

1. Модель погрешностей лазерного ДУС

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 ( $v_{\Pi}\Psi_{\Pi} > \Omega_{\zeta\max} + K_{\Pi}\Omega_{\Pi}$ ). Подставка реализуется с помощью упругой подвески корпуса ЛДУС, которому с помощью электромагнитного возбудителя сообщают колебания заданной частоты; частоту  $\nu_{\Pi}$  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  $\Omega_{\text{др}} = \Delta f_{\text{др}}/h$  называют скоростью дрейфа нуля. С учетом  $\Omega_{\text{др}}$  характеристика (114) имеет вид

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

Причинами возникновения дрейфа ( $\Delta f_{\text{др}} \neq 0$  при  $\Omega_{\zeta} = 0$ ) 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  $\Omega_{\text{др}}$ . 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  $10^{-4} \dots 10^{-1}$  °/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  $h = 1,6 \dots 3,3$  "/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, з). Для уменьшения зон синхронизации можно приме-

нять колебания подставки, например, по закону  $\psi(t) = \psi_1 \cos v_1 t + \psi_2 \cos v_2 t$ . 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 монолитного кварца.

**НУЖНО УТОЧНИТЬ У ИГОРАЖА**

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 гиросузда 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:

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

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

После преобразований уравнения (73) получим

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

Методические погрешности, связанные с наличием  $\Omega_\eta$  и  $\dot{\Omega}_\xi$ , малы. Погрешность, вызванная с действием возмущающих моментов, определяется из очевидного соотношения  $H\Omega_{\zeta \min} > M_x^{\text{вп}}$ . 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



ентом усиления  $K_{yc}$ . Выходное напряжение усилителя  $U_{yc} = K_{yc}K_{ду}\beta$  является причиной возникновения момента

$$M_{дм} = K_{дм}i_{дм} = K_{дм} \frac{U_{yc}}{R_c},$$

где  $K_{дм}$  — крутизна характеристики ДМ по току;  $i_{дм}$  — ток в обмотках ДМ;  $R_c = R + R_{дм} + R_t$  — суммарное сопротивление ( $R$  — выходное термостабильное сопротивление;  $R_{дм}$  — сопротивление обмоток ДМ;  $R_t$  — переменное сопротивление в цепи ДМ, которое обеспечивает условие  $R_{дм}(t_{окр}) + R_t(t_{окр}) = \text{const}$  при изменении температуры окружающей среды  $t_{окр}$ ).

Угол  $\beta$  увеличивается до тех пор, пока гироскопический момент  $M_g$  не уравновесится моментом  $M_{дм}$  (установившийся режим работы ДУС):

$$K_{дм}i_{дм} = H\Omega_z \cos \beta,$$

т. е. по току  $i_{дм}$  можно судить о величине и направлении  $\bar{\Omega}_z$  объекта:

$$i_{дм} \approx \frac{H}{K_{дм}} \Omega_z.$$

Выходную информацию ДУС снимают с термостабильного сопротивления  $R$ :

$$U_{вых} = Ri_{дм} = \frac{HR}{K_{дм}} \Omega_z = h\Omega_z,$$

где  $h = \frac{HR}{K_{дм}}$  — чувствительность ДУС с электропружиной.

Относительная нестабильность чувствительности

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta K_{дм}}{K_{дм}}.$$

Выберем нестабильность сопротивления  $10^{-4} \%$ , для синхронного гистерезисного двигателя с частотным управлением  $\frac{\Delta H}{H} \cdot 100 \approx 10^{-4} \%$ , при принятии соответствующих инженерных решений  $\frac{\Delta K_{дм}}{K_{дм}} \cdot 100 \approx 10^{-4} \%$ , т. е. суммарная нестабильность равна  $3 \cdot 10^{-4} \%$ . Таким образом, с помощью схемы ДУС

с электропружиной можно создать прецизионный прибор (ср. со схемой ДУС с механической пружиной).

ДУС с цифровым выходом информации строятся, как правило, на базе ДУС с электропружиной. При этом обратная связь может быть цифровой и аналоговой (см. рис. 68); в последнем случае вводят аналогово-цифровое преобразование сигнала.

Определим приведенную угловую жесткость электропружины. Момент ДМ

$$M_{\text{ДМ}} = \frac{K_{\text{ДМ}} U_{\text{ус}}}{R_c} = \frac{K_{\text{ДУ}} K_{\text{УС}} K_{\text{ДМ}}}{R_c} \beta = K \beta,$$

где  $K = \frac{K_{\text{ДУ}} K_{\text{УС}} K_{\text{ДМ}}}{R_c}$  — приведенная угловая жесткость электропружины.

Составим уравнения движения двухстепенного ДУС. Определим инерционные и внешние моменты, действующие вокруг оси  $Ox$ :

1) момент инерции гиروزла как твердого тела  $(A + A_1)(\dot{\Omega}_\xi + \ddot{\beta}) = A_0(\dot{\Omega}_\xi + \ddot{\beta})$ , где  $A$  — экваториальный момент инерции ротора;  $A_1$  — момент инерции рамки гироскопа относительно оси  $Ox$ ;  $\dot{\Omega}_\xi$  — угловое ускорение объекта относительно оси  $Ox$ ;  $A_0 = A + A_1$  — приведенный момент инерции гиروزла относительно  $Ox$ ;

2) центробежный момент инерции гиروزла  $M_{\text{ц}} = -C_0 \Omega_z \Omega_y + B_0 \Omega_y \Omega_z = -(C_0 - B_0) \Omega_y \Omega_z$ , где  $C_0 = C + C_1$ ,  $B_0 = A + B_1$  — приведенные моменты инерции гиروزла относительно осей  $Oy$  и  $Oz$  ( $B_1$ ,  $C_1$  — моменты инерции рамки относительно осей  $Oy$  и  $Oz$ ;  $C$  — полярный момент инерции ротора);  $\Omega_y = \Omega_\zeta \cos \beta - \Omega_\eta \sin \beta$ ;  $\Omega_z = \Omega_\eta \cos \beta + \Omega_\zeta \sin \beta$  — проекции угловой скорости на оси  $Oy$  и  $Oz$  (см. рис. 68);

3) гироскопический момент  $M_\zeta = -H \Omega_y = -H \Omega_\zeta \cos \beta + H \Omega_\eta \sin \beta$ ;

4) моменты внешних сил  $M_x = M_{\text{пр}} + M_{\text{д}} + M_x^{\text{вп}}$ , где  $M_{\text{пр}} = K \beta$  — упругий момент;  $M_{\text{д}} = D \dot{\beta}$  — демпфирующий момент;  $M_x^{\text{вп}}$  — вредный момент (момент сил трения в опорах

гироузла, момент разбалансировки, момент магнитной природы, момент токоподводов и т. д.).

Уравнение движения ДУС

$$A_0(\ddot{\beta} + \dot{\Omega}_\xi) - (C_0 - B_0)\Omega_y\Omega_z - H\Omega_z \cos \beta + H\Omega_\eta \sin \beta + D\dot{\beta} + K\beta + M_x^{\text{вп}} = 0.$$

Пренебрегая центробежным моментом инерции, получим

$$A\ddot{\beta} + D\dot{\beta} + K\beta = H\Omega_z \cos \beta - H\Omega_\eta \sin \beta - A_0\dot{\Omega}_\xi - M_x^{\text{вп}}. \quad (81)$$

Статическое решение уравнения (при  $\Omega_\eta = 0$ ,  $\dot{\Omega}_\xi = 0$ ,  $M_x^{\text{вп}} = 0$ ) и малых  $\beta$ :  $\beta = \frac{H}{K}\Omega_z \cos \beta \approx \frac{H}{K}\Omega_z$ , что совпадает с выражением (80).

Перекрестная угловая скорость  $\Omega_\eta$  является причиной погрешности ДУС:

$$\beta \approx \frac{H}{K + H\Omega_\eta}\Omega_z \approx \frac{H}{K}\Omega_z - \frac{H^2\Omega_\eta\Omega_z}{K(K + H\Omega_\eta)}.$$

Погрешность измерения, вызванная  $\Omega_\eta$ , исчезает при  $\beta \rightarrow 0$  или при применении кинематически связанных (с передаточным отношением  $i = 1$ ) двух гироскопов с разнонаправленными кинетическими моментами  $H_1 = H_2 = H$  [2].