

УДК 629.7.54

В. Н. Мельник, В. В. Карачун

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

**Пассивные методы уменьшения погрешностей
гироинтегратора, обусловленных дифракцией
звуковых волн на подвесе гироскопа**

Надійшла до редакції 18.12.02

Наведено результати експериментальних досліджень засобів пасивної звукоізоляції гіроінтегратора. Зроблено порівняльний аналіз ефективності екранів в умовах акустичних полів високого рівня.

Гироскопические интеграторы линейных ускорений нашли широкое применение в баллистических ракетах для формирования сигнала отключения двигателей в конце активного участка движения.

Интегратор представляет собой гироскоп с тремя степенями свободы. Ось наружной рамки (скобы) является осью чувствительности прибора и устанавливается параллельно продольной оси РН. Ось кожуха гироскопа не пересекается с осью наружной рамки, она конструктивно вынесена на расстояние $l = 1...2$ см [1].

Таким образом, центр масс гироскопа и кожуха смещены относительно оси подвеса кожуха вдоль главной оси гироскопа на величину l . Центр масс системы ротор-кожух-наружная рамка (при отсутствии поворота кожуха относительно входной оси) расположен на оси подвеса наружной рамки.

Другими словами, подвижная часть прибора сбалансирована (с точностью до погрешности регулировки) относительно оси наружной рамки, но имеет преднамеренный дебаланс относительно оси поворота кожуха. Техническая реализация этого факта обеспечивается выполнением осей подвеса в виде перекрещивающихся осей.

Прибор имеет систему коррекции по перпендикулярности рамок. Она включает в себя датчик угла и датчик момента (стабилизирующий двигатель). Датчик момента управляется предварительно усиленным сигналом датчика угла, который исходно выставлен таким образом, что его сигнал равен нулю при совпадении главной оси с плоскостью скобы. Система коррекции, при условии правильного ее включения, стремится свести к нулю угол

поворота гироскопа вокруг оси подвеса кожуха. Точность межрамочной коррекции в гироскопическом интеграторе достаточно высока. Предельные углы отклонения главной оси от перпендикуляра к плоскости наружной рамки не превышают долей градуса.

Наличие перекрещивающихся осей карданового подвеса гироскопа при работе прибора в замкнутом реверберационном акустическом пространстве приводит к появлению особенностей функционирования гироскопического интегратора в натуральных условиях. Эти особенности в своей совокупности, как оказалось, служат причиной дополнительной погрешности измерений.

Рассмотрим подвес как совокупность абсолютно твердых недеформируемых тел.

Под действием плоской звуковой волны давления P кожух с гироскопом будут испытывать возмущающее действие двух моментов: $M_1(P)$ и $M_2(P)$ (рис. 1). Первый направлен вдоль оси наружной рамки и равен

$$M_1(P) = P S \cos(\mathbf{n}, \hat{Oy}) l_1, \quad (1)$$

где P — давление в падающей волне; S — площадь поверхности кожуха; l_1 — расстояние от оси вращения кожуха до точки приложения равнодействующей сил акустического давления.

Второй момент $M_2(P)$ направлен вдоль оси вращения внутренней рамки и равен

$$M_2(P) = P S \cos(\mathbf{n}, \hat{Ox}) l_2, \quad (2)$$

где l_2 — расстояние до центра приложения равнодействующей сил акустического давления.

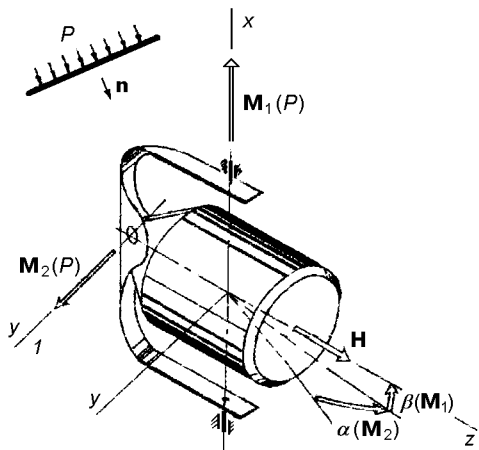


Рис. 1. Влияние звуковой волны на динамику гироскопа

Наличие возмущающего момента $M_1(P)$ приводит к отклонению главной оси на угол $\beta(M_1)$, нарушающему требованию перпендикулярности оси фигуры и оси наружной рамки. Это, в свою очередь, сказывается на искажении входного сигнала

$$M(W) = -mlW \cos\beta,$$

и следовательно, на появлении погрешности измерений.

Возникновение возмущающего момента $M_2(P)$ вызывает прецессию подвижной части на угол $\alpha(M_2)$, который вносит изменения в выходной сигнал, также соответствующий погрешности измерений.

Наличие в подвесе гироскопа перекрещивающихся осей приводит к тому, что кожух с гироскопом по сути является физическим маятником, подверженным действию волны давления. Причем наиболее опасной является ее антисимметричная составляющая

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

приводящая к раскачке гироскопа относительно осей подвеса. Очевидно, что симметричная составляющая давления P_c не представляет серьезной опасности для подвеса.

Точку приложения равнодействующей сил акустического давления наиболее точно для конкретного типа приборов можно определить только в акустической камере. Для качественной оценки явления достаточно воспользоваться понятием площади лобового сопротивления (миделя). Величину давления в отраженной и прошедшей волнах (P_{20} и P_{30}) можно оценить приближенно.

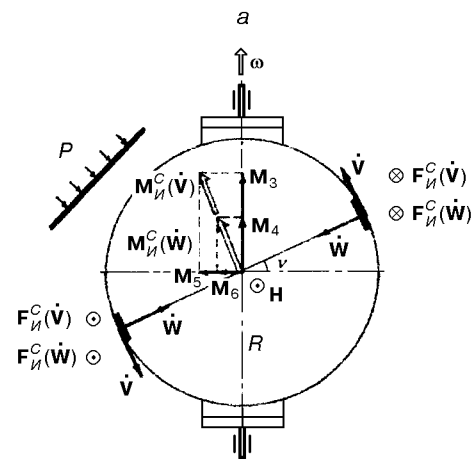
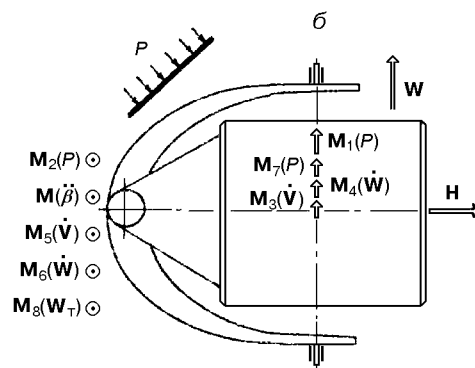


Рис. 2. Природа возникновения возмущающих моментов при дифракции звуковых волн на подвесе гироскопа

Таким образом, наличие геометрической асимметрии (парусности) может быть причиной возникновения дополнительных моментов-помех, и следовательно, — дополнительных погрешностей гироскопического интегратора линейных ускорений.

Проанализируем влияние упругих перемещений поверхности внутренней рамки под действием прошедшей внутрь прибора звуковой волны на появление дополнительных возмущающих моментов и, следовательно, на дополнительные погрешности измерений.

В качестве внешнего возмущающего фактора рассмотрим широко применяемую для такого типа задач плоскую волну давления. Кроме того, корпус ракеты-носителя считаем совершающим угловые колебания, что имеет место в натуральных условиях как во время старта, так и при движении. Возникновение особенностей динамики других элементов подвеса и комплектующих здесь не изучается. Кожух интегратора можно представить в виде шарнирно соединенных с круговым цилиндром двух



торцевых крышек. Проанализируем природу прохождения звука через эти элементы, возникающую в них акустическую вибрацию и появление возмущающих моментов.

Начнем с цилиндрической части кожуха.

Под воздействием звуковой волны P упругая поверхность кожуха получает радиальные $W(t)$ и касательные $V(t)$ перемещения. Ввиду малости, перемещения вдоль образующей цилиндра не учитываются.

Пусть векторы скоростей $\dot{V}(t)$ и $\dot{W}(t)$ направлены как указано на рис. 2, а. Тогда вследствие углового движения корпуса ракеты-носителя со скоростью ω элементы поверхности, совершая сложное движение, будут испытывать действие ускорения Кориолиса $2\omega \times \dot{V}$ и $2\omega \times \dot{W}$ и соответственно сил инерции Кориолиса $F_{и}^c(\dot{V})$, $F_{и}^c(\dot{W})$. Последние образуют пары сил с моментами $M_{и}^c(\dot{V})$ и $M_{и}^c(\dot{W})$, которые выступают возмущающими факторами для кожуха интегратора.

Представив векторы этих ускорений в виде составляющих M_3 , M_4 , M_5 , M_6 , легко установить, девиация относительно какой оси подвеса имеет место (рис. 2, б).

Величины этих моментов известны [1]:

$$\begin{aligned} M_3(\dot{V}) &= \frac{2A\omega\dot{V}(t)}{R}, & M_4(\dot{W}) &= \pi \frac{2A\omega\dot{W}(t)}{R}, \\ M_5(\dot{V}) &= \pi \frac{2B\omega\dot{V}(t)}{R}, & M_6(\dot{W}) &= \frac{2B\omega\dot{W}(t)}{R}, \end{aligned} \quad (3)$$

где A , B — моменты инерции кожуха. То есть, моменты $M_5(\dot{V})$, $M_6(\dot{W})$ вызовут прецессию гироскопа относительно оси наружной рамки, а моменты $M_3(\dot{V})$, $M_4(\dot{W})$, — относительно оси подвеса кожуха. Первые вносят искажение в полезный сигнал непосредственно, вторые — опосредованно, вызывая нарушение перпендикулярности главной оси и оси наружной рамки.

Акустическая вибрация торцов кожуха в направлении их нормали приведет к появлению возмущающего момента $M_7(P)$ —

$$M_7(P) = 2m_T L \omega \dot{W}_T(t) \sin[\omega, \hat{W}_T(t)], \quad (4)$$

где m_T — масса торца кожуха; $\dot{W}_T(t)$ — скорость изгибного движения пластины.

Перемещения поверхности цилиндра под действием акустического излучения удобно представлять в виде рядов Фурье:

$$V = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn} \exp(im\beta) \sin \frac{n\pi x}{L},$$

$$W = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn} \exp(im\beta) \sin \frac{n\pi x}{L},$$

Здесь согласно [2]

$$V_{mn} = -im \frac{F_{mn}}{\Delta_{mn}},$$

$$W_{mn} = \left[\omega^2 \rho - m^2 - \frac{1-\sigma}{2} \left(\frac{n\pi}{h} \right)^2 \right] \frac{F_{mn}}{\Delta_{mn}},$$

$$\Delta_{mn} = m^2 + \left[\omega^2 \rho - m^2 - \frac{1-\sigma}{2} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] \times \left\{ (\omega^2 \rho + 1) + c^2 \left[\left(\frac{m}{R} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] \right\},$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, n = 0, 1, 2, \dots,$$

$$F_{mn} = l_{mn} P_0 \exp(i\omega t),$$

$$l_{mn} = \frac{2n\pi [1 - (-1)^n]}{(n\pi)^2 - (k_0 L)^2} \times$$

$$\begin{cases} 1, & \text{если } k_0 R q = -m, \\ i \frac{\exp i[-2\pi k_0 R_1(q + \cos\beta \cos\epsilon_1)] - 1}{2\pi [k_0 R_1(q + \cos\beta \cos\epsilon_1) + m]}, & \text{если } k_0 R_1 q \neq -m, \end{cases}$$

где $q = \sin\beta \sin\epsilon_1 \sin\epsilon_2$, $k_0 L \neq n\pi$, β — центральный угол в плоскости шпангоута, $k_0 = \omega/c_0$ — волновое число, m^{-1} , P_0 — давление в падающей звуковой волне, дБ;

$$W_T = W_{T_0} \exp(i\omega t), \quad W_{T_0} = c^j u_j, \quad j = 1, \dots, 6,$$

$$u_1 = \left(1 - \frac{x^2}{R^2} - \frac{y^2}{R^2} \right)^2, \quad u_2 = \frac{x}{R} u_1, \quad u_3 = \frac{y}{R} u_1,$$

$$u_4 = \frac{x^2}{R^2} u_1, \quad u_5 = \frac{y^2}{R^2} u_1, \quad u_6 = \frac{xy}{R^2} u_1,$$

$$C = (c^1, c^2, \dots, c^N)^T = G^{-1} F =$$

$$= \frac{R^4 P_0}{64D} \begin{vmatrix} 4 & 0 & 0 & 5 & 5 & 0 \\ 0 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 19 & 7 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 7 & 19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{vmatrix}^{-1} \begin{vmatrix} 4 - 2 \left(\frac{\lambda}{2} \right)^2 \\ i 6 \frac{\lambda}{2} \cos\epsilon \\ -i 6 \frac{\lambda}{2} \sin\epsilon \\ 5 - 8 \left(\frac{\lambda}{2} \right)^2 \cos^2\epsilon \\ 5 - 8 \left(\frac{\lambda}{2} \right)^2 \sin^2\epsilon \\ 2 \left(\frac{\lambda}{2} \right)^2 \sin 2\epsilon \end{vmatrix},$$

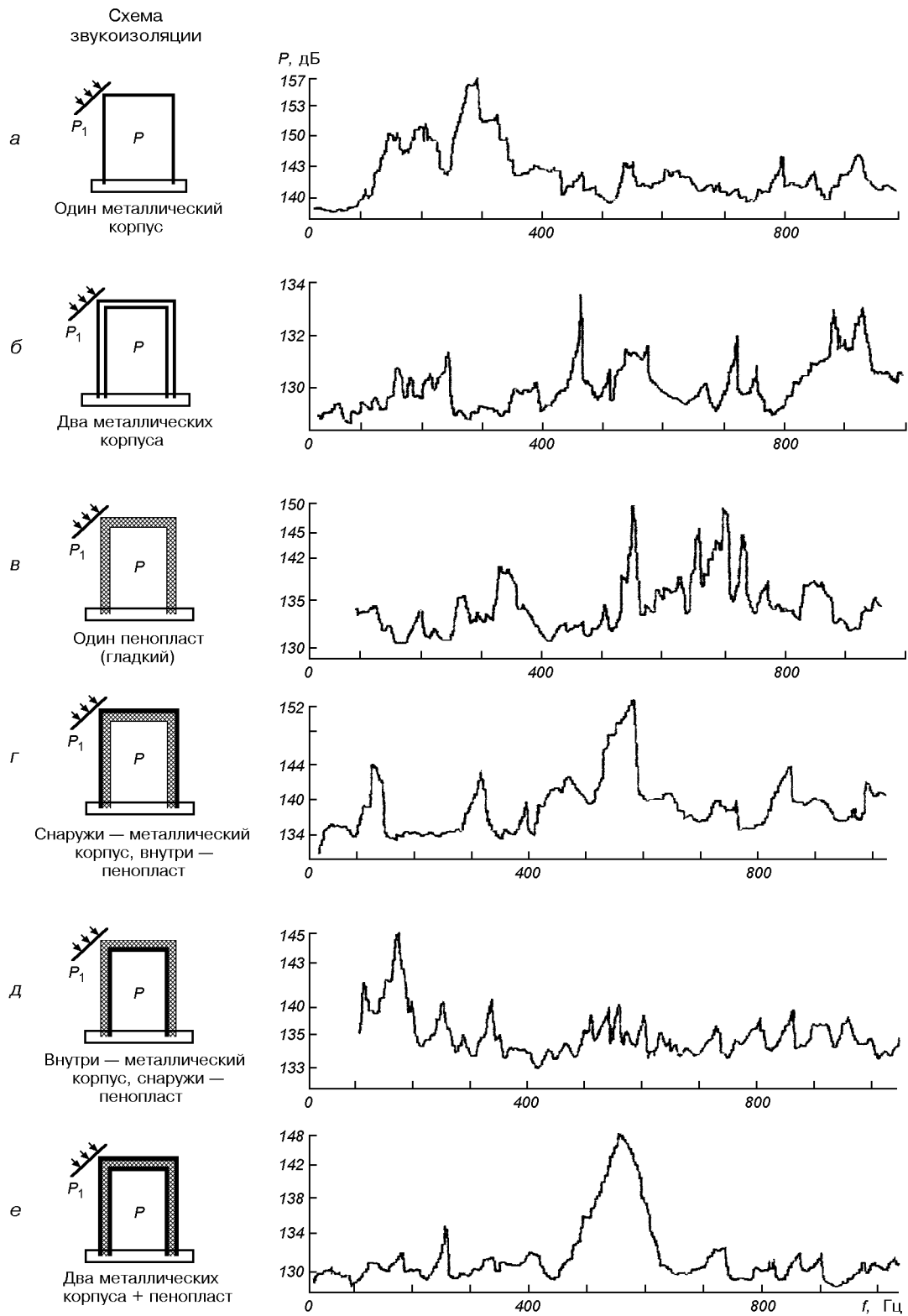


Рис. 3. Звуковое давление внутри прибора при различных схемах пассивной звукоизоляции

где $D = Eh/[12(1 - \sigma)]$ — цилиндрическая жесткость крышки торца кожуха, $(\lambda_1/2)^2 = = 1/4(\cos^2\theta_1\sin^2\theta + \sin^2\theta_1)(k_0R_1)^2 \ll 1$, θ, θ_1 — углы падения и отражения звуковой волны; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — числовые параметры. Чтобы оценить характер акустического поля внутри гироскопического интегратора линейных ускорений, на модели прибора, представляющей массо-габаритный эквивалент реальной конструкции, были проведены натурные испытания в реверберационной камере на установке «Сирена» Института проблем прочности Национальной академии наук Украины.

Источником звуковой нагрузки являлась мощная роторная динамическая сирена, генерирующая широкополосный аэродинамический шум, приближающейся к реальному звуковому нагружению. Внутри прибора устанавливался микрофон, незначительные геометрические размеры которого не вносили искажений в структуру звукового поля.

Чистота проведения эксперимента обеспечивалась исключением резонансных проявлений в подвесе гироскопа путем сдвига опасной зоны влево, то есть в область низких частот.

Исследования показали, что при уровне внешнего звукового поля в 163—165 дБ средняя мощность акустического воздействия внутри прибора распределяется неравномерно вдоль оси частот (рис. 3, а). На частотах $f = 200$ Гц и $f = 300$ Гц имеют место явно выраженные пики давления, а в диапазоне $f = 350...1000$ Гц распределение энергии звукового воздействия можно считать равномерным по оси частот. Характерные всплески уровней обусловлены «раскачкой» крышки корпуса и резонансом внутреннего столба воздуха, что служит причиной более интенсивной трансляции энергии внешнего звукового поля внутрь прибора.

Практика борьбы с аэродинамическим шумом показывает, что наиболее эффективными средствами шумогашения в настоящее время являются средства пассивной звукоизоляции, которые наряду с простотой технической реализации позволяют достичь желаемого эффекта при минимальных затратах (рис. 3).

Наличие пиков говорит о преобладании частот прошедшего внутрь звукового излучения (либо полосы). Для оценки эффективности шумогашения использовались пористые конструкции (рис. 4: а — сплошной экран; б — экран с полостями типа резонатора Гельмгольца), перфорированный с косыми насечками (рис. 5), а также перфорированный с продольными насечками и сплошной (рис. 6).

Проиллюстрируем возможность уменьшения уровня звукового воздействия внутри заданного объема с помощью устройства, отвечающего предь-

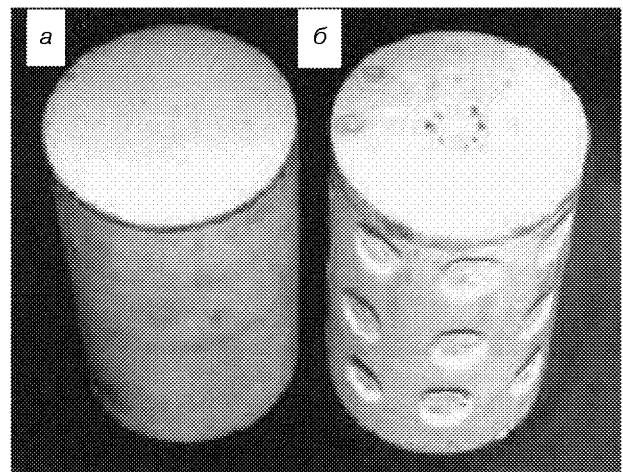


Рис. 4. Пористый экран: а — сплошной; б — с резонансными полостями

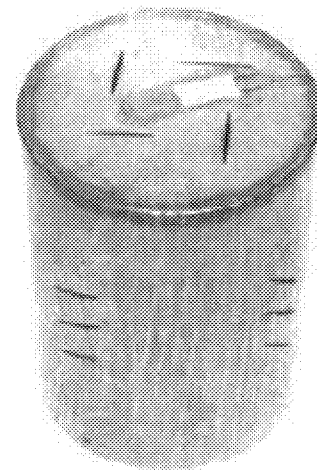


Рис. 5. Перфорированный экран с косой перфорацией

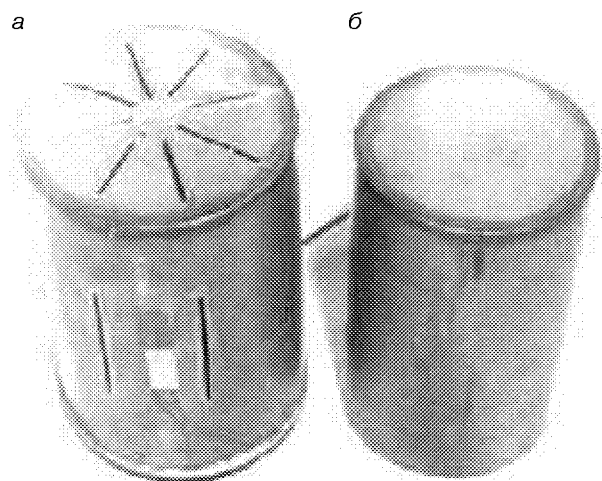


Рис. 6. Экранирующий кожух: а — с продольной перфорацией, б — сплошной

являемым требованиям и лишено недостатков известных методов и средств [3]. Это устройство представляет собой систему из двух коаксиальных цилиндров, выполненных для конкретности исследований в том же массо-габаритном исполнении, что и серийный прибор.

Устройство крепится к тяжелому основанию (чтобы исключить перекачку энергии), по краям которого находятся два полукольца для подвеса испытуемого изделия внутри реверберационной камеры с целью исключения влияния стен и пола установки на качество эксперимента (рис. 7). В месте крепления к основанию устанавливается прокладка из упругого материала для подавления взаимного влияния цилиндров и основания.

Уровень звука внутри устройства измерялся пьезокерамическим датчиком звукового давления типа ЦПД-10А, разработанным ЦАГИ. Датчик имеет небольшие габаритные размеры, что практически исключило его влияние на структуру акустического поля. Интенсивность звука измерялась вольтметром типа ВЗ-20 по сигналу датчика звукового давления. Входное сопротивление вольтметра выше 1 МОм, что позволило использовать его как измерительный прибор при работе с пьезокерамическим приемником.

Деформации торцевой и боковой поверхностей звукоизолирующего цилиндра измерялась тензорезисторами типа 2ПКБ-10.100в, ТУ 2506.1382.78, сигналы которых поступали на тензоусилитель типа 8.АНЧ-7М.

Устройство содержит коаксиально расположенные внутренний металлический цилиндр и наружный цилиндр (перфорированный экран), имеющий равное количество продольных на боковой поверхности и радиальных на торцевой поверхности сквозных щелей заданных типоразмеров (рис. 7). Оба цилиндра разделены воздушным пространством. В месте крепления устройства к основанию между ними установлена прокладка 6 с большим коэффициентом внутреннего поглощения, например, резиновая. При воздействии интенсивного звукового давления на наружный цилиндр 2 около 5—7 % звуковой энергии излучения (в зависимости от суммарной площади щелей) проходит сквозь щели 3 и 4 и попадает непосредственно на поверхность внутреннего цилиндра 1. Часть этой энергии передается внутрь цилиндра, а другая, отражаясь, попадает на внутреннюю поверхность наружного цилиндра и создает с этой стороны противодействие интенсивному аэродинамическому шуму. Это существенно снижает уровень шума внутри устройства. Диаграмма звукового давления представлена на рис. 8 (пунктирная линия). Максимальное пони-

жение шума в такой конструкции, как видно, осуществляется до 114 дБ (в среднем на всем частотном диапазоне — до 116 дБ), за исключением локальных экстремумов. Таким образом, рассматриваемое устройство позволяет обеспечить во внутреннем объеме прибора «акустический комфорт».

Нанесение сквозных щелей на боковой поверхности наружного цилиндра перпендикулярно к его образующей и под углом $\pi/4$ существенных изменений в структуру звукового поля не вносит.

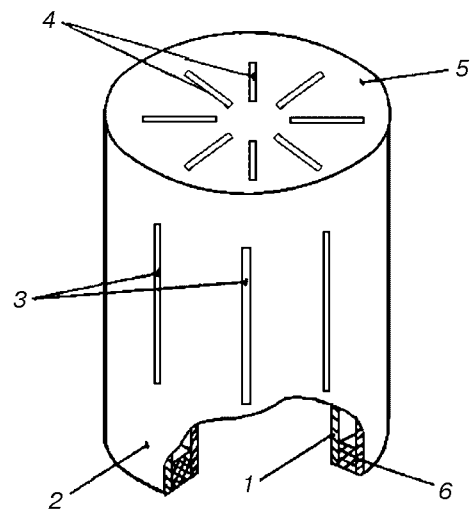


Рис. 7. Перфорированный экран: 1 — внутренний металлический цилиндр 2 — наружный цилиндр (перфорированный экран), 3 — продольные сквозные щели, 4 — радиальные сквозные щели, 5 — торцевая поверхность, 6 — прокладка

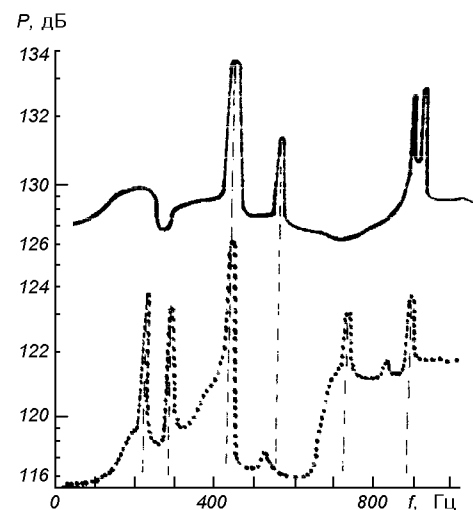


Рис. 8. Звукоизоляция с помощью двух коаксиальных цилиндров: сплошная — сплошной; наружный с продольными щелями — пунктирная линия

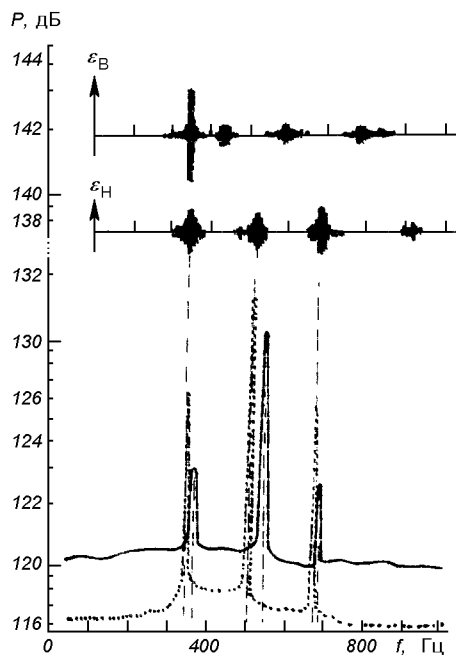


Рис. 9. Уровень звука внутри двойного цилиндра: сплошная линия — косые щели, пунктирная линия — поперечные щели. Верхние диаграммы — деформации внутреннего и внешнего торцов цилиндров

Если провести синхронную запись уровня акустического давления внутри устройства для подавления интенсивного аэродинамического шума и тензометрических измерений величин деформаций ϵ_i поверхностей обоих цилиндров, то оказывается, что локальным экстремумам на диаграмме акустического давления сопутствуют во времени возбуждения торцевой поверхности наружного цилиндра (рис. 9, наружный цилиндр с поперечными щелями). Боковая поверхность цилиндров при этом не возбуждается, что объясняется ее достаточно высокой жесткостью на изгиб. Вместе с тем, как видно из диаграмм, возбуждение торцевой поверхности внутреннего цилиндра (ϵ_i на верхнем графике) не оказывает существенного влияния на уровень акустического давления внутреннего объема меньшего цилиндра, за исключением частоты $f = 350$ Гц, на которой возбуждаются обе торцевые поверхности. Из этого факта можно сделать вывод о возможности корректирования диаграммы акустического давления внутреннего цилиндра с помощью, например, варьирования значения жесткости торцевой

поверхности наружного цилиндра. Техническая реализация этого пути может быть различной.

Использование щелевых резонаторов и резонаторов Гельмгольца с резонирующими полостями, выполненными в пенопласте, как показали исследования, качественно не изменяют картины шумогашения по сравнению с системой из металлического и однородного пенопластового цилиндров (рис. 3, з).

Таким образом, наиболее эффективным, с точки зрения понижения уровня звукового поля в заданном внутреннем реверберационном объеме, является система двух коаксиальных цилиндров, внутренний из которых цельный, а наружный имеет сквозные щели заданных типоразмеров (рис. 7). Этот вывод можно распространить также на иные массогабаритные характеристики гироскопов.

Роль внутреннего цилиндра может выполнять собственно корпус прибора.

Наружный цилиндр с прорезями выполняет роль перфорированного экрана, акустические свойства которого, как известно, оцениваются его сопротивлением продуванию, имеющему, вообще говоря, комплексный характер. Для прорезей шириной более 1.5 мм действительной частью этого сопротивления можно пренебречь и считать сопротивление экрана чисто мнимой величиной, пропорциональной присоединенной массе воздуха в щелях.

Сопротивление перфорированного экрана с отверстиями сложной конфигурации, в том числе прорезей, определяют, как правило, экспериментально.

1. Мельник В. Н., Дилнар Махмут, Карачун В. В., Кундеревич Е. К. Погрешности измерений продольных скоростей ракет-носителей гироскопическим интегратором // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 1.—С. 61—85.
2. Многомерные задачи нестационарной упругости подвеса поплавкового гироскопа / В. В. Карачун, В. Г. Лозовик, Е. Р. Потапова, В. Н. Мельник / Под ред. В. В. Карачуна. — Киев: Корнейчук, 2000.—128 с.
3. Пат. 39600 А, Україна, МКІ⁴ G 10 K 11/00. Шумозахисний екран / В. В. Карачун, М. М. Тривайло, В. М. Мельник. — № 2000116168; Заявл. 01.11.00; Опубл. 15.06.01.— Бюл. № 5.

PASSIVEMETHODS FOR DECREASING GYROSCOPIC INTEGRATOR ERRORS CAUSED BY THE DIFFRACTION OF SOUND WAVES ON BRACKET OF THE GYRO

V. N. Mel'nik, V. V. Karachun

The results of experimental investigations of ways of passive sound insulation of a gyroscopic integrator are presented. A comparative analysis of the efficiency of screens under conditions of acoustic fields of a high level is carried out.