

УДК 629.7

В. В. Карачун, В. Г. Лозовик, В. Н. Мельник, Е. К. Кундереви́ч

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

**Нестационарная задача взаимодействия
акустического излучения ракет-носителей
с двухступенным гироскопом**

Надійшла до редакції 26.10.99

Розкривається механізм пружної взаємодії акустичного випромінювання ракет-носіїв із двохступенним поплавковим датчиком кутових швидкостей та аналізуються умови виникнення акустичної девіації приладу.

Одним из основных направлений оптимизации полетов ракет-носителей (РН) следует признать эффективность использования аэродинамических маневров в атмосферах планет — торможение, захват воздушной средой и др., — а также повышение точности приборов командно-измерительного комплекса.

Стартовая масса современных ракет может достигать сотен тонн, поэтому для осуществления всех предусмотренных программой маневров носителя необходимо наличие мощных двигательных установок. К двигателям большой тяги следует отнести жидкотопливные и ядерные. Они обеспечивают требуемое приращение скорости в единицу времени.

Вместе с тем на границе струи, вытекающей из сопла двигателя со сверхзвуковой скоростью, обычно образуется зона турбулентного потока, которая генерирует в окружающую среду волны различной частоты. Толщина этой турбулентной зоны, и следовательно, предельные масштабы распространяющихся вниз по потоку вихрей непрерывно увеличиваются по мере удаления от среза сопла.

Интенсивность шума, создаваемого такой струей, пропорциональна ее средней скорости в степени 6...8. При этом мощность акустического излучения составляет 0.4...0.8 % механической мощности двигателей. Таким образом, увеличение тяги двигателей РН приводит к неизбежному увеличению сум-

марного уровня акустической нагрузки как на корпус ракеты, так и на приборы управления и бортовую аппаратуру.

Особо следует отметить отклонение от паспортных характеристик механических систем, содержащих носители кинетических моментов (гироскопы). При совместном действии кинематического и звукового возмущающих воздействий они приобретают свойства, которые существенно снижают точность их показаний и надежность в целом.

Проиллюстрируем сказанное применительно к серийному поплавковому гироскопическому датчику угловых скоростей типа ДУСУ2-6АС, предназначенному для использования на летательных аппаратах длительного действия либо в блоке демпфирующих гироскопов (БДГ), либо в качестве чувствительного элемента трехосной гиросtabilизированной платформы (ГСП). Прибор конструктивно состоит из гироузла, передаточного механизма, демпфера, моментного датчика и сильфона. Внутреннее пространство между поплавком и корпусом прибора заполнено тяжелой органической жидкостью, что позволяет не только уменьшить сухое трение на выходной оси, но и повысить устойчивость гироскопа к внешним механическим воздействиям.

Прошедшая внутрь прибора акустическая волна генерирует в элементах конструкции множество форм колебаний, в том числе и резонансных. Воз-

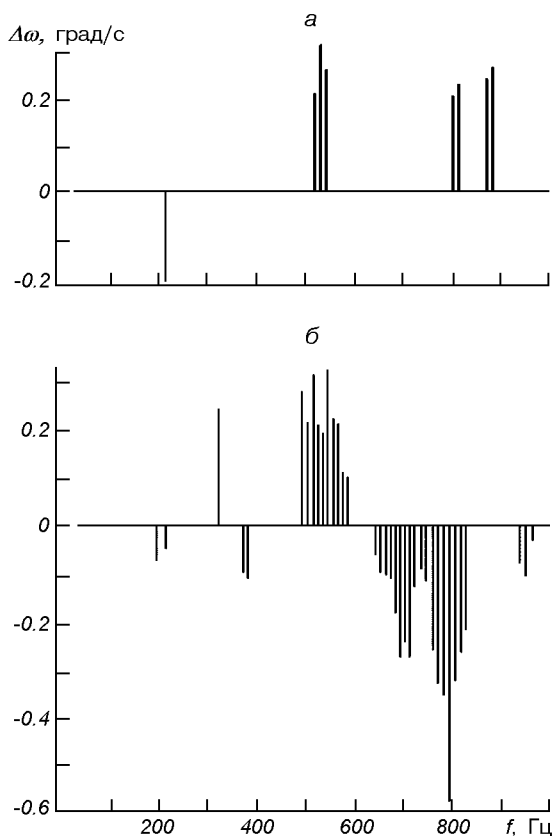


Рис. 1. Погрешности ДУСУ при акустическом воздействии 161 дБ: *a* — сдвиг нуля ДУСУ при отключенном гиromоторе, *б* — погрешности при включенном гиromоторе

никающие в элементах конструкции подвеса волновые процессы приводят к сдвигу нуля выходного сигнала прибора (рис. 1), что является инструментальной погрешностью. С другой стороны, они приводят к возникновению погрешности измерений, вызванной трансляцией энергии звукового поля непосредственно к гироскопу не только через опоры (подобно звуковому мостику), но и через среду, окружающую поплавки. Вследствие этого подвижная часть прибора будет перемещаться в сторону распространяющейся волны давления как абсолютно твердое тело, нагружая выходную ось и увеличивая момент сил сухого трения. Генерируемая на поверхности поплавка акустическая вибрация в условиях качающегося основания, в свою очередь, приведет к появлению возмущающих моментов сил инерции Кориолиса, и в итоге — к появлению «ложного» выходного сигнала (рис. 2). Как видно, при уровне звукового излучения 161 дБ в выходном сигнале ДУСУ наблюдается целый спектр погрешностей, величина которых значительно превышает его порог чувствительности ($0.09^\circ/\text{с}$).

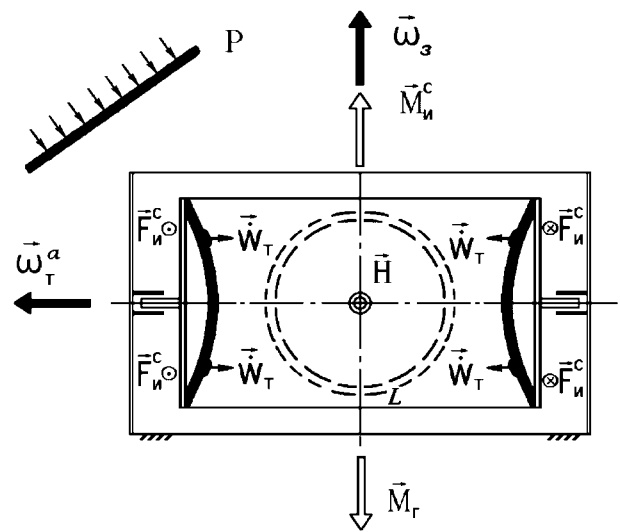


Рис. 2. Влияние акустической вибрации торцов на погрешность ДУСУ

Жидкость, в которую погружен гироскоп, не может одновременно осуществлять функцию уменьшения сил сухого трения на выходной оси и звукоизоляционные функции, так как является лучшим проводником звука, чем газообразная среда. Кроме того, в замкнутом цилиндрическом объеме с жидкостью при акустическом нагружении будут иметь место также зоны существенного усиления звукового поля, так называемые каустики, которые принесут ряд особенностей в динамику прибора [1].

Таким образом, гироскоп в поплавковом исполнении все же нуждается в «акустическом комфорте» и, как показывают исследования, эта задача является непростой.

Характер и степень влияния акустического излучения, равно как и механические модели возмущенного движения, зависят от соотношения габаритов изделия и половины длины звуковой волны. Если величина этого соотношения близка к единице, то акустическая нагрузка может быть приравнена к равномерно распределенной, а механическая модель — к твердому телу на упругих связях. Если же габаритный размер в несколько раз превышает половину длины акустической волны, то звуковая нагрузка должна рассматриваться как волновое воздействие, а вся конструкция — как система с распределенными параметрами.

Изгибное движение торцов поплавка со скоростью $\vec{W}_T(t)$, очевидно, является относительным по отношению к корпусу прибора — наружному цилиндру (рис. 2). Поворачиваясь вместе с РН, дат-

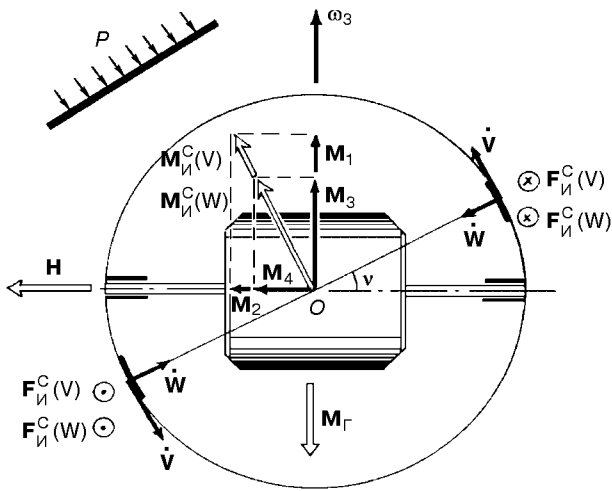


Рис. 3. Влияние перемещений элементов боковой поверхности поплавка на девиацию главной оси

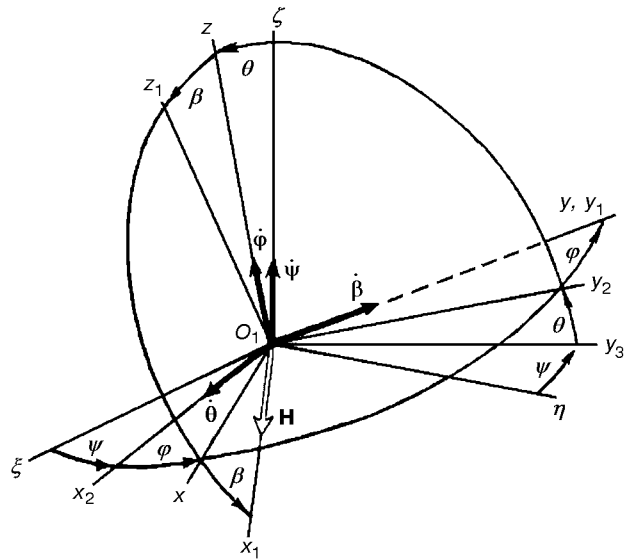


Рис. 4. Выбор системы координат: $O_1\xi\eta\zeta$ — опорная; $O_1x_1y_1z_1$ — жестко связанная с корпусом РН

чик угловых скоростей будет совершать переносное угловое движение, и это послужит причиной появления пары сил инерции Кориолиса $F_{И}^C$ с моментом

$$M_{И}^C(t) = LW_c(t) \int_{m_T} dm = 2m_T L \omega_3 \dot{W}_T(t) \sin[\omega_3, \hat{W}_T(t)],$$

где m_T — масса торцевой пластины поплавка.

Рассуждая аналогично, можно установить влияние акустической вибрации цилиндрической части поплавка на погрешность прибора (рис. 3). Здесь $V(t)$ и $W(t)$ — касательная и радиальная составляющие упругих перемещений, которые приводят к появлению возмущающих моментов

$$M_{И}^C(V) = \int_{m_{II}} 2RW_c dm = \frac{4J_{II}\omega_3\dot{V}(t)}{R} \sin v,$$

$$M_{И}^C(W) = \frac{4J_{II}\omega_3\dot{W}(t)\sin[\omega_3, \hat{W}(t)]}{R},$$

где R , m_{II} , J_{II} — соответственно радиус, масса и момент инерции поплавка с ротором.

Проанализируем возмущенное движение подвижной части ДУСУ при совместном действии на него акустического излучения и кинематического воздействия.

В качестве опорной (стартовой) выберем систему координат $O_1\xi\eta\zeta$, а угловое положение корпуса ракеты-носителя зададим с помощью углов Эйлера (рис. 4). Систему координат $O_1x_1y_1z_1$ жестко свяжем

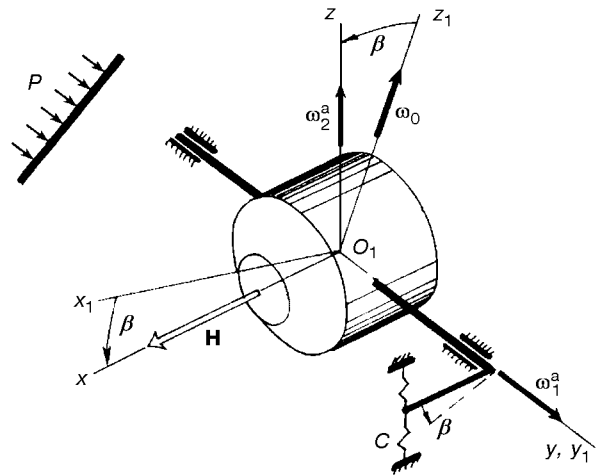


Рис. 5. Система координат, связанная с поплавком

с поплавком (рис. 5). Тогда будут иметь место очевидные соотношения:

$$\omega_x = \dot{\psi} \sin\theta \sin\varphi + \dot{\theta} \cos\varphi,$$

$$\omega_y = \dot{\psi} \sin\theta \cos\varphi - \dot{\theta} \sin\varphi,$$

$$\omega_z = \dot{\psi} \cos\theta + \dot{\varphi} + \omega_0,$$

где ω_0 — измеряемая угловая скорость; $\psi(t)$, $\theta(t)$, $\varphi(t)$ — соответственно углы рыскания, тангажа и собственного вращения.

Значения угловых скоростей системы координат, связанной с поплавком, определяются формулами

$$\begin{aligned}\omega_{x_1} &= \omega_x \cos\beta - \omega_z \sin\beta, \\ \omega_{y_1} &= \omega_y + \dot{\beta}, \\ \omega_{z_1} &= \omega_x \sin\beta + \omega_z \cos\beta.\end{aligned}$$

Степень влияния кинематического возмущения ω_z можно сразу оценить, если заменить ω_z на $\omega_z \cos\beta$. Тогда

$$\omega^a \approx \frac{2\omega_z \cos\beta}{HR} \{m_{\Gamma} RL \dot{W}_{\Gamma}(t) + J_{\Pi} [\dot{V}(t) + \pi \dot{W}(t)]\}.$$

Роль кинематических воздействий ω_x и ω_z выясняется путем представления этих величин суперпозицией проекций на оси O_{x_1} и O_{z_1} . Очевидно, что составляющие $(\omega_x)_{x_1}$ и $(\omega_z)_{x_1}$ не будут оказывать влияния на динамику гироскопа, так как совпадают с осью фигуры. В то же время компоненты $(\omega_x)_{z_1}$ и $(\omega_z)_{z_1}$ приведут к возникновению погрешности гироскопа, величина которой определяется соотношением

$$\begin{aligned}\omega_1^a(t) &\approx \frac{2(\omega_x \sin\beta + \omega_z \cos\beta)}{HR} \times \\ &\times \{m_{\Gamma} RL \dot{W}_{\Gamma}(t) + J_{\Pi} [\dot{V}(t) + \pi \dot{W}(t)]\}.\end{aligned}$$

Вектор угловой скорости $\omega_1^a(t)$ направлен вдоль выходной оси прибора (рис. 5).

Особо следует остановиться на анализе влияния угловой скорости ω_y . Очевидно, что совокупное ее действие с изгибным движением торцов поплавка образует мгновенно винтовое движение, параметры которого можно вычислить. Оно будет оказывать положительное влияние на прибор, так как приведет к уменьшению трения на выходной оси.

В совокупности с перемещениями боковой поверхности поплавок угловая скорость ω_y с тангенциальной скоростью $\dot{V}(t)$ приведут к появлению сил инерции Кориолиса, линии действия которых пересекают центр подвеса O_1 и, таким образом, не создают момента (рис. 3).

В отличие от этого, радиальные перемещения элементов боковой поверхности со скоростью $\dot{W}(t)$ приведут к появлению пары сил инерции Кориолиса с моментом M_{Π}^C , вектор которого будет направлен перпендикулярно к плоскости рисунка на читателя (рис. 5). В соответствии с теоремой Резаля поплавок будет прецессировать вокруг входной оси с угловой скоростью ω_2^a , вызывая появление гироскопического момента, который уравновесит M_{Π}^C :

$$M_{\Gamma} = -M_{\Pi}^C.$$

Отсюда легко установить значение скорости прецессии

$$\omega_2^a = \frac{M_{\Pi}^C}{H \sin(H, \omega_2^a)} = \frac{4J_{\Pi} \omega_y \dot{W}(t)}{HR},$$

где $\dot{W} = \dot{W}(P, \omega, t)$. Если раскрыть значение скорости $\dot{W}(t)$ радиального перемещения элементов боковой поверхности поплавка, а также воспользоваться соотношениями для представления угловой скорости ω_y через углы Эйлера, то можно провести качественную и количественную оценку этого явления.

Таким образом, составляющие ω_x и ω_z угловой скорости движения корпуса РН будут способствовать проявлению влияния акустического излучения и приведут к дополнительному повороту подвижной части относительно выходной оси с угловой скоростью $\omega_1^a(t)$. Составляющая ω_y приведет, с одной стороны, к уменьшению трения в цапфах, но с другой — к дополнительной прецессии (в пределах люфта) относительно входной оси и нагружению опор. Остается оценить, какой эффект преобладает. Если поплавок имеет нулевую плавучесть, то будет, очевидно, преобладать негативное влияние скорости ω_y . При отрицательной плавучести нужны дополнительные оценки. В дальнейшем будем предполагать, что результирующее влияние этой скорости равно нулю, и обратим внимание только на параметры ω_x и ω_z .

Запишем дифференциальное уравнение движения ДУСУ в форме [2] с учетом полученных соотношений:

$$\begin{aligned}B\ddot{\beta} + R\{[(\omega_z + \omega_2^a \cos\beta)^2 - \omega_x^2] \sin\beta \cos\beta - \\ - \omega_x(\omega_z + \omega_2^a \cos\beta) \cos 2\beta\} + \\ + H[\omega_x \sin\beta + (\omega_z + \omega_2^a \cos\beta) \cos\beta] + \\ + B(\dot{\omega}_y + \dot{\omega}_1^a) + c\beta + b\dot{\beta} = 0,\end{aligned}\quad (1)$$

где J_x, J_y, J_z — моменты инерции поплавка; J, J_0 — полярный и экваториальный моменты инерции ротора;

$$B = J_0 + J_y; \quad R = J_0 + J_z - J_x.$$

Ограничимся рассмотрением только прецессионного движения. Тогда выражение (1) упростится:

$$\begin{aligned}c\beta = -H\omega_z \cos\beta - H\omega_x \sin\beta - B\dot{\omega}_y - \\ - H\omega_2^a \cos^2\beta - B\dot{\omega}_1^a,\end{aligned}\quad (2)$$

и из него несложно определить угол поворота подвижной части ДУСУ:

$$\beta = -\frac{H\omega_z \cos\beta}{c} - \frac{H\omega_x \sin\beta}{c} - \frac{B\dot{\omega}_y}{c}.$$

$$-\frac{H\omega_z^a \cos^2 \beta}{c} - \frac{B\dot{\omega}_1^a}{c}. \quad (3)$$

Смысл первых трех слагаемых в правой части этого выражения известен: $(H\omega_z \cos \beta)/c$ — полезный сигнал, пропорциональный измеряемой угловой скорости ω_z ; $(H\omega_x \sin \beta)/c$ — методическая погрешность прибора, обусловленная проявлением перекрестной угловой скорости ω_x ; $B\dot{\omega}_y/c$ — погрешность, вызванная влиянием углового ускорения $\dot{\omega}_y$ вокруг выходной оси.

Два последних слагаемых в правой части формулы (3) получены при теоретическом рассмотрении дифракции звуковых волн на упругом подвесе гироскопа. Конечно, некоторые упрощения, принятые при построении моделей, не позволили учесть все особенности явления, однако можно сделать вполне определенные выводы о структуре акустической девиации и разработке мер по ее устранению.

Угловая скорость ω_2^a в предпоследнем слагаемом по направлению совпадает с входной осью гироскопа. Реагируя на нее, ДУСУ выдает сигнал, соответствующий «ложной» угловой скорости. Это есть акустическая погрешность прибора. Значение этого слагаемого значительно больше, чем других слагаемых, за исключением полезного сигнала $H\omega_z \cos \beta$.

Ускорение $\dot{\omega}_1^a$ в последнем слагаемом выражения (3) увеличивает погрешность измерений, обусловленную инерционными свойствами схемы.

Если положить величину измеряемой угловой скорости равной нулю ($\omega_0 = 0$), можно определить сдвиг нуля прибора, обусловленный воздействием звуковых полей.

Таким образом, акустическая погрешность может быть определена выражением

$$\beta^a = \beta_1^a + \beta_2^a = \frac{H}{c} \omega_2^a \cos \beta + \frac{B}{c} \dot{\omega}_1^a. \quad (4)$$

С учетом полученных ранее соотношений эти формулы могут быть записаны более полно:

$$\beta_1^a = \frac{H}{c} \omega_2^a \cos \beta = \frac{4J_{II} \omega_y \cos \beta \dot{W}(t)}{cR}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \beta_2^a = \frac{2B}{cHR} \{ & [\dot{\omega}_x \sin \beta + \dot{\omega}_z \cos \beta + \dot{\beta}(\omega_x \cos \beta - \omega_z \sin \beta)] \times \\ & \times [m_{T1} R L \dot{W}_T(t) + J_{II}(\dot{V}(t) + \pi \dot{W}(t))] + \\ & + (\omega_x \sin \beta + \omega_z \cos \beta) \times \\ & \times [m_{T1} R L \ddot{W}_T(t) + J_{II}(\ddot{V}(t) + \pi \ddot{W}(t))] \}. \quad (6) \end{aligned}$$

Соотношения (5) и (6) позволяют оценивать акустическую погрешность. Необходимо только за-

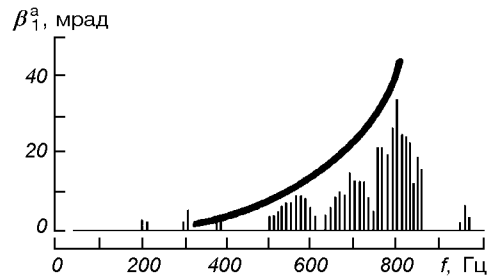


Рис. 6. Систематическая погрешность ДУСУ при акустическом излучении 165 дБ: сплошная линия — расчеты; дискретная — систематическая составляющая, полученная опытным путем

дать кинематические возмущения $\omega_x(t)$, $\omega_y(t)$, $\omega_z(t)$ (или углы рыскания, тангажа и крена), а также установить закон изгибного движения торцов поплавок $W_T(t)$ и закон перемещения элементов его боковой поверхности $V(t)$ и $W(t)$ при акустическом воздействии.

Числовой анализ в основном подтвердил изложенные результаты. Так, за исключением случайных выбросов на частотах 200 Гц, 300 Гц и 380 Гц, акустической девиации ДУСУ (как рассчитанной, так и экспериментальной) практически нет. Начиная с частоты 500 Гц до 850 Гц, она увеличивается по параболическому закону (рис. 6).

Различия графиков в диапазоне 850—1000 Гц объясняются тем, что при расчетах не были учтены торцы поплавок, которые имеют малый импеданс в направлении нормали к поверхности. Кроме того, структура акустического поля может изменяться в пространстве и во времени по иной схеме, чем принятая.

1. Карачун В. В., Лозовик В. Г., Потапова Е. Р., Мельник В. Н. Многомерные задачи нестационарной упругости подвеса поплавкового гироскопа / Под ред. В. В. Карачуна. — Киев: «Корнейчук», 2000.—128 с.
2. Луниц Я. Л. Ошибки гироскопических приборов. — Л.: Судостроение, 1968.—232 с.

NON-STATIONARY PROBLEM OF THE INTERACTION OF ACOUSTIC RADIATION FROM ROCKET CARRIERS WITH TWO-SEDATE GYROSCOPE

V. V. Karachun, V. G. Lozovik, V. N. Melnik, E. K. Kunderevich

The mechanism of elastic interaction of the acoustic radiation from rocket carriers with two-sedate floating gauge of angular speed is revealed, and the conditions under which the acoustic deviation occurs in the device are analyzed.