

УДК 629.07.54

## Влияние акустического излучения на динамику упругих подвесов приборов управления ракет-носителей

В. В. Карачун, Н. А. Кубрак, Е. Р. Потапова, Н. В. Гнатейко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

*Надійшла до редакції 14.01.99*

Встановлено закономірності виникнення хвильових процесів у пружних підвісах приладів керування космічних апаратів під впливом акустичного випромінювання. Аналізується динаміка носіїв кінетичного моменту в умовах старту з поверхні Землі або з малого об'єму.

Как известно, с увеличением мощности двигателей ракет-носителей (РН) увеличивается и производимый ими шум. Приблизительно 1 % мощности расходуется на акустическое излучение, общий уровень которого вблизи реактивной струи может достигать 180 дБ. В частности, такие звуковые давления имеют место при стартах из шахт [1]. Естественно, что звуковое давление такой интенсивности оказывает существенное влияние как на всю конструкцию РН, так и на приборы управления и навигационную аппаратуру. Достаточно широкий частотный спектр реактивной струи (10000 Гц) и случайный характер изменения величины звукового давления приводит к возникновению в механических структурах множества форм колебаний, в том числе и резонансных. Имеют место также и локальные особенности, приводящие к разрушению материала.

Экспериментальные и теоретические исследования последних лет существенно расширили и вывели на качественно новый уровень представления о характере и природе рассеяния энергии звукового поля в механических системах, а также определили пути оптимизации упруго-вязких свойств приборов командно-измерительного комплекса. Вместе с тем остается много нерешенных проблем качественной и количественной оценки взаимодействия избыточного давления с бортовой аппаратурой.

В частности, это относится к гироскопическим приборам. Оказалось, что технические решения повышения их точности и функциональной надежности в условиях акустического нагружения не обеспечивают желаемого результата. К таким устройствам можно отнести упругий перекрестный шарнир, нашедший применение в системах установки двухстепенных гироскопов. Основное назначение таких опор — исключить момент сил сухого трения на выходной оси, заменив его моментом сил трения упругости. Это, с одной стороны, позволяет уменьшить погрешность измерений прибора, с другой — эффективно бороться с влиянием вибрации основания.

На рис. 1 изображен перекрестный шарнир для подвеса двухстепенного гироскопа 3, который устанавливается на плите 1. В свою очередь, плита 1 крепится к основанию 4 с помощью опоры, состоящей из четырех упругих пластин 2, пересекающихся под углом  $\alpha = 60..90^\circ$  и закрепленной своими концами на основании 4. Угол поворота таких шарниров может достигать  $30^\circ$ .

Проанализируем механизм взаимодействия акустического излучения с гироскопом на перекрестном шарнире. К слову сказать, такая механическая модель расчета может быть использована и для некоторых других узлов и элементов РН.

Положим для конкретности  $\alpha = \pi/2$ , а чтобы

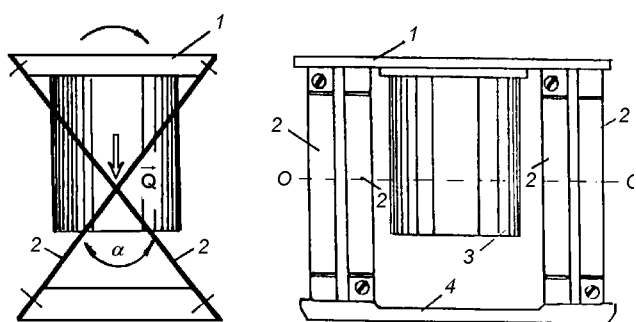


Рис. 1. Перекрестный упругий шарнир для подвеса двухстепенного гироскопа

лучше уяснить физический смысл изучаемого явления, ограничимся рассмотрением только низших форм колебаний.

Пусть под воздействием волны давления упругие пластины подвеса совершают изгибное движение, причем реализуется только первая, низшая форма. Тогда в направлении нормали одна получит перемещение  $r_1$ , другая —  $r_2$ , которые могут быть представлены в виде составляющих  $y_1, z_1$  и  $y_2, z_2$ . Это позволяет установить характер перемещений условной оси поворота подвижной части: вдоль оси  $y$  она переместится на величину  $y_1 + y_2, z_1, z_2$ , а вдоль оси  $z$  — на  $z_1 - z_2$  (рис. 2, а). Если эти формы проявляются синфазно на обоих перекрестных шарнирах, то происходят угловые колебания небольшой амплитуды (рис. 2, г). Если же в противофазе — возникают крутильные колебания гироскопа относительно оси  $z$  (рис. 2, в).

В том случае, когда формы изгибных перемещений пластин имеют вид, представленный на рис. 2, б, картина возмущенного движения прибора изменяется, и при синфазном колебании крайних точек оси  $O-O$  гироскоп совершает поступательное перемещение вдоль оси  $z$  (рис. 2, д), а при противофазном — колебательное относительно выходной оси (рис. 2, е).

Таким образом, корпус прибора при акустическом нагружении совершает прямолинейные колебания относительно осей  $y, z$  и угловые — относительно  $x, z$  (рис. 2, ж). Как известно, в этом случае двухстепенной дифференцирующий гироскоп имеет систематическую погрешность, а двухстепенной интегрирующий гироскоп — систематический дрейф [3]. Кроме того, в выходном сигнале прибора наблюдаются также периодические составляющие.

Двухстепенные гироскопы нашли применение не только как измерители углового движения летательных аппаратов, но и как чувствительные эле-

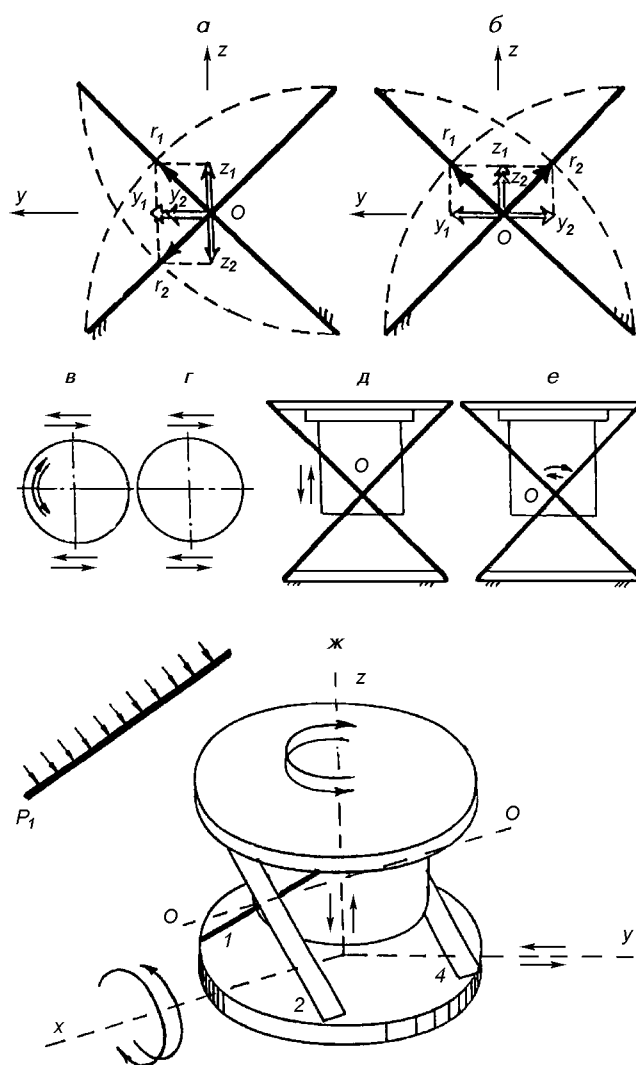


Рис. 2. Механизм взаимодействия акустического излучения с прибором на упругом подвесе

менты, в частности, гиросtabilизированных платформ. Поэтому требования высокой точности их показаний являются весьма злободневными при решении задач повышения технических характеристик подвижных объектов. И в первую очередь это относится к многоступенчатым ракетам-носителям.

Анализ влияния высших форм колебаний на динамику подвеса и прибор в целом показывает, что принципиального изменения картина прохождения звуковой волны не претерпевает, в то же время она несколько усложняется. Так, наиболее благоприятным для прибора является сочетание первой формы колебаний одной пластины с четными формами колебаний другой, т. е. с 2, 4, 6 и т. д. (рис. 3, а). В этом случае, как видно, перемещение

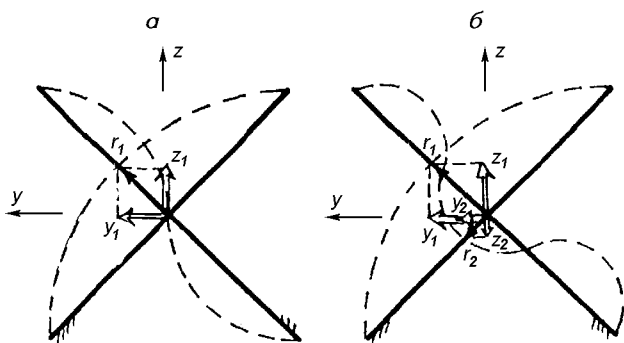


Рис. 3. Влияние форм колебаний пластин на движение выходной оси прибора

выходной оси прибора в направлении оси  $y$  будет обусловлено только колебаниями первой пластины  $r_1$ , а в направлении оси  $z$  — будет отсутствовать. Если же имеет место сочетание первой формы одной пластины и нечетных (1, 3, 5, 7...) форм другой — то возмущенное движение прибора усложняется, и он будет перемещаться как в направлении оси  $y$ , так и в направлении оси  $z$  (рис. 3, б). То есть, имеют место и поступательная, и угловая акустические вибрации подвеса.

Таким образом, приведенные модели наглядно демонстрируют механизм упругого взаимодействия гироскопа с акустическим излучением, а также возникающие предпосылки увеличения погрешности измерений.

Оставляя в стороне вопрос прохождения акустической волны через собственно гироскоп, ограничимся изучением ее взаимодействия с упругим подвесом (рис. 4). Здесь  $P_{10}$  — давление в падающей волне, лучи 1, 2, 3 — соответственно падающая, отраженная и прошедшая волна через первую пластину, а 1', 2' и 3' — через вторую.

Анализ изгибных колебаний плоских тел конечных размеров, к разряду которых можно отнести и пластины упругого подвеса, можно осуществить с помощью метода, изложенного в работе [4]. Суть его состоит в представлении возмущающего фактора (в нашем случае это акустическое излучение) и прогиба пластины двойным рядом по нормальным функциям в прямоугольной области. Этот метод имеет наиболее простую математическую интерпретацию, но позволяет, вместе с тем, достаточно глубоко исследовать динамику тел конечных размеров.

Для простоты предполагаем шарнирное крепление пластин и отсутствие «перекачки» энергии колеблющимися пластинами на сопряженные элементы конструкции. Рассмотрим двумерную задачу, так как по третьей координате пластины имеют

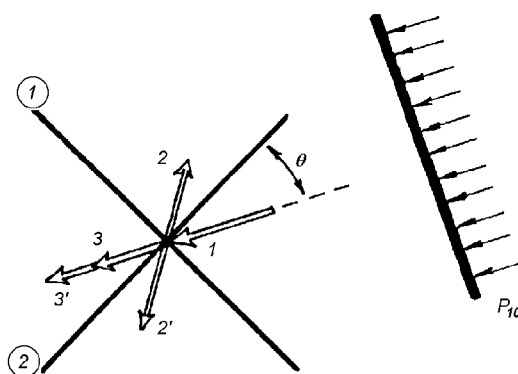


Рис. 4. Механизм прохождения волны давления через упругий подвес

значительную жесткость и перемещениями в этом направлении можно пренебречь.

Пусть ширина и длина пластин подвеса равны  $a$  и  $b$ . Толщина пластин  $2\delta$  постоянна по всей площади и значительно меньше других геометрических размеров:  $2\delta \ll a$ ,  $2\delta \ll b$ . Материал пластин подвеса примем абсолютно упругим, а также однородным и изотропным по всей площади. Длину генерируемой изгибной волны предполагаем превышающей шестикратную ее толщину, что позволяет, как известно, пользоваться уравнениями движения тонких пластин. Акустическое поле считаем диффузным, что допускает равновероятное распределение волны избыточного давления по углу  $\theta$  к нормали пластины.

С учетом малости прогибов  $r_i$  пластин при акустическом нагружении по сравнению с ее толщиной, боковые грани элемента площади длины  $dy_1$  и ширины  $dx_1$ , выделенного на расстоянии  $z_1$  от срединной плоскости  $x_1Oy_1$ , можно предполагать параллельными плоскостям  $x_1Oz_1$  и  $y_1Oz_1$  и перпендикулярными к срединной плоскости пластины во все время ее движения (рис. 5).

Какой бы функцией координат  $x_1$  и  $y_1$  ни был прогиб  $r$  пластины, его всегда можно представить в

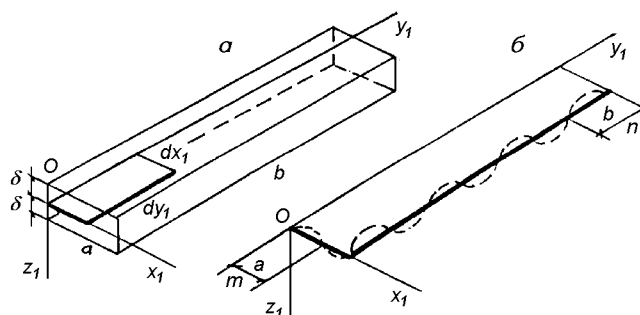


Рис. 5. Схема пространственного нагружения пластины (а) и распределение прогибов в двух направлениях (б)

прямоугольной области двойным рядом по нормальным функциям, то есть

$$r_k(x_1, y_1, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (r_{mn})_k \sin \frac{m\pi x_1}{a} \sin \frac{n\pi y_1}{b}, \quad (1)$$

где  $m = 1, 2, \dots, \infty$ ;  $n = 1, 2, \dots, \infty$  — числа полуволн изгиба соответственно вдоль осей  $x_1$  и  $y_1$  (рис. 5, б);  $r_k(x_1, y_1, t)$  — смещение точки пластины с координатами  $x_1, y_1$  в направлении оси  $z_1$ ;  $k = 1, 2, 3, 4$  — номера пластин подвеса.

Легко видеть, что каждый член ряда (1) удовлетворяет нулевым граничным условиям вида

$$\left[ r_k = \frac{\partial^2 r_k}{\partial x_1^2} \right]_{x_1=0}^{x_1=b} = 0, \quad \left[ r_k = \frac{\partial^2 r_k}{\partial y_1^2} \right]_{y_1=0}^{y_1=b} = 0. \quad (2)$$

Воспользовавшись общим уравнением динамики на виртуальном перемещении  $\delta r_k$ , можно записать уравнение движения пластин подвеса [5]:

$$\mu_k \ddot{r}_{kmn} + D_k \pi^4 (m^2 a^{-2} + n^2 b^{-2})^2 r_{kmn} = Q_{km_1 n_1}, \quad (3)$$

где  $Q_{km_1 n_1}$  — обобщенная сила, имеющая тот физический смысл, что произведение  $Q_{km_1 n_1} \delta r_{kmn}$  определяет работу падающей звуковой волны давления

$$P_1(x, y, t) = \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} P_{m_1 n_1} \sin \frac{m_1 \pi x_1}{a} \sin \frac{n_1 \pi y_1}{b}, \quad (4)$$

где  $m_1, n_1$  — числа полуволн давления, приходящиеся на длину и ширину пластины (рис. 5, б),  $P_{m_1 n_1}$  — амплитуда звукового давления соответствующей формы;  $D_k = E_k (2\delta)^3 [12(1 - \sigma_k)]^{-1}$  — цилиндрическая жесткость  $k$ -й пластины;  $E_k$  — модуль упругости пластин;  $\sigma_k$  — коэффициент Пуассона;  $\mu_k$  — масса единицы площади пластины.

Положим для конкретности, что

$$P_1(x_1, y_1, t) = P_{10} \exp i \left\{ \omega t - k_0 [x_1 \sin \theta - (y_1 - \delta) \cos \theta] + \frac{\pi}{2} \right\}, \quad (5)$$

где  $P_{10}$  — амплитуда давления,  $k_0 = \omega/c$  — волновое число,  $c$  — скорость звука в воздухе,  $\theta$  — угол падения волны. Пусть также  $m_1 = m, n_1 = n$ , что соответствует совпадению числа полуволн акустического давления и генерируемой в пластине опоры вибрации по двум измерениям — вдоль оси  $x_1$  ( $m_1 = m$ ) и вдоль оси  $y_1$  ( $n_1 = n$ ). Это условие принято называть пространственно-частотным резонансом.

Решение уравнения (3) с учетом (1), (2) и (5) имеет вид

$$\begin{aligned} r_{1,3}(x_1, y_1, t) = & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \rho_{1,3}(t) \times \\ & \times \left\{ \mu_{1,3} (\omega_{(1,3)mn}^2 - \omega^2) [(k_0 \cos \theta)^2 + (n\pi b^{-1})^2] \times \right. \\ & \times [(k_0 \sin \theta)^2 + (m\pi a^{-1})^2] \left. \right\}^{-1} \times \\ & \times \exp i \left\{ \omega t + k_0 [(b - \delta) \cos \theta - a \sin \theta] + \frac{\pi}{2} + \text{tg} \varphi(t) \right\} \times \\ & \times \{ [S_{(1,3)1} m\pi a^{-1} \exp i(k_0 a \sin \theta) - \\ & - S_{(1,3)2} n\pi b^{-1} \exp i(k_0 b \cos \theta) - S_{(1,3)1} S_{(1,3)2}] + \\ & + mn\pi^2 (ab)^{-1} \} \sin \frac{m\pi x_1}{a} \sin \frac{n\pi y_1}{b} = \frac{P_{10}}{A_{1,3}} B_{1,3} \times \\ & \times \exp i \left\{ \omega t + k_0 \left[ (b - \delta) \cos \theta - a \sin \theta + \frac{\pi}{2} + \text{tg} \varphi(t) \right] \right\}, \\ r_{2,4}(x_1, y_1, t) = & \frac{P_{10}}{A_{2,3}} B_{2,3} \times \end{aligned} \quad (6)$$

$\times \exp i \left\{ \omega t + k_0 [(b - \delta) \sin \theta - a \cos \theta] + \frac{\pi}{2} + \text{tg} \varphi(t) \right\}$ ,  
где  $A_{2,3} = A_{1,3} (\pi/2 + \theta)$ ,  $B_{2,3} = B_{1,3} (\pi/2 + \theta)$ ,  $\rho_j$ ,  $S_j$  — коэффициенты.

Теперь проанализируем возмущенное движение гироскопического датчика угловых скоростей (дифференцирующего гироскопа). Как известно, этот прибор предназначен для измерения абсолютной угловой скорости основания, на котором он установлен. Двухстепенной гироскоп измеряет угловую скорость РН только относительно оси  $O_2 z$ , называемой осью чувствительности, или входной осью (рис. 6). Упругий подвес представлен в виде пружины с коэффициентом жесткости  $c_0$ .

Свяжем с основанием, на котором установлен прибор, систему координат  $O_2 x y z$ . Начало совме-

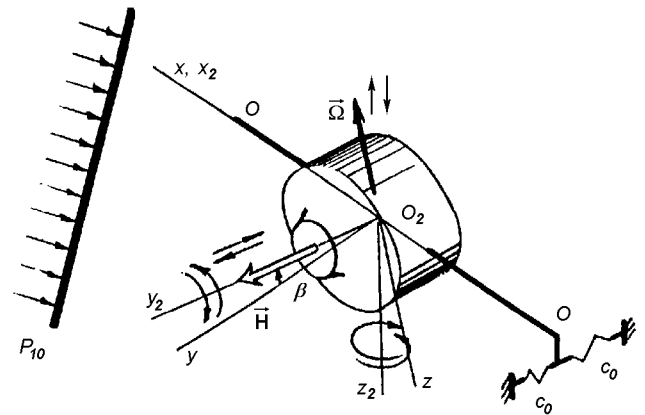


Рис. 6. Двухстепенной гироскоп на упругом подвесе

стим с центром масс гирокамеры (кожуха) и ротора. Ось  $O_{2x}$  направим по оси прецессии датчика угловых скоростей (ДУС). Ось  $O_{2y}$  в исходный момент времени совпадает с вектором кинетического момента гироскопа  $H$ .

Установившееся равновесное состояние  $\beta = \beta_0$ ,  $\dot{\beta} = 0$ , как известно, удовлетворяет условию  $\Omega H = -c_0 \beta_0$ , (7)

где  $\Omega$  — измеряемая угловая скорость основания (РН).

Акустическое излучение, воздействуя на упругий подвес, вызывает его угловое движение, на которое реагирует прибор. Дополнительный сигнал с выходной оси соответствует «ложной» угловой скорости и является акустической погрешностью измерений.

Считая, что угловые колебания подвеса в этом случае малы, как и их производные, можно записать значения проекций угловой скорости основания прибора для первых двух приближений в виде [2]:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \Omega \theta^0 + \dot{\psi}^0 + \Omega_z \theta^0, \\ \omega_y &= \dot{\theta}^0 - \Omega \psi^0 - \Omega_z \psi^0, \\ \omega_z &= \Omega + \Omega_z + \frac{1}{2} \Omega [(\theta^0)^2 + (\psi^0)^2] - \dot{\psi}^0 \theta^0, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\Omega$  — среднее значение угловой скорости, которую измеряет ДУС (примем постоянной величиной),  $\Omega_z$  — малое возмущение измеряемой угловой скорости ( $\Omega_z \ll \Omega$ );

$$\begin{aligned} \theta^0 &= \frac{y_1 \pm y_2}{l_1 \cos(\alpha/2)}, & \psi^0 &= \frac{z_1 \pm z_2}{(1/2)l_2}, \\ y_1 &= r_1 \sin(\alpha/2), & y_2 &= r_2 \sin(\alpha/2), \\ z_1 &= r_1 \cos(\alpha/2), & z_2 &= r_2 \cos(\alpha/2), \end{aligned}$$

$l_2$  — расстояние между точками пересечения пластин подвеса.

Первое приближение дает только периодические составляющие в выходном сигнале, второе — суперпозицию периодических и систематической составляющих:

$$\begin{aligned} r_{\beta_2} &= \frac{Hz}{I_n} P_{10}^2 \rho_\theta \rho_\psi \sin(\delta_{1,3} - \delta_{2,4}) + \\ &+ \frac{H}{I_n D} P_{10}^2 \left[ -\rho_\theta \rho_\psi z^3 \sin(\delta_{2,4} - \delta_{1,3}) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{H^2 z}{I_n} \rho_\theta \rho_\psi \cos(\delta_{1,3} + \delta_{2,4}) \right] + \\ &\quad + az^2 \rho_\theta \rho_\psi P_{10}^2 \cos(\delta_{1,3} + \delta_{2,4}), \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\rho_\theta = \frac{\operatorname{tg}(\alpha/2)}{A_{1,3} A_{2,4} b}, \quad \rho_\psi = \frac{2}{A_{1,3} A_{2,4} l_2},$$

$$\delta_{1,3} = k_0 [(b - \delta) \cos \theta - a \sin \theta],$$

$$\delta_{2,4} (\pi/2 + \theta) = \delta_{1,3} (\theta),$$

$$z = \omega/n, \quad D = [(1 - z^2)^2 + 4h_0^2 z^2]^{1/2},$$

$$h_0 = h/n, \quad h = b_0/n,$$

$b_0$  — коэффициент демпфирования,  $a = I_1/I$ .

Сдвиг нуля прибора («ложная» угловая скорость) будет определяться выражением

$$\Delta \omega = \frac{c_0 \beta_2}{H}. \quad (10)$$

Если  $\delta_{1,3} - \delta_{2,4} = 0$ , то формула (10) упрощается:

$$r_{\beta_2} = P_{10}^2 \rho_\theta \rho_\psi \left( \frac{H^2 z^2}{DI^2 n^2} + az^2 \right) \cos(\delta_{1,3} + \delta_{2,4}). \quad (11)$$

Таким образом, можно провести качественную и количественную оценки погрешности двухстепенного гироскопа от акустического воздействия. В стороне остались вопросы упругого взаимодействия других элементов конструкции с волной избыточного давления. Однако их влияние на работу ДУС существенно меньше.

В заключение отметим, что акустическая погрешность носит инструментальный характер, а не методический, и поэтому для борьбы с ней следует использовать соответствующие методы.

1. Гладкий В. Ф. Динамика конструкции летательного аппарата. — М.: Наука, 1969.—496 с.
2. Карачун В. В., Дидковский В. С. Об уменьшении погрешностей двухстепенного гироскопа // Механика гироскопических систем.—1982.—Вып. 1.—С. 44—47.
3. Карачун В. В., Лозовик В. Г. О влиянии акустического излучения на динамику чувствительных элементов ГСП // Космічна наука і технологія.—1996.—1, № 2-6.—С. 72—75.
4. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Под ред. Э. И. Григолюка: Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985.—472 с.
5. Karachun V. V., Yankovoy V. V., Potarova E. R. Resilient interaction of external acoustical emission with mechanical systems of management devices // Ankara International Aerospace Conf., 19-21 September, 1996. — P. 531—540.

**INFLUENCE OF ACOUSTIC EMISSION ON THE DYNAMICS OF RESILIENT SUSPENDERS OF ROCKET CONTROL DEVICES**

V. V. Karachun, N. A. Kubrak, E. R. Potarova, and N. V. Gnateyko

We study the wave processes which arise in resilient suspenders of spacecraft control devices under the influence of acoustic emission. We also analyse the dynamics of carriers of kinetic moment under the conditions of start movement from the Earth surface or from a small surface.