

УДК 629.7.054

В. Н. Мельник

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

**Об особенностях динамики гироскопа
с многофазным подвесом в акустических полях**

Надійшла до редакції 19.09.02

Аналізується природа взаємодії акустичного випромінювання з гіроскопічними приладами керування РН, підвіс яких є поліагрегатною механічною системою. Розкрито механізм виникнення додаткових похибок вимірювань та визначено алгоритм їхнього прояву.

Оценка параметров полета широкого класса космических аппаратов проводится уже непосредственно на борту ракеты-носителя (РН) и потому вопросы точности построения опорной системы координат, связанной, например, с самолетом-носителем, приобретают исключительную важность.

В настоящее время в странах с развитой ракетно-космической индустрией все большее внимание уделяется созданию перспективных средств выведения космических аппаратов (КА) на заданные траектории движения, в частности разработке двухступенчатых авиационно-космических систем. Роль первой ступени в системах воздушного базирования выполняет дозвуковой самолет-носитель, создающий необходимые предпосылки для старта второй ступени с КА целевого назначения [8]. Вторая ступень реализуется либо РН, либо орбитальным самолетом.

Моменту активного отделения второй ступени предшествует и вывод на номинальный режим работы ее маршевых двигателей с одновременной подготовкой к работе навигационно-пилотажного оборудования. Наряду с прочими функциональными операциями, в это время строится система заданных ориентирных направлений, либо триортгональная система координатных осей.

Оставляя в стороне вопросы специфики самого маневра разделения и разведения, остановимся подробнее на еще малоизученном в настоящее вре-

мя явлении — влиянии прошедшего в подобъектальное пространство акустического излучения на приборы командно-измерительного комплекса РН, в частности на двухступенной гироскоп с гидростатическим подвесом подвижной части.

Достижения практической космонавтики расширили и вывели на качественно высшую ступень сложившиеся представления о характере рассеяния энергии звуковых полей в механических системах бортовой аппаратуры летательных аппаратов (ЛА), определили перспективы развития и совершенствования измерителей механических величин, а также очертили круг прикладных задач в приборостроении, требующих безотлагательного решения [3, 6].

Как оказалось, многие из новинок научно-технической мысли, позволявшие решать задачи синтеза инвариантных приборных систем в акустических полях низкого и среднего уровней (до 130 дБ), утратили свои приоритеты, а в некоторых случаях даже привели к ухудшению паспортных характеристик приборов, например в акустических полях высокой интенсивности. А именно такие режимы имеют место в натуральных условиях.

Все сказанное выше в полной мере относится к поплавковым гироскопам, конструктивно лишенным основных недостатков «сухих» приборов — значительных по величине (и главное, непостоянных) моментов сил сухого трения на выходной оси, а также недопустимо высокой чувствительности к

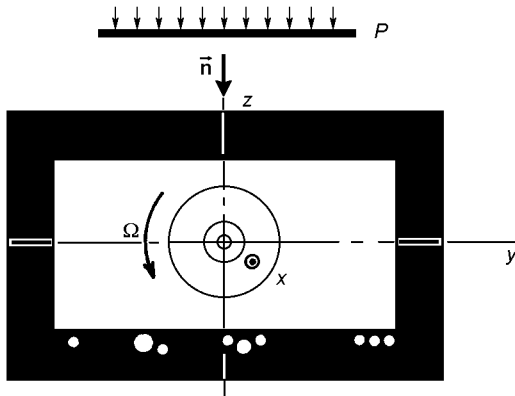


Рис. 1. Расположение пузырьков газа в плоскостях шпангоута датчика угловых скоростей унифицированного (ДУСУ)

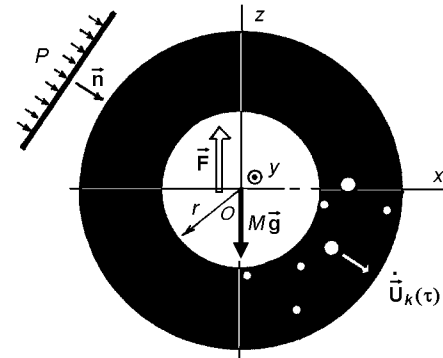


Рис. 2. О природе возникновения возмущающего момента при перемещении пузырьков газа в гидростатическом подвесе

ударным и вибрационным воздействиям [1, 2, 7, 9, 10]. Создание плавающих гироскопов явилось началом нового этапа развития не только гироскопической техники как таковой, но и развития навигационно-пилотажного оборудования подвижных объектов в целом. Поплавковые двухстепенные гироскопы (дифференцирующий и интегрирующий) нашли, например, широкое применение в блоках демпфирующих гироскопов ЛА, в системах управления движением РН, а также в качестве чувствительных элементов гироскопических стабилизированных платформ.

Объяснение факту увеличения погрешностей поплавковых гироскопов при работе в акустических полях 140—150 дБ и выше лежит, как говорится, на поверхности. Жидкофазная часть подвеса гироскопа, являясь лучшим проводником звука, чем газообразная, позволяет беспрепятственно проникнуть акустическому излучению внутрь прибора. Генерируемые в подвесе волновые процессы в своей совокупности приведут к погрешностям измерений. Таким образом, гироскоп оказывается практически незащищенным от звуковых полей в подообтекательном пространстве РН и взвешивающая жидкость, решая определенные задачи динамики прибора, по сути дела нивелирует саму идею поплавка в акустических полях свыше 140 дБ.

Проанализируем один из аспектов появления дополнительных погрешностей у поплавкового гироскопа. Речь идет о влиянии анизотропности жидкофазной части подвеса.

В натуральных условиях вследствие ударных воздействий, вибрации, температурных и других факторов (или их совокупности) в разделяющей попла-

вок и корпус прибора жидкости могут образовываться газообразные пузырьки, которые под действием акустического излучения будут перемещаться в сторону распространяющейся волны избыточного давления, т. е. в зону акустической тени (рис. 1).

Таким образом, будет нарушено исходное равновесие массовых и гидростатических сил, что приведет к появлению возмущающего момента относительно выходной оси.

В исходном состоянии силы веса гирузла Mg и архимедова сила F направлены по одной прямой в противоположные стороны и пересекают точку O — центр подвеса. Образование пузырьков газа, естественно, приведет к параллельному смещению вектора F и возникновению момента-помехи M^a (рис. 2):

$$M^a = \frac{M_0^0}{m_{ж}} g \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^n \left[m_k r \sin(\hat{n}, \hat{x}) + m_l r \sin(\hat{n}, \hat{x}) + m_k \int_0^t \dot{U}_k(\tau) \sin(\hat{n}, \hat{x}) d\tau + m_l \int_0^t \dot{U}_l(\tau) \sin(\hat{n}, \hat{x}) d\tau \right], \quad (1)$$

где M_0 — масса вытесненной поплавком жидкости, $m_{ж}$ — масса жидкости, разделяющей поплавок и корпус, m_k , m_l — массы пузырьков газа, n — число пузырьков газа в плоскости одного шпангоута, m — число шпангоутов, $\dot{U}_k(\tau)$, $\dot{U}_l(\tau)$ — скорости движения пузырьков газа под действием акустической волны, r — радиус поплавка, g — ускорение свободного падения.

Очевидно, что возникновение этого момента является наиболее опасным для интегрирующего гироскопа, так как дифференцирующий гироскоп с

прекращением действия звуковой волны возвращается пружиной в исходное положение.

Для определения закона движения $U_{k,l}(t)$ пузырьков газа, например, с учетом только трения о жидкость, можно воспользоваться интегро-дифференциальными соотношениями [4]:

$$m_k \ddot{U}_k(t) + \int_0^t [m_{k0} \delta_1(t - \tau) + \alpha] \ddot{U}_k(\tau) d\tau = \\ = m_k^0 [\delta_1(t) - \delta_1(t - 1)] + \\ + \int_0^t [m_{k0} \delta_1(t - \tau) + \alpha] \cdot [\delta_1(\tau) - \delta_1(\tau - 1)] d\tau, \quad (2)$$

где m_k^0 — масса вытесненной пузырьком жидкости; m_{k0} — присоединенные массы; α — коэффициент вязкого сопротивления при движении пузырька в жидкости; $\delta_1(t)$ — дельта-функция Дирака.

Применив одностороннее преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, из (2) определяем перемещения $U_k(p)$ в операторной форме:

$$U_k(p) = \frac{(m_k^0 + m_{k0})p + \alpha}{p^2 [(m_k + m_{k0})p + \alpha]} - \\ - \frac{e^{-p} [(m_k^0 + m_{k0})p + \alpha]}{p^2 [(m_k + m_{k0})p + \alpha]}. \quad (3)$$

Переходя к оригиналу, устанавливаем закон движения пузырька под действием звуковой волны:

$$U_k(t) = \frac{m_k^0 + m_{k0}}{m_k + m_{k0}} + \\ + \frac{m_k - m_k^0}{m_k + m_{k0}} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \nu_1^n \frac{t^{n+1} - (t-1)^{n+1}}{(n+1)!}, \quad (4)$$

для $t \geq 1$, где

$$\nu_1 = \frac{\alpha}{m_k + m_{k0}}.$$

В том случае, когда вязкое сопротивление незначительно по величине, а время T достаточно велико ($\nu_1 T \ll 1$), за период времени $1 \leq t \leq T$ перемещение пузырька определяется только первым слагаемым. Несложно определить и величину предельного перемещения. Достаточно положить $t \rightarrow \infty$. Тогда из формулы (4) имеем

$$U_{k\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} U_k(t) = \frac{m_k^0 + m_{k0}}{m_k + m_{k0}}. \quad (5)$$

Пусть по прошествии какого-либо промежутка времени акустическое излучение прекратилось. Тогда из формулы (1) с учетом выражения (5) имеем

$$M^a = \frac{M^0}{m_{ж}} g \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^n \left[(m_k + m_l) r \sin(\hat{n}, \hat{x}) + \right. \\ \left. + \left(m_k \frac{m_k^0 + m_{k0}}{m_k + m_{k0}} U_{k\infty} + m_l \frac{m_l^0 + m_{l0}}{m_l + m_{l0}} U_{l\infty} \right) \times \right. \\ \left. \times \sin(\hat{n}, \hat{x}) \right]. \quad (6)$$

Очевидно, что если пузырьки газа останутся на поверхности поплавка, формула (6) упростится:

$$M = \frac{M^0}{m_{ж}} g \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^n (m_k + m_l) r \sin(\hat{n}, \hat{x}). \quad (7)$$

Воспользовавшись уравнениями движения двухстепенного интегрирующего гироскопа с учетом соотношений (6), можно провести качественную и количественную оценки влияния пузырьков газа на показания прибора в условиях акустического нагружения [5]. Ограничимся рамками прецессионной теории:

$$b\dot{\beta} = -H\omega_z \cos\beta - H\omega_x \sin\beta + B\dot{\omega}_y + M + \\ + \frac{M^0}{m_{ж}} g \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^n \left\{ (m_k + m_l) r + \right. \\ \left. + m_k \left[t - \frac{1}{\alpha} (m_k - m_k^0) (1 - e^{-\nu_1 t}) \right] \delta_0(t) - \right. \\ \left. - m_k \left[t - 1 - \frac{1}{\alpha} (m_k - m_k^0) (1 - e^{-\nu_1(t-1)}) \right] \delta_0(t-1) + \right. \\ \left. + m_l \left[t - \frac{1}{\alpha} (m_l - m_l^0) (1 - e^{-\nu_1 t}) \right] \delta_0(t) - \right. \\ \left. - m_l \left[t - 1 - \frac{1}{\alpha} (m_l - m_l^0) (1 - e^{-\nu_1(t-1)}) \right] \times \right. \\ \left. \times \delta_0(t-1) \right\} \sin(\hat{n}, \hat{x}), \quad (8)$$

где $B = J_0 + J_y$, $R = J_0 + J_z - J_x$; величины J_x , J_y , J_z — суть моменты инерции поплавка, b — коэффициент демпфирования, J_0 — экваториальный момент инерции ротора, H — кинетический момент гироскопа, $\beta(t)$ — угол поворота подвижной части относительно выходной оси O_y ; ω_x , ω_y , ω_z — угловые скорости движения РН относительно своего центра масс, M — прочие моменты-помехи (дебаланса, трения, тяжения токоподводов и др.), $\delta_0(t)$ — функция Хевисайда, Oz и Oy — входная и выходная оси прибора соответственно.

Отсюда не представляет особого труда определить величину систематической составляющей дрейфа нуля интегрирующего гироскопа, представляющей наибольший интерес для практики:

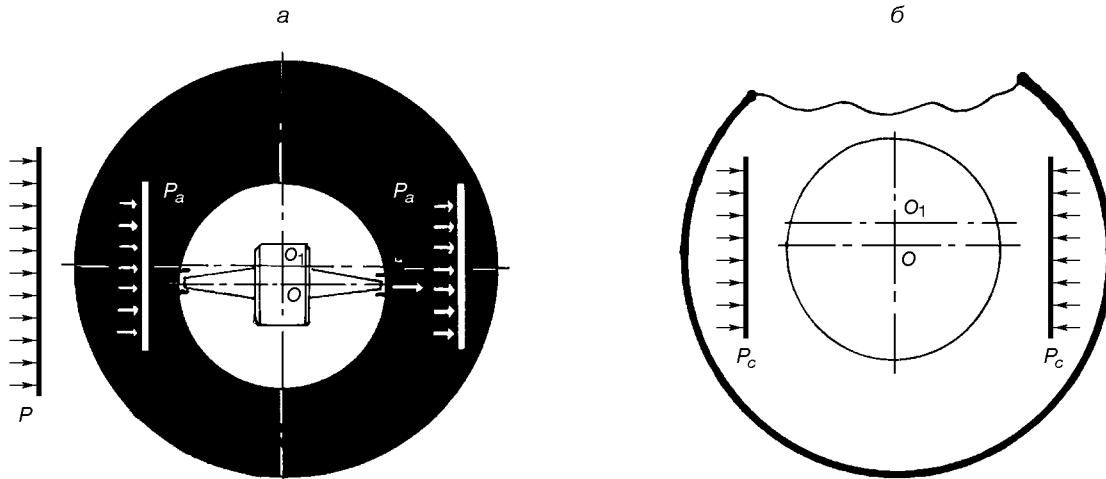


Рис. 3. Влияние парусности подвеса на дополнительную погрешность прибора. Точка O_1 находится на выходной оси прибора

$$\begin{aligned} \dot{\beta}_{\text{уст}} = \frac{M^a}{b} = \frac{M^0}{bm_{\text{ж}}} g \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^n \left\{ (m_k + m_l)r + \right. \\ \left. + m_k \left[t - \frac{1}{\alpha} (m_k - m_k^0)(1 - e^{-\alpha t}) \right] \delta_0(t) - \right. \\ \left. - m_k \left[t - 1 - \frac{1}{\alpha} (m_k - m_k^0)(1 - e^{-\alpha(t-1)}) \right] \delta_0(t-1) + \right. \\ \left. + m_l \left[t - \frac{1}{\alpha} (m_l - m_l^0)(1 - e^{-\alpha t}) \right] \delta_0(t) - \right. \\ \left. - m_l \left[t - 1 - \frac{1}{\alpha} (m_l - m_l^0)(1 - e^{-\alpha(t-1)}) \right] \times \right. \\ \left. \times \delta_0(t-1) \right\} \sin(\mathbf{n}, \hat{\mathbf{x}}). \end{aligned} \quad (9)$$

Первые четыре слагаемых в правой части выражения (8) известны. Это соответственно полезный момент, погрешность по перекрестной угловой скорости ω_x , погрешность от влияния углового ускорения $\dot{\omega}_y$ и другие моменты-помехи M . Последнее слагаемое, представленное в расширенном виде выражением (9), есть дополнительная погрешность, обусловленная появлением пузырьков газа в жидкофазной части подвеса, которые, взаимодействуя с акустической волной, приводят к дополнительной погрешности измерений.

В заключение отметим, что при сборке поплавков проходит тщательную статистическую и динамическую балансировку. Вместе с тем его геометрическая асимметричность относительно выходной оси (равно как и ненулевая плавучесть) приведет к возникновению дополнительных моментов-помех при работе в акустических полях.

Объяснение этому утверждению состоит в следующем. Нулевая плавучесть или геометрическая асимметрия (парусность) относительно выходной оси приведут к тому, что подвижная часть будет представлять собой физический маятник. Набегающая звуковая волна, а точнее ее антисимметричная составляющая P_a (рис. 3) —

$$P_a = \frac{1}{2} (P_{10} + P_{20} + P_{30}) \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_0 \mathbf{r})]$$

(здесь \mathbf{k}_0 — волновой вектор, P_{10} , P_{20} и P_{30} — соответственно давление в падающей, отраженной и прошедшей звуковых волнах, ω — круговая частота) — приведут к раскачке подвижной части и возникновению возмущающего момента M [3]:

$$\begin{aligned} M(P_a) = \rho \left[\int_s y \frac{\partial E}{\partial t} \cos(\mathbf{n}_z, \hat{\boldsymbol{\eta}}) ds + \right. \\ \left. + \int_s y \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \cos(\mathbf{n}_z, \hat{\boldsymbol{\eta}}) ds - \int_s z \frac{\partial E}{\partial t} \cos(\mathbf{n}_y, \hat{\boldsymbol{\eta}}) ds - \right. \\ \left. - \int_s z \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \cos(\mathbf{n}_y, \hat{\boldsymbol{\eta}}) ds \right], \end{aligned} \quad (10)$$

где $E(\eta)$ и $\varepsilon(\eta)$ — соответственно потенциал скорости падающей и дифракционной волн, η — направление распространения звуковой волны.

Таким образом, плавающие приборы, в отличие от поплавковых, в акустических полях имеют, при прочих равных условиях, меньшую погрешность измерений.

1. Данилин В. П. Гироскопические приборы: Учебное пособие. — М.: Высшая школа, 1965.—539 с.

2. Ишлинский А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. — М.: Наука, 1976.—671 с.
3. Карачун В. В., Мельник В. Н., Лозовик В. Г., Одинцов А. А. Погрешности гироскопического интегратора линейных ускорений в натуральных условиях / Под ред. В. В. Карачуна. — Киев: Корнейчук, 2001.—144 с.
4. Кочин К. Е., Кибель Н. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. — Л.-М.: Гос. изд-во технико-теор. лит., 1948.—Ч. 1.—535 с.
5. Лунц Я. Л. Ошибки гироскопических приборов. — Л.: Судостроение, 1968.—232 с.
6. Мельник В. Н., Карачун В. В., Саверченко В. Г. Акустическая вибрация оболочечных фрагментов двигателей // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук праць.—Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. Авіац. ін-т».—2001.—Вип. 26. Двигуни та енергоустановки.—С. 85—89.
7. Сломьянский Г. А., Прядилов Ю. Н. Поплавковые гироскопы и их применения. — М.: Оборонгиз, 1959.—248 с.
8. Тимошенко В. И., Гусынин В. П. Использование гиперзвуковых технологий при создании перспективных транспортных систем // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 1.—С. 78—89.
9. Pat. 2752790 USA, 2752792 USA, 2752793 USA / C. S. Draper, et al. — Publ. July 1956.
10. Pat. 2853287 USA. — Publ. Sept. 1957.

ABOUT FEATURES SPEAKERS OF A GYROSCOPE WITH MULTIPHASE BRACKET IN ACOUSTICS FIELDS

V. N. Melnik

The nature of interaction of audio radiation with gyroscopic instruments of handle of missiles-carriers is parsed, bracket which represents a polymodular mechanical system. The mechanism of origin of padding errors of measurements surveyed and the algorithm of their manifestation is defined.