

1. Инструментальные погрешности ДУС

Стр. 125 (124)

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 $M_\zeta = -C_0 \Omega_z \Omega_y + B_0 \Omega_y \Omega_z = -(C_0 - B_0) \Omega_y \Omega_z$, 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 $M_\Gamma = -H \Omega_y = -H \Omega_\zeta \cos \beta + H \Omega_\eta \sin \beta$;

4) моменты внешних сил $M_x = M_{\text{пр}} + M_d + M_x^{\text{БР}}$, где $M_{\text{пр}} = K \beta$ — упругий момент; $M_d = D \dot{\beta}$ — демпфирующий момент; $M_x^{\text{БР}}$ — 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 β : $\beta = \frac{H}{K}\Omega_z \cos \beta \approx \frac{H}{K}\Omega_z$, что совпадает с выражением (80).

Перекрестная угловая скорость Ω_η 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 Ω_η , 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].

Погрешность $\frac{A_0\dot{\Omega}_\xi}{K}$, вызванная ускорением $\dot{\Omega}_\xi$, обычно мала. Если имеется информация об угловом ускорении $\dot{\Omega}_\xi$ (например, при наличии ДУС), то возможна компенсация этой погрешности при обработке информации ДУС.

В случае действия вредных моментов измерение Ω_z может быть осуществлено при очевидном условии: $H\Omega_{z\text{min}} \cos \beta > M_x^{\text{вп}}$.

Величину $\Omega_{z\text{min}}$ называют порогом чувствительности ДУС; при малых β

$$\Omega_{z\text{min}} = M_x^{\text{вп}}/H. \quad (82)$$

Равенство (82) имеет вид формулы ССП гироскопа. Если в качестве опор гироузла используют прецизионные шарикоподшипники, то вредные моменты определяются в основном

моментами сил трения, разбалансировки, токоподводов. Тогда модель погрешности ДУС при действии линейных перегрузок можно определить формулой (41). Для таких ДУС обычно $\omega_0 = 0,5 \dots 5,0$ °/ч. В целях уменьшения моментов сил трения применяют поплавковые двухстепенные гироскопы (см. рис. 20). В этих приборах архимедова сила разгружает опоры гиросузы, в качестве которых применяют камневые или виброопоры, магнитные подвесы. Основной нагрузкой на опоры поплавкового гироскопа являются гироскопический момент $H\Omega_\xi$ и остаточная плавучесть $\Delta G = G - G_a$, которые составляют малую величину. Это позволяет добиться высокой точности для поплавковых гироскопов (до $10^{-1} \dots 10^{-3}$ °/ч). Зазор $\delta \approx 1$ мм, что на порядок больше значения δ ПИГ.

Выше рассмотрены так называемые статические погрешности; при этом погрешности, вызванные Ω_ζ и $\dot{\Omega}_\xi$, относят к методическим, а погрешности, которые связаны с нестабильностью чувствительности, вредными моментами, — к инструментальным, подчеркивая их зависимость от конструкции и технологии изготовления гиросприбора.

Определим динамические погрешности ДУС, анализируя уравнение $A_0\ddot{\beta} + D\dot{\beta} + K\beta = H\Omega_\zeta$, которое приведем к стандартному виду:

$$\ddot{\beta} + 2\xi\omega_0\dot{\beta} + \omega_0^2\beta = \frac{H}{A_0}\Omega_\zeta, \quad (83)$$

где $\omega_0 = \sqrt{K/A_0}$ — собственная частота незатухающих колебаний; $\xi = \frac{D}{2A_0\omega_0}$ — относительная степень затухания.

Пусть $\Omega_\zeta = \Omega_{\zeta a} \sin \omega t$, где $\Omega_{\zeta a}$, ω — амплитуда и частота изменения угловой скорости соответственно. Решение уравнения (83) имеет вид

$$\beta = \lambda \frac{H}{K} \sin(\omega t - \varphi),$$

где $\lambda = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 - 4\xi^2\omega^2/\omega_0^2}}$ — коэффициент динамичности;

$\varphi = \arctg \frac{2\xi\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$ — сдвиг по фазе.

10. ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП

В конце XX в. распространение получил волновой твердотельный гироскоп (ВТГ). Основным элементом ВТГ является резонатор в форме полусферы (рис. 86, а и б) или цилиндра (рис. 86, в и г). Для прецизионных ВТГ полусферический резонатор и элементы его крепления (ножки) изготавливают из одной монолитной заготовки плавленого кварца (см. рис. 86, а). Модульная конструкция резонатора, состоящая из двух деталей — полусферы и ножки, имеет большие технологические погрешности. Крепление резонатора осуществляется с помощью ножек полусферы (см. рис. 86, а и б), упругих элементов (см. рис. 86, в и г), которые могут быть выполнены в форме архимедовой спирали или синусоиды. Для ВТГ средней точности резонаторы изготавливают из фтористой бронзы, дюралюминия с малым конструкционным демпфированием. При изготовлении резонаторов микромеханических гироскопов (см. рис. 86, в и г) используется кремниевая технология.

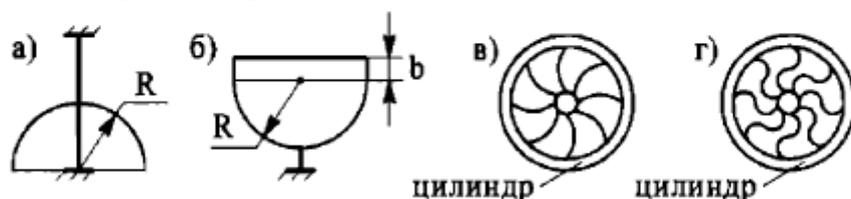


Рис. 86. Резонаторы ВТГ:

а — полусферический; б — полусферический с цилиндрической кромкой высотой b ; в, г — цилиндрические микромеханического гироскопа

Возбуждение осуществляется на собственной частоте $\omega_0 = \nu_0 = 2\pi f_0$. Для цилиндрического резонатора

$$f_0 = \frac{\nu_0}{2\pi} = l(K) \frac{h}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)\rho}}, \text{ Гц,}$$

где $l(K)$ — величина, которая зависит от формы колебаний кольца и характеризуется параметром K — половиной числа узловых меридианов (для основной первой формы (рис. 87) колебаний $K = 2$, тогда $l(K) = 2,62$); h, R — размеры кольца; E, μ, ρ — модуль упругости I рода, коэффициент Пуассона и плотность материала кольца. Для плавленого кварца $\mu \approx 0,18$.

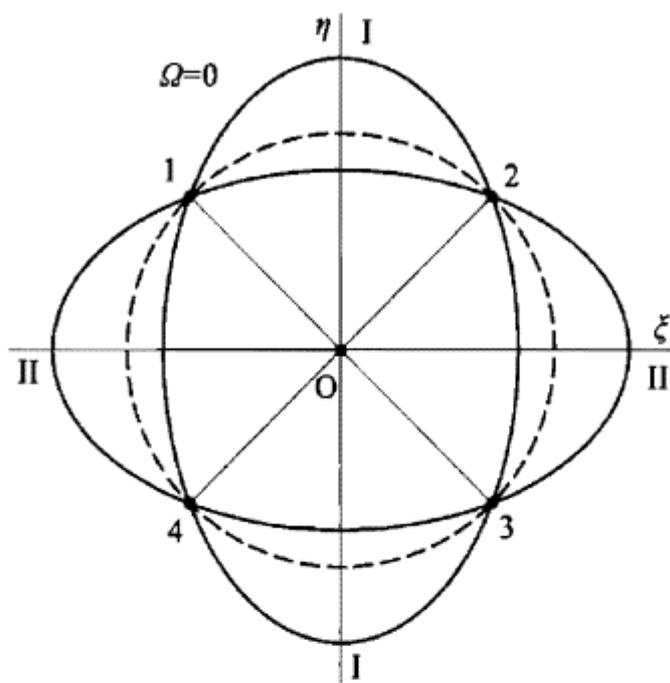


Рис. 87. Диаграмма вибрации ВТГ

Диаграмма вибрации (ДВ) резонатора показана на рис. 87. Колебания происходят по двум взаимно перпендикулярным осям I—I и II—II; точки 1—4 называют узлами ДВ, и их положение остается неизменным при колебании (сжатие и растяжение) резонатора. Основная задача — обеспечение равенства частот колебаний $f_{I-I} = f_{II-II}$ с высокой точностью. Вследствие неравномерного распределения масс, технологических погрешностей, различных свойств материала в направлениях I—I и II—II приведенные массы $m_I \neq m_{II}$, жесткости $c_I \neq c_{II}$ и коэффициенты демпфирования $d_I \neq d_{II}$. Собственные частоты незатухающих колебаний: $\omega_{0I} = \sqrt{\frac{c_I}{m_I}}$; $\omega_{0II} = \sqrt{\frac{c_{II}}{m_{II}}}$.

Технологически регулируемым параметром может быть масса $\Delta m = (m_I - m_{II}) \rightarrow 0$, которую изменяют при баланси-

ровке резонатора путем удаления масс с его кромки с помощью технологического лазера (иногда для этой цели на кромке резонатора выполняют специальные зубцы или используют торцевую поверхность резонатора). Тогда $\Delta f \rightarrow 0$.

Разные коэффициенты демпфирования d_I и d_{II} приводят к различию потерь энергии в направлении осей I—I и II—II, т. е. к «разнодобротности» резонатора, являющейся также причиной погрешности ВТГ. Для прецизионных ВТГ достигнута добротность кварцевого резонатора $(1 \dots 2) \cdot 10^7$. Напыление электродов систем возбуждения и съема информации существенно снижает добротность.

Возбуждение резонатора осуществляется двумя способами:

1) позиционное возбуждение (рис 88, а) при реализации режима ДУС (показано только два электрода);

2) параметрическое (рис. 88, б) с помощью кольцевого электрода (КЭ) при реализации режима ИГ.

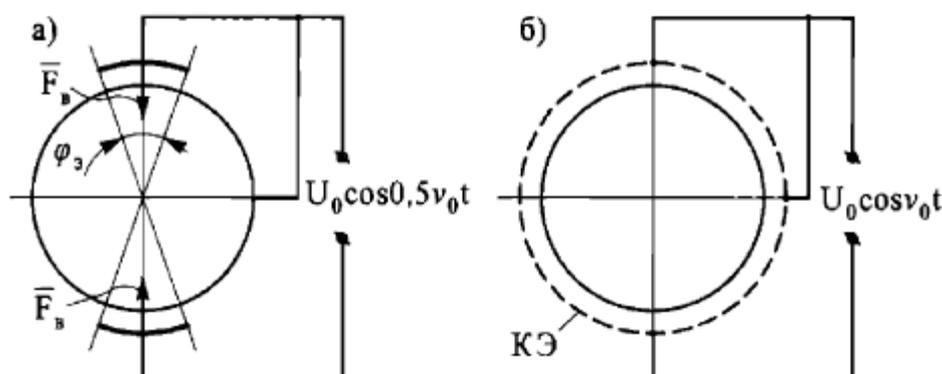


Рис. 88. Схемы возбуждения резонатора ВТГ:

а — позиционное; б — параметрическое

Для уменьшения влияния на точность ВТГ погрешностей формы применяют 16 электродов системы позиционного возбуждения. Режим параметрического возбуждения для снижения потребляемой мощности осуществляют после предварительного возбуждения резонатора с помощью системы позиционного возбуждения, т. е. включение кольцевого электрода «поддерживает» колебания резонатора, компенсируя потери.

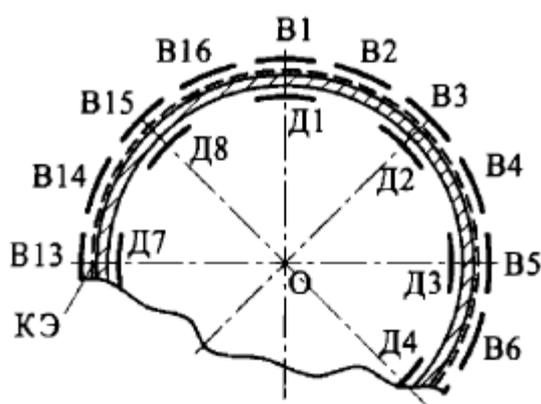


Рис. 89. Схема расположения электродов позиционного возбуждения В1—В16 и датчиков положения перемещения Д1—Д8 диаграммы вибрации ВТГ

Положение узловых точек определяют с помощью системы емкостных датчиков Д1—Д8. Система Д1—Д8 фиксирует угол φ , характеризующий положение ДВ относительно основания (рис. 89).

Рассмотрим принцип измерения угла ψ поворота основания с помощью ВТГ.

При колебании $r = r_0 \sin v_0 t$ резонатора относительная скорость $\dot{r} = r_0 v_0 \cos v_0 t$ приведенной массы m при наличии угловой

скорости $\Omega_z = \Omega$ основания является причиной возникновения кориолисова ускорения $W_k = 2\dot{r}\Omega = 2\Omega r_0 v_0 \cos v_0 t$.

Кориолисовы силы $F_k = mW_k$ сжимают упругий резонатор в областях 1 и 3 (рис. 90, а), растягивают его в областях 2 и 4 и образуют гироскопический момент

$$M_r = 2mr_0^2 v_0 \Omega \sin 2v_0 t.$$

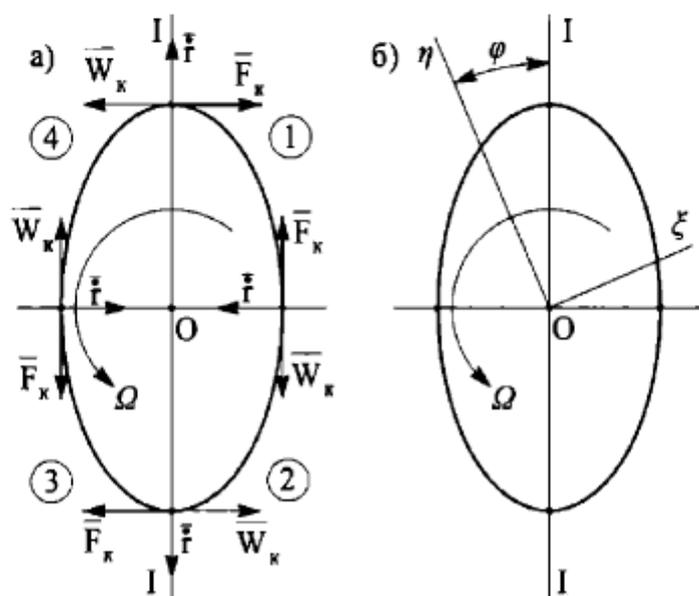


Рис. 90. К пояснению принципа работы ВТГ

Действие гироскопического момента уменьшает скорость вращения ДВ ($\omega_{ДВ} < \Omega$) вокруг оси OZ в инерциальном пространстве (упругая волна отстает от основания на угол φ). Параметр $\omega_{ДВ}$ называют скоростью прецессии (волны); для цилиндрического резонатора $\omega_{ДВ} = \frac{K^2-1}{K^2+1} \Omega$.

Для основной формы колебаний $K = 2$ и $\omega_{ДВ} = 0,6\Omega$.

Угол отставания ДВ (рис. 90, б)

$$\varphi = (\Omega - \omega_{ДВ})t = \frac{2}{K^2+1} \Omega t = \frac{2}{K^2+1} \psi = h' \psi.$$

При $K = 2$ $h' = \frac{2}{K^2+1} = 0,4$, следовательно, $\varphi = 0,4\psi$ — для идеального цилиндра, в случае полусферы $h' = 0,28$ и $\varphi \approx 0,28\psi$.

Расчет h' ведется с помощью представления резонатора как упругой оболочки или с применением методов анализа поведения упругой волны в резонаторе [3].

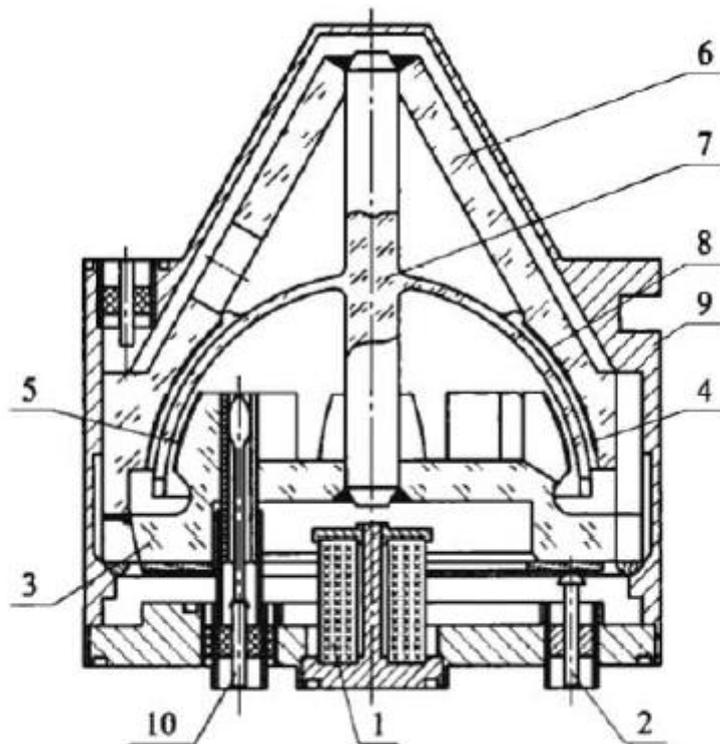


Рис. 91. Конструктивная схема ВТГ:

1 — встроенный насос; 2, 10 — гермовводы; 3, 6 — внутренний и наружный корпуса; 4 — электрод возбуждения; 5 — датчик положения; 7 — резонатор; 8 — КЭ; 9 — кожух

К электронным системам возбуждения, съема и обработки информации, балансировки и управления ДВ предъявляют жесткие требования по стабильности характеристик и надежности. При высокочастотных резонаторах удается разработать прецизионный ВТГ со скоростью дрейфа $0,01...0,001$ °/ч. На рис. 91 приведена конструктивная схема ВТГ с полусферическим резонатором.

В качестве недостатков прецизионных ВТГ отметим высокие стоимость и энергопотребление, а также значительные массогабаритные характеристики. Использование цилиндрических резонаторов в микромеханических гироскопах последний недостаток устраняет, но с потерей точности.

ВТГ имеет малое время готовности, длительный срок эксплуатации ($> 10^5$ ч), надежно работает в условиях высоких линейных и вибрационных перегрузок, радиации, при перепадах температур.

На базе ВТГ построены навигационные системы для КЛА, самолетов, вертолетов, тактических ракет, автомобилей.