

## Билет 11

### 1. Лазерный ДУС.

#### Лазерный ДУС

Схема лазерного ДУС (ЛДУС), представляющего собой активный интерферометр — кольцевой оптический квантовый генератор, приведена на рис. 94.

Принципиальное отличие ЛДУС от ВОГ состоит в том, что активная среда лазера помещается в замкнутый контур опти-

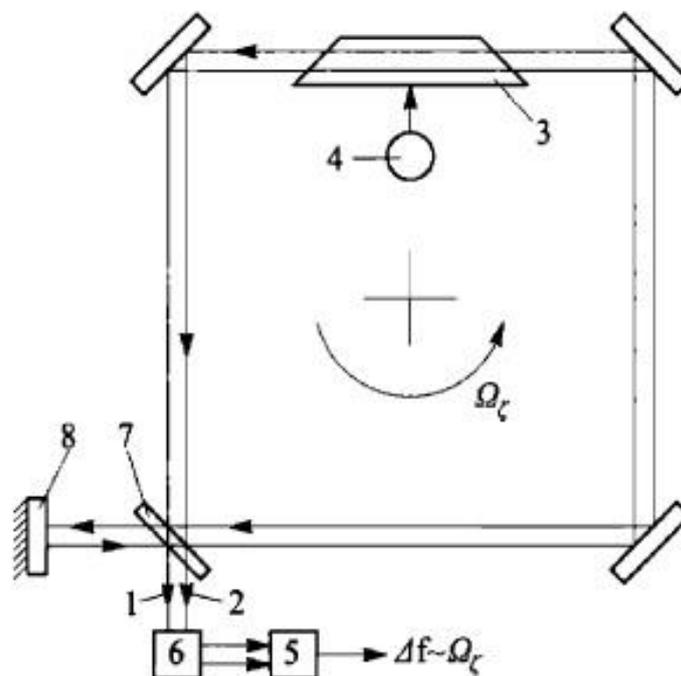


Рис. 94. Схема ЛДУС:

1, 2 — лучи; 3 — лазер; 4 — блок питания лазера; 5 — частотомер; 6 — фотоприемник; 7, 8 — полупрозрачное и отражающее зеркала

ческого резонатора, представляющего собой систему зеркал или призм. При включении источника питания 4 (блок «поджиг») и возбуждения активной среды в колебательной резонансной системе возникают свободные электромагнитные колебания, которые усиливаются благодаря наличию активной среды лазера и оптического резонатора.

Наиболее часто применяют гелий-неоновые лазеры. Гелий не участвует в излучении, но обеспечивает эффективное возбуждение нейтральных атомов неона. Отношение парциальных давлений  $Ne$  и  $He$  находится в диапазоне  $0,073...0,2$ .

Возбуждение активной среды осуществляется тлеющим высоковольтным ( $5...10$  кВ) зарядом постоянного напряжения или высокочастотным ( $10^2 ... 10^3$  МГц) сравнительно низким напряжением. При возбуждении газа спонтанное излучение атомов получает максимальное усиление в направлении оптической оси резонатора, возвращается с помощью зеркал (или призм) резонатора в активную среду, которая обеспечивает дальнейшее усиление благодаря стимулированному излучению лазера. Усиление продолжается до тех пор, пока плотность энергии в волне не достигнет такого значения, при котором коэффициент усиления уменьшается вследствие эффекта насыщения. Система входит в автоколебательный режим работы подобно автогенератору; при этом функцию положительной обратной связи выполняют активная среда с резонатором. Установившейся генерации на частоте  $f_0$  (при  $\Omega_z = 0$ ) соответствует равенство усиления среды и суммарных потерь в резонаторе. В режиме генерации устанавливаются две встречные волны генерации (лучи 1 и 2) с частотой  $f_0 = f_{01} = f_{02}$  при  $\Omega_z = 0$ .

Необходимым условием работы ЛДУС является выполнение основного условия генерации активного интерферометра, которое означает кратность периметра  $L$  длине световой волны  $\lambda$  генерируемого излучения с частотой  $f$ :

$$L = m\lambda = mc/f, \quad (112)$$

где  $m \approx 10^5 ... 10^6$  — целое число.

Наличие угловой скорости  $\Omega_z \neq 0$  приводит к изменению длины путей лучей  $L_2 > L_1$  (см. рис. 92), следовательно, и частот генерации  $f_1 = mc/L_1$ ,  $f_2 = mc/L_2$ . При этом разность частот  $\Delta f = f_1 - f_2$  (а не сдвиг фаз, как в ВОГ) пропорциональна измеряемой угловой скорости  $\Omega_z$ . Интерференционная картина перемещается с частотой  $\Delta f$ , и на выходе фотоприемника б возникает переменный ток, частота которого измеряется прибором 5 и пропорциональна  $\Omega_z$ .

Отметим, что часть излучаемой энергии ( $< 0,1\%$ ) выводится на регистрирующее устройство, состоящее из оптического смесителя (7, 8) и фотоприемника б. Лучи смешиваются с помощью полупрозрачного 7 и отражающего 8 зеркал. Луч 2 частично проходит через зеркало 7, а луч 1, отражаясь от зеркала 8, смешивается с лучом 2, образуя интерференционную картину на фоточувствительной площадке фотоприемника б, которая неподвижна при  $\Omega_z = 0$ .

Принцип работы ЛДУС можно пояснить следующим образом.

Две встречные бегущие электромагнитные волны (1 и 2) кольцевого лазера образуют стоячую волну, неподвижную в инерциальном пространстве. Для стоячей волны характерно наличие узлов, т. е. мест, где амплитуда колебаний равна нулю, и пучностей (ср. с ВТГ). Наблюдатель, смотря сверху на оптический контур (если бы это было возможно), фиксировал бы темные точки — узлы на светящемся кольце, неподвижном в инерциальном пространстве.

Вращение основания с абсолютной скоростью  $\Omega_z \neq 0$  приведет к перемещению узлов и пучностей волны относительно наблюдателя. Если считать, что от каждой темной точки идет импульс, то частота их следования пропорциональна  $\Omega_z$ , а суммарное число импульсов пропорционально  $\int \Omega_z(t) dt$ , т. е. углу  $\Delta\psi$  поворота основания.

При работе ЛДУС обеспечивают одномодовый режим генерации, добываясь монохроматического когерентного излучения. Для этого регулируют усиление активной среды так, что на всех модах, кроме основной, потери в резонаторе не компенсируются.

Генерация зависит от спектральных характеристик зеркал, точности изготовления оптических деталей, силы тока газового разряда и др. Так, отклонения от параллельности двух плоских зеркал ( $\approx 5'$ ) может вызвать исчезновение генерации. Равенство частот  $f_{01}$  и  $f_{02}$  генерации при  $\Omega_z = 0$  обеспечивается выполнением условия строгой симметрии потерь энергии во встречных лучах 1 и 2 подбором характеристик элементов резонатора, осуществлением конструктивных и технологических мер, в частности, по стабилизации периметра  $L$  оптического контура.

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

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

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

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

где  $\eta$  — коэффициент потерь энергии.

Подставив  $N_n$  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.

Построим выходную характеристику ЛДУС и определим чувствительность  $h$  (масштабный коэффициент). Разность частот на выходе ЛДУС при  $\Omega_z \neq 0$

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{mc}{L_1} - \frac{mc}{L_2} = mc \left( \frac{1}{L - l} - \frac{1}{L + l} \right) = \frac{2lmc}{L^2 - l^2}$$

где  $2l = L_2 - L_1 = 4S\Omega_z/c$ .

При  $l \ll L$

$$\Delta f \approx \frac{4Sm}{L^2} \Omega_\zeta = \frac{4S}{L\lambda} \Omega_\zeta = h\Omega_\zeta, \quad (114)$$

где  $h = \frac{4S}{L\lambda}$  — чувствительность ДУС.

Для квадратной формы контура со стороной квадрата  $a$  чувствительность  $h = \frac{a}{\lambda}$ .

Поскольку неон имеет минимальный размер волны  $\lambda$  (по сравнению с другими газами), то значение  $h$  велико (ср. с ВОГ).

На рис. 95, а показана идеальная выходная ЛДУС — прямые; видно, что съём сигнала, осуществляемый по частоте, не дает возможности определить знак угловой скорости  $\Omega_\zeta$ .

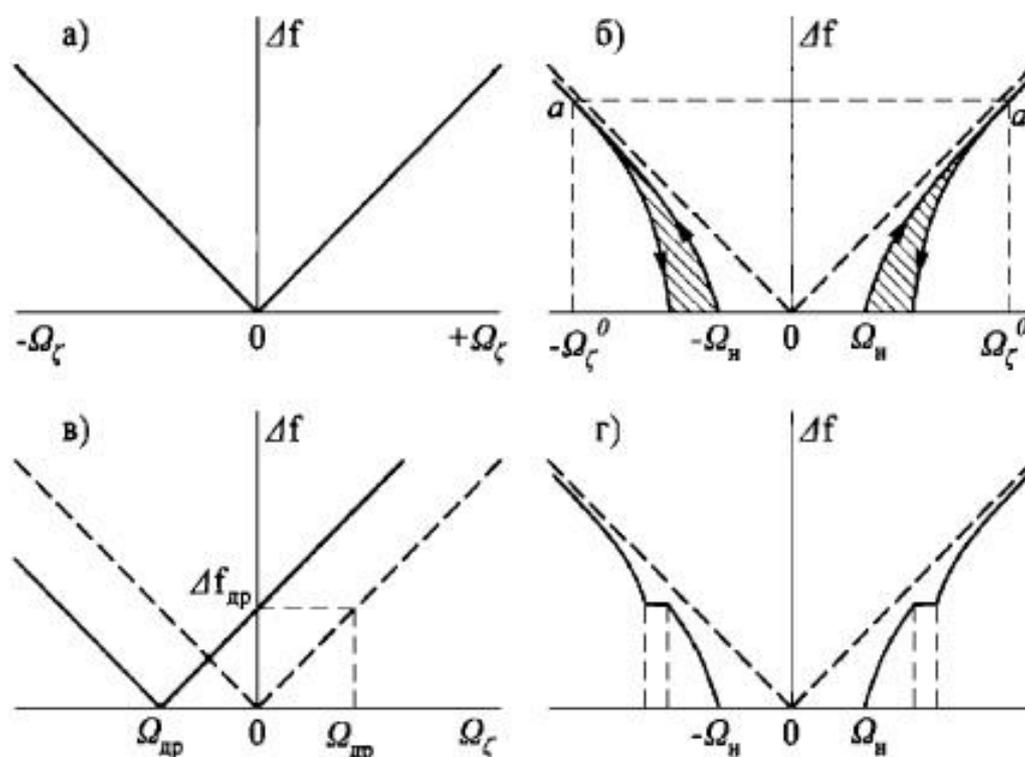
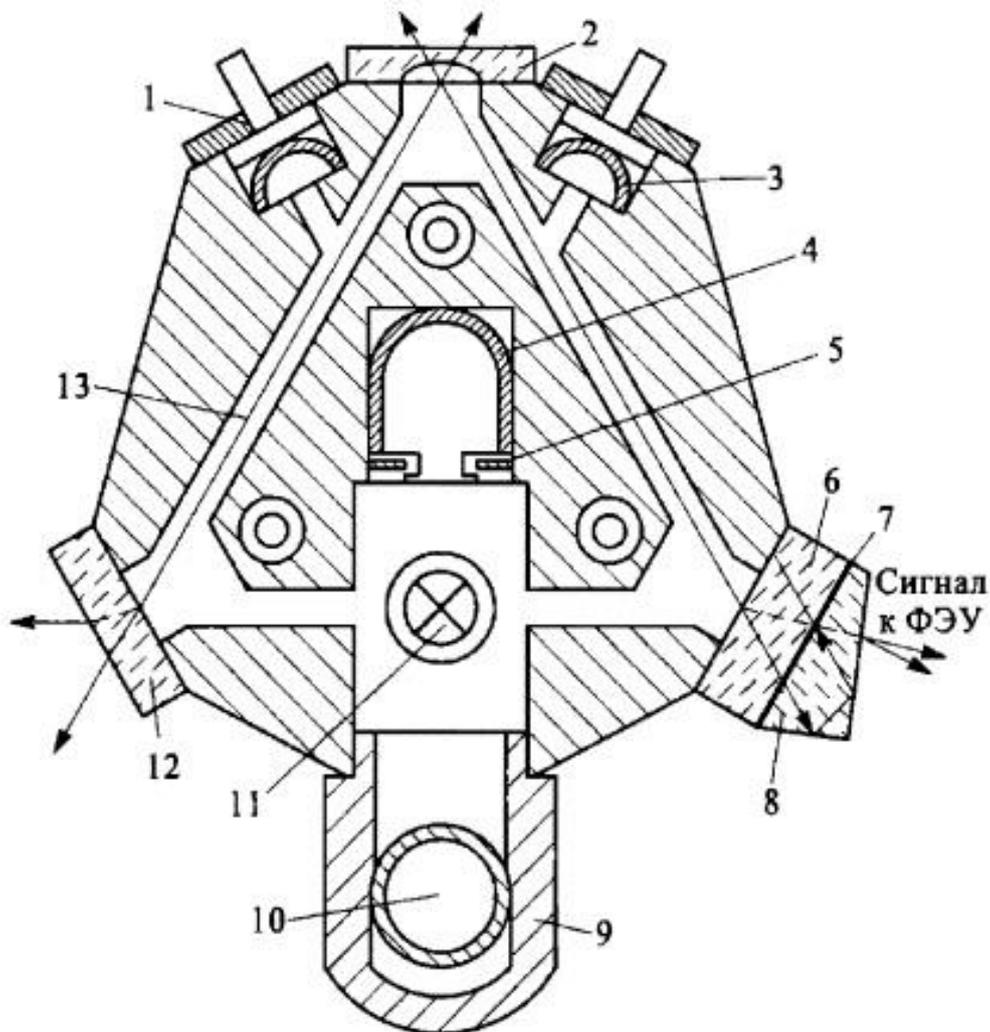


Рис. 95. Выходная характеристика ЛДУС

Для установления знака  $\Omega_\zeta$  используют два фотоприемника, смещенные друг относительно друга так, что возникает сдвиг фаз между сигналами  $0,25\varphi = 0,5\pi$ . По отставанию или опережению фаз первого и второго фотоприемника либо специальных призм (рис. 96) определяют с помощью логической схемы знак  $\Omega_\zeta$ .



**Рис. 96.** Конструктивная схема монолитного ЛДУС:

1 — гермоввод; 2 — сферическое зеркало; 3 — анод; 4 — катод; 5 — напыленный экран; 6 — зеркало, с которого снимают показания; 7 — устройство для расщепления луча; 8 — составная призма; 9 — трубка наполнения; 10 — газопоглотитель; 11 — диафрагма; 12 — плоское зеркало; 13 — канал в кварце для луча; ФЭУ — фотоэлектронный усилитель

Лазерный гироскоп может работать в режиме интегрирующего гироскопа. Если суммировать импульсы, частота следования которых пропорциональна  $\Delta f$ , то можно получить информацию об угле  $\Delta\psi$  поворота основания:

$$N_{\Sigma} = h \int_0^t \Omega_z(t) dt = h\Delta\psi,$$

где  $N_{\Sigma}$  — число импульсов за время  $t$  (при нулевых начальных условиях).

При определении выходной характеристики ЛДУС следует учитывать наличие энергетических связей между лучами, обусловленных обратным рассеиванием на элементах резонатора, оптической неоднородностью активной среды и др. Колебания при малых  $\Omega_{\zeta}$  происходят с близкими частотами, поэтому благодаря энергетическим связям встречных волн частоты колебаний сближаются ( $f_2 \rightarrow f_1$ ) и возникает синхронизация, при которой  $\Delta f = 0$ , несмотря на наличие угловой скорости основания  $\Omega_{\zeta} \leq \Omega_n$ ; здесь  $\Omega_n$  определяет зону ( $2\Omega_n$ ) нечувствительности ЛДУС (или зону «захвата»).

На рис. 95, б приведена фактическая выходная характеристика ЛДУС с учетом зоны гистерезиса (заштрихованная область), которая возникает вследствие неоднозначности энергетических связей волн. Гистерезис является причиной неоднозначности характеристики ЛДУС при возрастании и убывании  $\Omega_{\zeta}$ .

В целях устранения влияния зон нечувствительности и гистерезиса необходимо выбирать диапазон работы прибора в зоне линейности характеристики (на рис. 95, б в районе «рабочих» точек  $a$  и  $a'$ ). Для этого следует ввести дополнительное устройство, которое обеспечивает начальную угловую скорость, намного превышающую  $\Omega_n$ , например, поставить ЛДУС на платформу поворотного стола, вращающегося с постоянной угловой скоростью  $\Omega_n^0 > K_n \Omega_n$ , где  $K_n \approx 10 \dots 30$  — коэффициент запаса. Тогда характеристика ЛДУС будет ограничена линейным участком в диапазоне  $\Omega_n^0 - \Omega_{\zeta\max}$  и  $\Omega_n^0 + \Omega_{\zeta\max}$ . Применение постоянного вращения позволяет определить знак  $\Omega_{\zeta}$  без дополнительных устройств.

Однако этот способ требует дорогостоящего прецизионного поворотного стола, увеличивает габариты системы. Поэтому он нашел ограниченное применение (например, использование одного поворотного стола для блока трех ЛДУС морской системы навигации).

Наиболее распространена так называемая частотная подставка, осуществляющая колебания корпуса прибора, как правило, по гармоническому закону  $\psi = \psi_n \sin v_n t$ . При этом параметры колебаний подставки выбирают таким образом, что-

бы время прохождения зоны нечувствительности было мало. Тогда можно считать, что рабочая точка характеристики  $a$  мгновенно переходит в точку  $a'$  при смене знака ( $v_n \psi_n > > \Omega_{z\max} + K_n \Omega_n$ ). Подставка реализуется с помощью упругой подвески корпуса ЛДУС, которому с помощью электромагнитного возбудителя сообщают колебания заданной частоты; частоту  $v_n$  целесообразно выбирать равной частоте собственных угловых колебаний корпуса на упругом подвесе.

Преимуществом такой электромеханической подставки является простота конструкции наряду с возможностью получения высоких точностных характеристик. Применяют также магнитно-оптические подставки на магнитно-оптических невзаимных элементах, использующих ячейки Фарадея, невзаимные элементы, основанные на эффекте Френеля—Физо и др. [2]. Эффективная разность хода лучей обеспечивается за счет различных параметров среды при прохождении лучей в одну и другую стороны. Так, лучи света, поляризованные по кругу и помещенные в постоянное магнитное поле, имеют различные коэффициенты преломления (эффект Фарадея), что и вызывает их частотное смещение. Однако в связи с конструктивными и технологическими проблемами такие подставки не нашли широкого применения.

Наличие нулевого сигнала ЛДУС приводит к сдвигу его характеристик влево или вправо (рис. 95, *в*). Величину  $\Omega_{др} = \Delta f_{др}/h$  называют скоростью дрейфа нуля. С учетом  $\Omega_{др}$  характеристика (114) имеет вид

$$\Delta f = h(\Omega_z + \Omega_{др}) = h\Omega_z + h\Omega_{др}.$$

Причинами возникновения дрейфа ( $\Delta f_{др} \neq 0$  при  $\Omega_z = 0$ ) являются неодинаковые условия прохождения лучей 1 и 2 в результате невзаимного изменения коэффициентов преломления среды (эффект Френеля—Физо и др.). Изменение длины периметра (даже на  $0,01\lambda$ ) вследствие изменения температуры окружающей среды, нагрева корпуса газом, деформации приводит к значительному повышению  $\Omega_{др}$ . При изготовлении корпуса используют материалы с малым коэффициентом линейного расширения (ситалл, кервит, кварц). Однако

без принятия специальных мер нестабильность периметра  $L$ , например, призматического резонатора достигает  $(10 \dots 100)\lambda$ . Поэтому предусматривают активную стабилизацию периметра с помощью системы автоматического регулирования, управляющий сигнал которой определяется в соответствии с характерными точками кривой усиления активной среды и подается на устройство перемещения одного из зеркал (призм) резонатора.

Причиной появлений магнитного поля ЛДУС, создающего неодинаковые условия прохождения лучей 1 и 2, служат элементы частотной подставки, блока питания, внешние источники магнитного поля. Чувствительность к магнитным полям оценивается до значения  $0,1 \dots 1,0$  Гц/Э ( $1 \text{ Э} = 79,5775 \text{ А/м}$ ).

Для уменьшения влияния внешнего магнитного поля ЛДУС экранируют. Скорость дрейфа нуля определяют в зависимости от времени работы прибора в одном запуске (включении), от запуска к запуску. Стабильность скорости дрейфа нуля ЛДУС в запуске составляет  $10^{-4} \dots 10^{-1} \text{ }^\circ/\text{ч}$ .

Погрешность ЛДУС также определяется нестабильностью  $\Delta h$  масштабного коэффициента  $h$  и зависит от изменения периметра, нестабильности коэффициента преломления активной среды и др.

Значение  $h$  устанавливают экспериментально для конкретного прибора путем сравнения фиксированного угла поворота корпуса с числом импульсов его выходного сигнала; при  $h = 1,6 \dots 3,3 \text{ }''/\text{имп.}$  нестабильность  $\Delta h$  достигает  $10^{-6} \dots 10^{-4}$ .

Выходная характеристика ЛДУС зависит от условий эксплуатации: угловых колебаний, вибрации, изменения магнитного поля, температуры и т. д.

При совпадении частоты биений с частотами внешних возмущений возникают зоны параметрического резонанса и у характеристики  $\Delta f(\Omega_\zeta)$  появляются так называемые зоны нечувствительности в некотором диапазоне  $\Omega_\zeta$  (т. е. при изменении  $\Omega_\zeta$   $\Delta f = \text{const}$ ), или «полочки синхронизации» (рис. 95, *г*). Для уменьшения зон синхронизации можно приме-

нять колебания подставки, например, по закону  $\dot{\psi}(t) = \dot{\psi}_1 \cos v_1 t + \dot{\psi}_2 \cos v_2 t$ . Чтобы снизить влияние вибрации, конструкцию прибора делают жесткой; иногда применяют специальную систему амортизации.

При приближенной оценке модели погрешности (скорости дрейфа) ЛДУС воспользуемся зависимостью [2] (без учета угловой скорости подставки)

$$\Delta f = h \sqrt{\Omega_{\zeta}^2 - \Omega_{\text{н}}^2},$$

где  $\Omega_{\text{н}}$  — половина зоны ( $2\Omega_{\text{н}}$ ) нечувствительности.

Введя обозначение  $\rho = \frac{\Omega_{\text{н}}}{\Omega_{\zeta}} \ll 1$ , получим

$$\Delta f \approx h\Omega_{\zeta}(1 - 0,5\rho^2).$$

При учете  $\Omega_{\text{др}} \neq 0$   $\rho = \frac{\Omega_{\text{н}}}{\Omega_{\zeta} + \Omega_{\text{др}}}$ . Тогда

$$\Delta f \approx h(\Omega_{\zeta} + \Omega_{\text{др}})(1 - 0,5\rho^2).$$

При малой нестабильности масштабного коэффициента ( $\Delta h \ll h$ ) и угловой скорости частотной подставки  $\Delta\Omega_{\text{п}}$

$$\Delta f \approx h(\Omega_{\zeta} + \Omega_{\text{др}})(1 - 0,5\rho^2) + \Delta h(\Omega_{\zeta} + \Omega_{\text{др}}) + (h + \Delta h)\Delta\Omega_{\text{п}}.$$

Пренебрегая величинами второго порядка малости, получим

$$\Delta f \approx h\Omega_{\zeta} + \Delta h\Omega_{\zeta} + h\Omega_{\text{др}} - 0,5\rho\Omega_{\text{н}} + \Delta h\Omega_{\text{п}}.$$

Модель погрешности ЛДУС запишем в традиционной форме ССП гироскопа:

$$\Delta\Omega_{\zeta} = \Omega_0 + \Omega_{\text{др}} + \Omega'_{\text{н}} + \Delta\Omega_{\text{п}}, \quad (115)$$

где  $\Omega_0 = (\Delta h/h)\Omega_{\zeta}$  — составляющая погрешности, вызванная нестабильностью масштабного коэффициента;  $\Omega'_{\text{н}} = |0,5\rho\Omega_{\text{н}}|$  — составляющая погрешности, определяемая размером зоны захвата.

Модель (115) может быть использована для приближенной оценки точности ЛДУС. На рис. 96 приведена конструктивная схема ЛДУС, выполненного из монокристаллического кварца.

## 2. Уравнения движения двухстепенного гироскопа

В интегрирующем гироскопе (ИГ), построенном на базе двухстепенного гироскопа, гироскопический момент, вызванный угловой скоростью основания, уравнивается демпфирующим моментом. Первые ИГ, спроектированные до 50-х годов XX в., имели пневмодемпферы, которые обладали нестабильными характеристиками по демпфированию и не позволяли создать точные приборы.

Поэтому наибольшее распространение получили поплавковые интегрирующие гироскопы (ПИГ); автором первого патента на такой гироскоп (1943 г.) является профессор Ткачев.

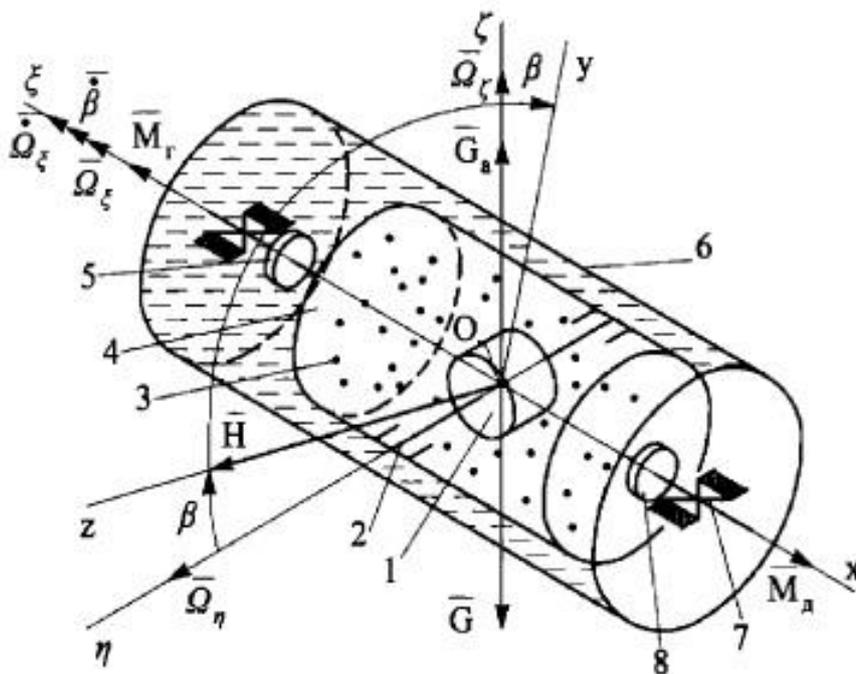


Рис. 63. Схема ПИГ:

1 — гидродвигатель (гиромотор); 2 — главные опоры гироскопа — опоры ротора; 3 — газовая среда (5 % He, 95 % H<sub>2</sub>); 4 — корпус поплавка; 5 — датчик угла; 6 — корпус прибора; 7 — опора поплавка; 8 — датчик момента

В соответствии с рис. 63 гироскопический момент  $M_g = H\Omega_z \cos\beta$  уравновешивается демпфирующим моментом  $M_d = D\dot{\beta}$ ; при  $\beta \rightarrow 0$

$$D\dot{\beta} = H\Omega_z.$$

Проинтегрировав это уравнение, получим (при нулевых постоянных интегрирования)

$$\beta = \frac{H}{D} \int \Omega_z(t) dt = i\psi,$$

где  $i = \frac{H}{D}$  — передаточное число ИГ;  $\psi$  — угол поворота основания (объекта).

Выходное напряжение ИГ

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{ДУ}} i \psi = i' \psi,$$

где  $K_{\text{ДУ}}$  — крутизна выходной характеристики ДУ;  $i' = iK_{\text{ДУ}}$ .

Нестабильность передаточного отношения  $i'$  ИГ характеризуется зависимостью

$$\frac{\Delta i'}{i'} = \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta K_{\text{ДУ}}}{K_{\text{ДУ}}}.$$

Основная причина неустойчивости выходной характеристики ИГ — изменение удельного демпфирующего момента  $D$ , который во многом зависит от вязкости поддерживающей жидкости. Для поплавкового гироскопа

$$D = \frac{2\pi r^3 l}{981\delta} \mu,$$

где  $r, l$  — радиус и длина поплавка;  $\delta \approx 0,1$  мм — зазор (см. рис. 20);  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости.

Используют «тяжелые» жидкости с плотностью  $\rho = 1,9...2,4$  г/см<sup>3</sup>. Вязкость  $\mu$  зависит от температуры; при 75...85 °С ее значение близко к постоянному. Поэтому, как правило, применяют систему термостатирования прибора, обеспечивающую стабильность поддержания температуры жидкости с точностью до 0,1...0,01 °С. Сильфон обеспечивает давление на жидкость при изменении температуры (см. рис. 20).

Поскольку сила  $G_a$  практически разгружает опоры от нагрузки  $G$ , то остаточная плавучесть  $\Delta G = G_a - G$  весьма ма-

ла. Основной нагрузкой на опору поплавкового гиросузда остается гироскопический момент  $H\Omega_\xi$ . Это позволяет применять камневые опоры, виброопоры и магнитные подвесы, которые обеспечивают малые возмущающие моменты. В свою очередь это дает возможность достичь точной балансировки гиросузда, которую осуществляют в два этапа — на воздухе и в жидкости. Балансировка обеспечивает положение центра масс и центра давления в т.  $O$  (на оси  $Ox$ ). В качестве гиромотора применяют синхронный гистерезисный двигатель с частотным управлением, который обеспечивает  $H = \text{const}$  (с точностью до  $10^{-4} \dots 10^{-5}$ ).

Запишем уравнение движения ПИГ (см. рис. 63), пренебрегая центробежным инерционным моментом:

$$A_0(\ddot{\beta} + \dot{\Omega}_\xi) + D\dot{\beta} - H(\Omega_z \cos \beta - \Omega_\eta \sin \beta) + M_x = 0, \quad (73)$$

где  $A_0 = A + A_1$  — приведенный момент инерции поплавок с гиромотором ( $A_1$  — момент инерции поплавок относительно оси  $Ox$ );  $M_x$  — внешний момент.

После преобразований уравнения (73) получим

$$A_0\ddot{\beta} + D\dot{\beta} = H\Omega_z \cos \beta - H\Omega_\eta \sin \beta - A_0\dot{\Omega}_\xi - M_x. \quad (74)$$

Методические погрешности, связанные с наличием  $\Omega_\eta$  и  $\dot{\Omega}_\xi$ , малы. Погрешность, вызванная с действием возмущающих моментов, определяется из очевидного соотношения  $H\Omega_{z\min} > M_x^{\text{вп}}$ . Эту погрешность определяют как собственную скорость прецессии ИГ:

$$\omega_{\text{ССП}} = \frac{M_x^{\text{вп}}}{H}.$$

Модель погрешности ИГ от перегрузки  $n$  записывается в соответствии с методикой, изложенной выше (см. выражение (41)):

$$\omega_{\text{ССП}}(n) = \omega_0 + \omega_1(g)n + \omega_2(g^2)n^2 + \dots$$

При более точных расчетах  $\omega_{\text{ССП}}(n)$  модель может быть расширена до 12 составляющих и более [2].

Найдем передаточную функцию  $W(s)$  ИГ [2], характеризующую отношения выходной величины  $\beta$  к выходной величине



но иллюстрируется упругой связью (в виде пружин) с приведенной угловой жесткостью  $K_\alpha$ . Гироскопический момент  $H\dot{\beta}$ , действующий на упругую связь (опору), вызывает отклонения по углу  $\alpha$  и уравнивается упругим моментом  $K_\alpha\alpha$ :

$$H\dot{\beta} = K_\alpha\alpha. \quad (75)$$

Уравнения движения ИГ запишем в соответствии с (74) при  $M_x = 0$ ,  $\dot{\Omega}_\xi = 0$ ,  $\Omega_\eta = 0$ ,  $\beta = 0$  и с учетом угловой скорости  $\dot{\alpha}$  (см. рис. 64):

$$A_0\ddot{\beta} + D\dot{\beta} = H(\Omega_\zeta - \dot{\alpha}). \quad (76)$$

Определив из равенства (75)  $\dot{\alpha} = \frac{H}{K_\alpha}\ddot{\beta}$ , получим

$$\left(A_0 + \frac{H^2}{K_\alpha}\right)\ddot{\beta} + D\dot{\beta} = H\Omega_\zeta.$$

Постоянная времени  $T' = \frac{A_0K_\alpha + H^2}{K_\alpha D} > T = \frac{A_0}{D}$ , возрастает, следовательно, нежесткость конструкции ведет к увеличению динамических погрешностей ИГ.

Определим нагрузку  $F$  на опоры. Гироскопический момент  $H\dot{\beta}$  уравнивается моментом реакции опор  $FL = H\dot{\beta}$ . Отсюда  $F_{\max} = \frac{H}{L}\dot{\beta} = \frac{Hi}{L}\Omega_{\xi\max}$ , где  $L$  — расстояние между опорами.

Видно, что с увеличением передаточного отношения  $i$  повышается нагрузка на опоры, поэтому для ПИГ  $i \leq 8 \dots 10$ , для ИГ космических ЛА (КЛА)  $i \leq 50 \dots 100$ .

Отметим, что расчет погрешности ИГ имеет различия в зависимости от применения ИГ в «свободном» (рис. 65, а) и «замкнутом» (рис. 65, б) режимах работы системы.

Запишем уравнение движения ИГ (74) для свободного (разомкнутого) режима в виде

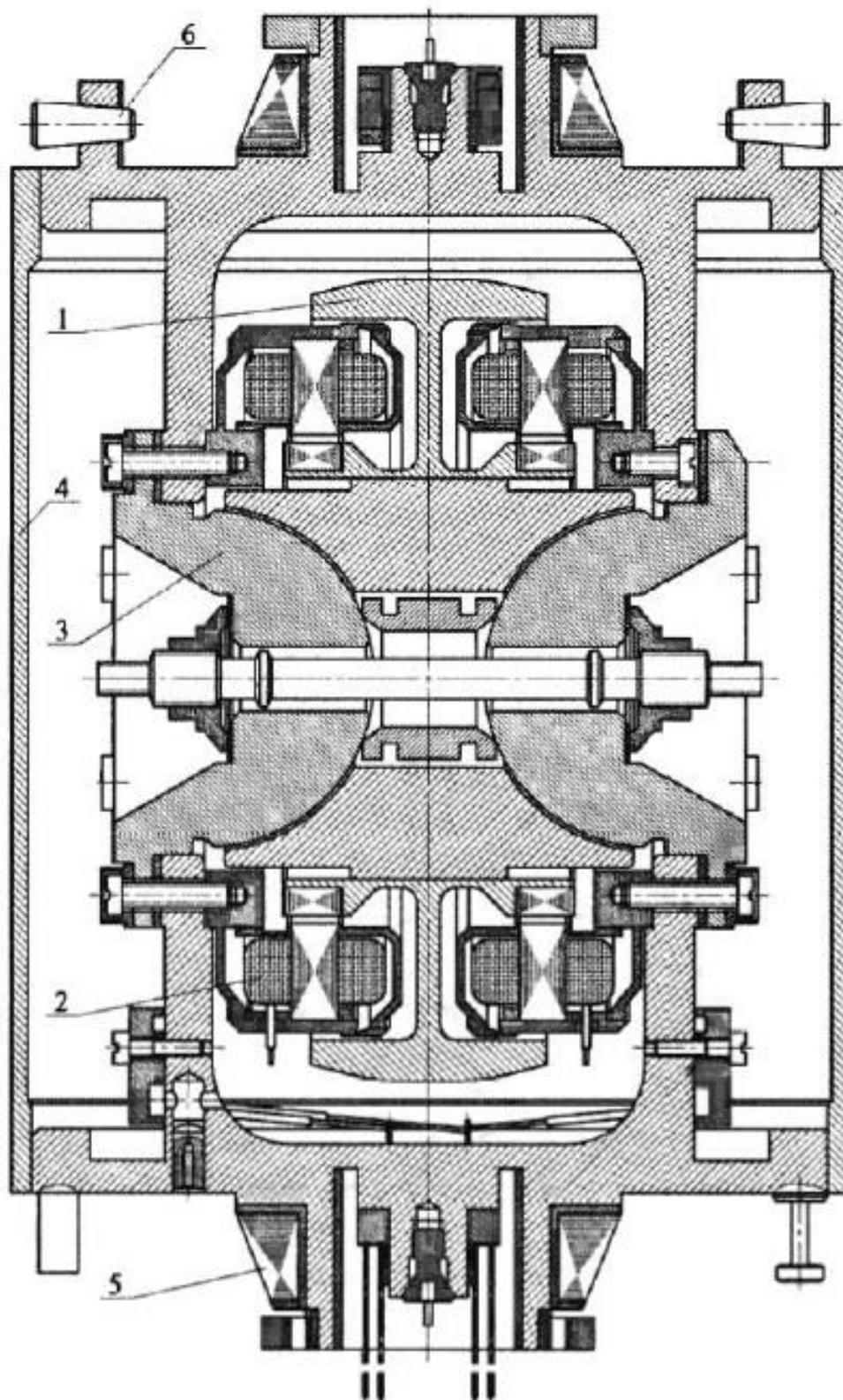
$$D\dot{\beta} = H\Omega_\zeta - M_x. \quad (77)$$

Например, при действии на КЛА (см. рис. 65, а) возмущающего момента  $M_\zeta$   $\dot{\beta} = \frac{M_\zeta}{H}$ .

Определим погрешность  $\Delta\psi$  стабилизации КЛА по углу  $\psi = \Omega_\zeta t$ :

$$\Delta\psi = \omega_{\text{ссп}}t + \frac{M_\zeta}{iH}t. \quad (78)$$





**Рис. 66. Гироузел ПИГ:**

1, 2 — ротор и статор гиromотора; 3 — полусферическая газодинамическая опора; 4 — поплавок; 5 — ротор магнитного подвеса; 6 — баланси́ровочный винт

Погрешность (78) имеет две составляющие, связанные с  $\omega_{\text{ССП}} = \frac{M_x}{H}$  и действием момента  $M_z$ , которые нарастают со временем. Для схемы одноосного гиросtabilизатора (см. рис. 65, б), состоящей из датчика угла ДУ, усилителя У и двигателя разгрузки ДР, в установившемся режиме, когда внешний момент  $M_{y1}$  полностью уравнивается моментом  $M_p = K_p \beta = M_{y1}$  разгрузки (здесь  $K_p$  — крутизна характеристики системы разгрузки), погрешность системы стабилизации запишем, интегрируя уравнение (77):

$$D\beta = H\Delta\alpha - M_x t,$$

откуда

$$\Delta\alpha = \omega_{\text{ССП}} t + \frac{M_{y1}}{iK_p}, \quad (79)$$

где  $\beta = \frac{M_{y1}}{K_p}$ .

При замкнутом режиме работы погрешность, связанная с действием момента  $M_{y1}$  на платформу (объект стабилизации), не зависит от времени и уменьшается с увеличением  $K_p$  (ср. с выражением (78)).

ПИГ — сложный по конструкции и дорогостоящий прибор, но именно его применение позволило разработать трехосные индикаторно-силовые гиросtabilизаторы высокой точности — до  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  °/ч. Например, только на базе ПИГ созданы гиросистемы, позволившие обеспечить точное наведение баллистических ракет на расстояния до  $10^4$  км, высадку астронавтов на Луну, полеты дальней авиации. На рис. 66 дана одна из конструктивных схем гиروزла ПИГ с газодинамической опорой ротора гироскопа.