Omega_\zeta$ ;  $c$  — скорость света ( $S$  — площадь оптического контура).

Фазовый сдвиг интерференционных полос

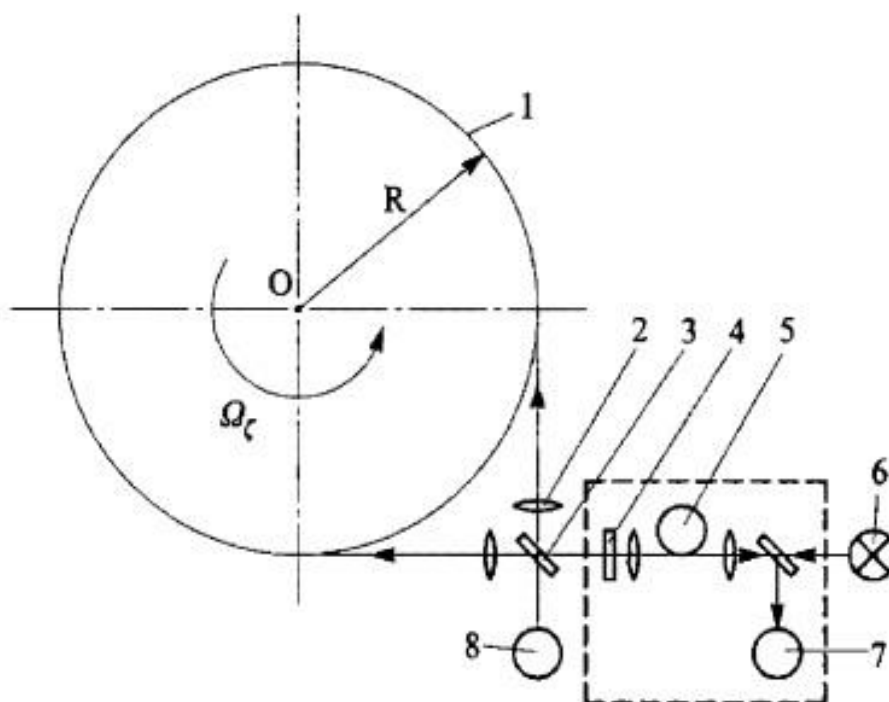
$$\Delta\varphi = \nu_0 \Delta t = \frac{4S\nu_0}{c^2} \Omega_\zeta = h\Omega_\zeta,$$

где  $h = \frac{4S\nu_0}{c^2}$  — чувствительность (масштабный коэффициент) пассивного интерферометра;  $\nu_0$  — частота излучения.

Измеряя фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  оптическим устройством, определяют угловую скорость  $\Omega_\zeta$  основания. Однако чувствительность  $h$  мала, поэтому необходимо увеличивать площадь контура. С увеличением возрастают энергетические потери.

Реализация ДУС на базе пассивного интерферометра стала возможной только в связи с развитием световолоконной оптики, лазерной техники и микроэлектроники; отсюда название — волоконно-оптический гироскоп (ВОГ). Точность серийных ВОГ за последние годы возросла от 10 до  $10^{-3}$  °/ч.

Погрешности ВОГ связаны с качеством световолокна, деформацией корпусных деталей, шумами электронных схем, влиянием внешних магнитных полей и т. п. Характеристики прибора во многом зависят от температуры окружающей среды, поэтому в прецизионных ВОГ применяют системы термостатирования. Влияние магнитных полей снижают с помощью экрана. На рис. 93 показана принципиальная схема ВОГ.



**Рис. 93.** Принципиальная оптическая схема ВОГ:

1 — кольцо из одномодового волокна; 2 — линза; 3 — оптический разделитель луча; 4 — поляризатор; 5 — пространственный волоконный фильтр моды; 6 — лазер; 7, 8 — фотоприемники

В прецизионных схемах ВОГ используют достижения микрооптической технологии, волоконно-оптические функциональные и оптические волновые элементы и др.

Применение фотонно-кристаллических волокон позволяет уменьшить диаметр оптического контура до 2,5 см (без потери точности), существенно снизить влияние температуры и внешних магнитных полей на характеристики ВОГ.

Модель погрешности ВОГ запишем в зависимости от температуры окружающей среды в форме (42):

$$\omega(t \text{ } ^\circ\text{C}) = \omega_0 + K_0 \frac{\Delta t \text{ } ^\circ\text{C}}{t} + K_1 t \text{ } ^\circ\text{C} + \Delta\omega_{\text{сл}},$$

где  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $\Delta\omega_{\text{сл}}$ ,  $\omega_0$  — величины, определяемые, как правило, экспериментально;  $\Delta t \text{ } ^\circ\text{C}$  — перепад температур за время  $t$ .

При больших линейных перегрузках  $n$  отмечена зависимость погрешности ВОГ от  $n$  (обусловленная деформацией корпуса и элементов прибора).

В настоящее время ВОГ находит широкое применение для построения бескарданных систем ориентации, БИНС, САУ беспилотных ЛА и др.

## 2. Устойчивость сферического гироскопа

Рассмотрим приближенную модель погрешности сферического гироскопа. Классический сферический гироскоп (рис. 33) представляет собой быстровращающуюся сферу, подвешенную с помощью бесконтактного подвеса — электростатического (рис. 34), газового, жидкостного и др. Сферический гироскоп может быть чувствительным элементом БИНС, ИНС, систем ориентации и гиростабилизаторов. К сферическим относятся также гироскопы головок самонаведения, имеющие сферический шарикоподшипниковый подвес.

Положение сферы ( $Ox'y'z'$ ) определяется углами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$  (рис. 33, а) относительно базовой СК  $O\xi\eta\zeta$ .

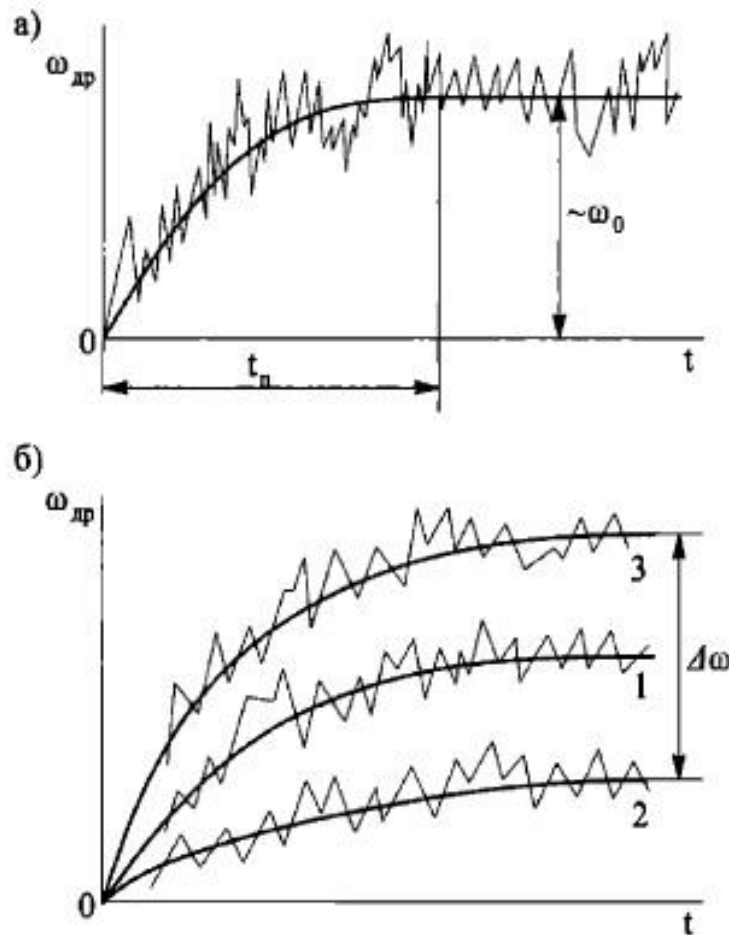


Рис. 32. Зависимость  $\omega_{др}$  от времени  $t$ :

*a* — в одном запуске ( $t_{п}$  — время переходного процесса); *б* — от запуска к запуску (1—3)

Условие устойчивости сферического гироскопа, при котором затухают нутационные колебания, имеет вид

$$CD_x > AD_z,$$

где  $C, A$  — осевой и экваториальный моменты инерции ротора ( $Ox'y'z'$  — главные оси инерции; в дальнейшем штрих опускаем);  $D_x, D_z$  — удельные демпфирующие моменты (относительно осей  $Ox'$  и  $Oz'$ ).

При  $D_x = D_z$  необходимо обеспечить  $C > A$  путем утолщения сферы по экватору (рис. 33, б) или с помощью технологического пояска (рис. 33, в). При анализе точности устойчивого сферического гироскопа можно пользоваться прецессионными уравнениями, считая  $H = \text{const}$ .

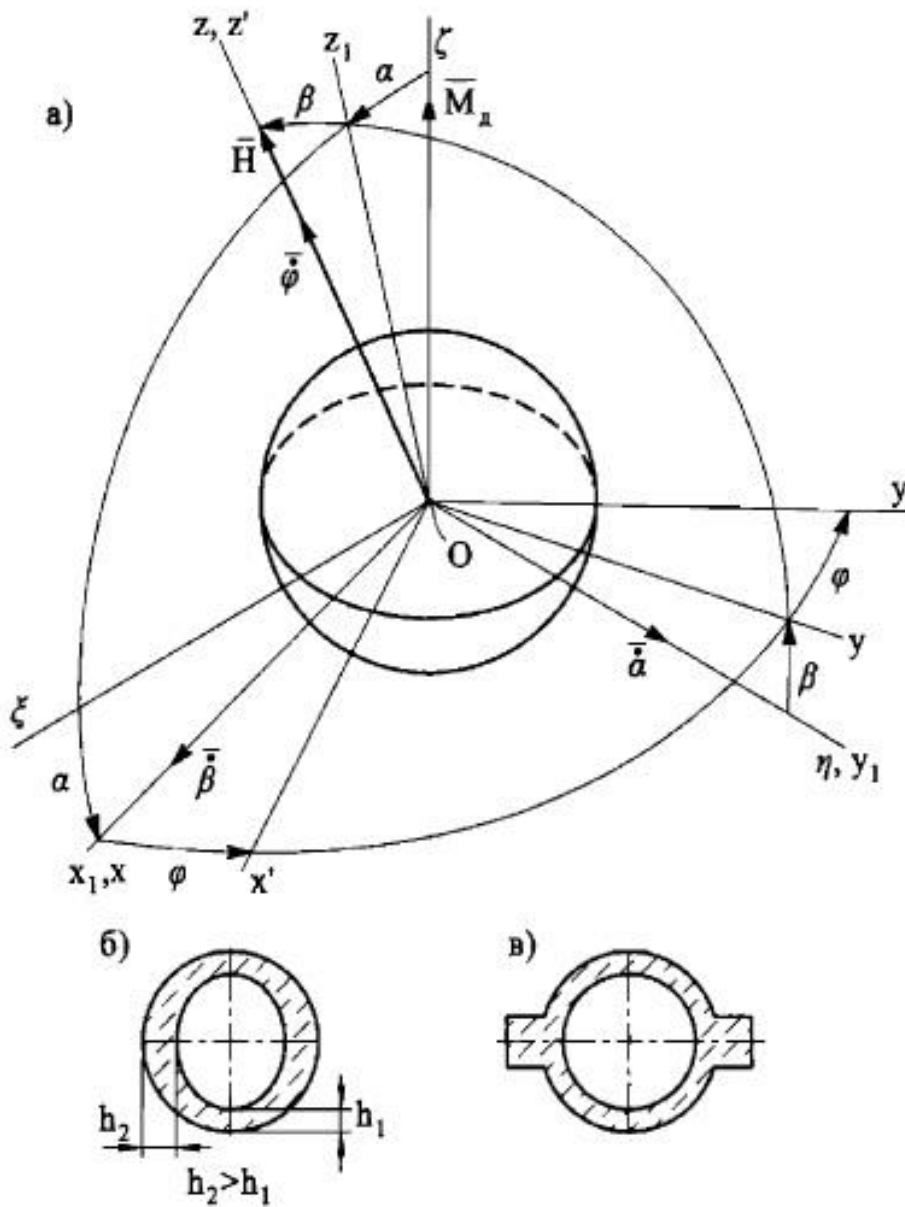


Рис. 33. К выводу уравнений движения сферического гироскопа

Полагая СК  $O\xi\eta\zeta$  неподвижной, найдем абсолютные угловые скорости при малых  $\alpha$  и  $\beta$ :

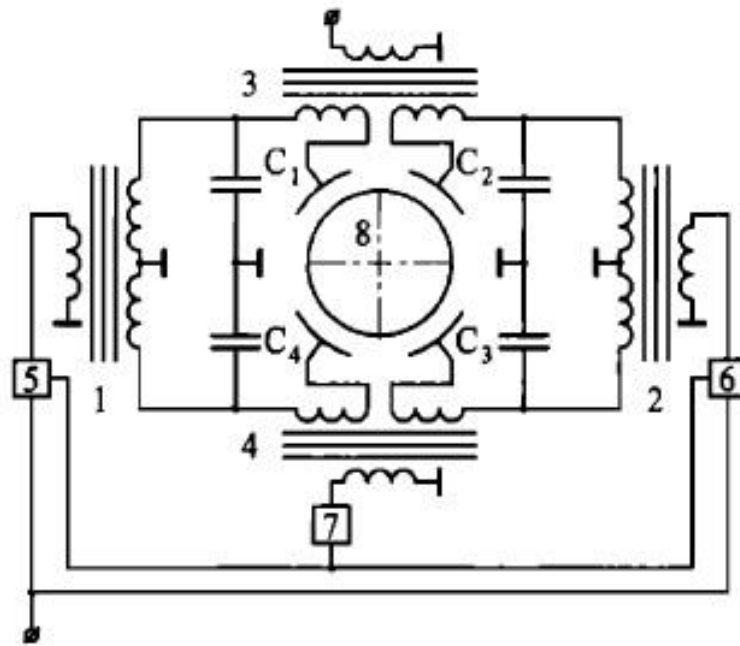
$$\omega_x \approx \dot{\beta};$$

$$\omega_y = \dot{\alpha} \cos \beta \approx \dot{\alpha}.$$

Проекции момента  $M_d$  двигателя, направленного по оси  $O\zeta$  (оси статора двигателя) на оси  $Ox$  и  $Oy$ :

$$M_x = -M_d \sin \alpha \approx -\alpha M_d;$$

$$M_y = M_d \cos \alpha \sin \beta \approx \beta M_d.$$



**Рис. 34.** Принципиальная схема электростатического гироскопа: 1, 2 — элементы питания; 3, 4 — элементы системы определения положения ротора (датчики положения); 5, 6 — усилители мощности; 7 — фазочувствительный усилитель; 8 — ротор;  $C_1$ — $C_4$  — разделительные конденсаторы

Прецессионные уравнения движения гироскопа для СК  $Oxyz$ :

$$\begin{aligned} \Sigma M_x = 0; \quad -N\dot{\alpha} - \alpha M_d + M_x &= 0; \\ \Sigma M_y = 0; \quad N\dot{\beta} + \beta M_d + M_y &= 0, \end{aligned}$$

где  $M_x, M_y$  — внешние (вредные, управляющие) моменты.

После преобразования уравнений получим

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} + \varepsilon\alpha &= \omega_{\text{ССП}}; \\ \dot{\beta} + \varepsilon\beta &= \omega'_{\text{ССП}}, \end{aligned} \quad (43)$$

где  $\varepsilon = M_d/N$  — удельная скорость прецессии сферического гироскопа, вызванная моментом двигателя;  $\omega_{\text{ССП}} = \frac{M_x}{N}$ ;  $\omega'_{\text{ССП}} = -\frac{M_y}{N}$  — ССП под действием вредных моментов  $M_x, M_y$ .

При  $M_x = M_y = 0$  решение (43) имеет вид  $\alpha = \alpha_0 e^{-\varepsilon t}$ ;  $\beta = \beta_0 e^{-\varepsilon t}$ , где  $\alpha_0, \beta_0$  — углы, характеризующие начальное положение оси ротора при  $t = 0$ .

Траектория апекса на картинной плоскости — прямая  $\alpha = \frac{\alpha_0}{\beta_0} \beta$ , т. е. ось гироскопа «корректируется» моментом дви-



гателя и движется кратчайшим путем к совмещению с вектором  $M_d$  (своеобразная радиальная коррекция), что приводит к погрешности сферического гироскопа; при наличии момента двигателя сферический гироскоп «теряет» свойства свободного гироскопа.

Оценим погрешность сферического гироскопа, считая, что двигатель уравнивает момент сил вязкого трения (газодинамический момент сопротивления вращению ротору)  $M_d = D_z \dot{\phi}$ . Тогда  $\varepsilon = \frac{D_z \dot{\phi}}{C \dot{\phi}} = \frac{1}{T}$ , где  $T = \frac{C}{D_z}$  — постоянная времени сферического гироскопа.

При отклонении ротора гироскопа на углы  $\alpha^*$ ,  $\beta^*$  скорость его прецессии

$$\dot{\alpha} = \omega_{\text{ССП}}^* = \omega_{\text{ССП}} - \frac{\alpha^*}{T}; \quad \dot{\beta} = \omega_{\text{ССП}}^{**} = \omega'_{\text{ССП}} - \frac{\beta^*}{T},$$

т. е. гироскоп должен работать при малых углах  $\alpha^*$ ,  $\beta^*$  и с малым удельным демпфирующим моментом  $D_z$ .

Если имеются разбалансировка ротора, неравножесткость подвеса, то модель погрешности сферического гироскопа запишем с учетом выражения (41):

$$\omega_{\text{ССП}}(n) = \frac{\theta^*}{T} + \omega_0 + \omega_1(g)n + \omega_2(g^2)n^2 + \dots, \quad (44)$$

где  $\theta^*\{\alpha^*, \beta^*\}$  — угол отклонения от оси  $Oz$ ;  $\omega_0$ ,  $\omega_1(g)$ ,  $\omega_2(g^2)$  — удельные составляющие ССП;  $n$  — линейная перегрузка.

Для электростатических гироскопов навигационных систем подводных лодок  $\omega_0 \approx 10^{-5}$  °/ч, КЛА —  $10^{-2} \dots 10^{-5}$  °/ч, сферических гироскопов головок самонаведения — до  $10$  °/ч.

В модели (44) появляется характерная зависимость ССП от угла  $\theta^*$  отклонения оси сферы относительно вектора момента приводного двигателя. Для уменьшения этой погрешности применяют двигатель, в котором с помощью специальной следящей системы обеспечивается совпадение осей сферы и вектора момента двигателя.