

УДК 629.7.054

В.Н. МЕЛЬНИК, М.Ф. КАЛИНИНА

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Украина

ПОПЛАВКОВЫЙ ПОДВЕС ГИРОСКОПА С НЕНУЛЕВОЙ ГАУССОВОЙ КРИВИЗНОЙ. ПЛОСКАЯ ЗВУКОВАЯ ВОЛНА

Проводится численный анализ упругих перемещений поверхности поплавкового подвеса двухстепенного гироскопа под действием плоской звуковой волны. Боковая поверхность предполагается выполненной в виде “бочки” с целью установления возможности уменьшения этим путем уровня упруго-напряженного состояния поверхности в акустическом поле. В рамках стационарной задачи выполнена количественная оценка максимальных значений координатных функций в плоскости среднего шпангоута – вдоль протяженности подвеса, вдоль параллели и в поперечном сечении. Созданы предпосылки для оптимизации геометрии подвеса.

Ключевые слова: поплавковый подвес, гауссова кривизна, плоская волна, координатные функции.

Введение

Стремительное развитие гиперзвуковой авиации и сверхжесткие условия полетной эксплуатации летательных аппаратов приводят к необходимости глубокого анализа и переосмысления многих технических решений бортовой аппаратуры. В первую очередь навигационно-пилотажных приборов. Оборонное научное агентство DARPA USA приняло решение ускорить разработку гиперзвуковых летательных аппаратов в ходе программы *ИИ*, которая призвана решить технические проблемы гиперзвукового полета. Пентагон твердо придерживается позиции перспективности разработки гиперзвуковых систем оружия, непререкаемой способности гиперзвуковых технологий обеспечить военное доминирование USA для решения общенациональных задач в сфере безопасности.

Первые полномасштабные испытания гиперзвукового самолета *X-plane (HX)* намечены на 2016 год. Самолет будет запускаться ракетой-носителем, а после выполнения полетного задания – опускаться на Землю с помощью парашюта. Это позволит снизить технологические риски разработки, с одной стороны, увеличить интенсивность тестирования перспективных систем авиационной техники – с другой [1].

Гиперзвуковой полет на скорости *20 М* позволяет доставить полезный груз в течение одного часа в любую точку планеты. Кроме того, нет необходимости использования неядерных баллистических ракет, пуск которых может спровоцировать ответный ядерный удар, да, к тому же, обнаруживается с достаточно большого расстояния.

Гиперзвуковые средства нападения и внешней разведки имеют более пологую траекторию движе-

ния, а также обладают способностью появляться в воздушном пространстве противника неожиданно, что разрешает эффективно преодолевать любую систему ПВО. В рамках программы *ИИ* намечены масштабные исследования гиперзвуковых технологий по пяти магистральным направлениям: системы внутренней теплозащиты; аэродинамика; наведение; навигация и управление движением; оборудование и двигатели.

При скорости *20 М* самолет *HX* нагреется до температуры превышающей 2000°C . Это соответствует температуре в доменной печи. Таким образом, проблемы с нагревом и последующим разрушением обшивки весьма актуальны и являются основной причиной многих неудачных испытаний гиперзвуковой ракеты *X-51* и гиперзвукового бомбардировщика *HTV-2*.

Конечной целью программы *ИИ* является доведение до пригодного к серийному производству уровня технологий гиперзвукового полета. В результате американские военные получают оружие глобального удара с невероятной дальностью стрельбы - 37 тысяч километров. Это позволит США наносить удары со своей территории по объектам, находящимся в любой точке планеты. При этом нужно отметить, что ни одно современное средство ПВО не способно поразить ракету, летящую со скоростью *20 М*. Исключение, пожалуй, составляют лишь лазеры на свободных электронах – *FEL* – мощностью свыше *1 Мвт*. Однако, кроме США, масштабную их разработку в настоящее время никто не ведет.

Обзор публикаций и выделение нерешенных задач

Поплавковые гироскопы, благодаря своей вы-

сокой точности и надежности, нашли широкое применение в авиации [2, 3]. Влияние внутренних причин на точность измерений, а также внешних возмущающих факторов всесторонне изучалось и исследовалось [4, 5, 6].

Вместе с тем, полунатурные испытания поплавковых гироскопов на акустическую устойчивость убедительно доказали, что проникающая звуковая волна служит причиной появления дополнительных погрешностей [7, 8]. Особенностью воздействия акустических полей на гироскоп является их пространственный характер, в отличие, например, от кинематического и вибрационного факторов, которые входят внутрь прибора через опоры.

Природа появления акустической погрешности установлена, она объясняется переходом механической системы подвеса из разряда абсолютно твердой в разряд импедансной, что порождает Эйлеровы силы инерции, приводящие к погрешностям измерений [8].

Дальнейшее изучение явления состоит в формировании практических рекомендаций по борьбе с его влиянием. В настоящей работе предлагается метод конструкционных решений, путем перехода от формы подвеса в виде кругового цилиндра – к подвесу с ненулевой гауссовой кривизной (в виде “бочкообразного” подвеса).

Постановка задачи данного исследования

Предполагается, что радиус поплавоквого подвеса вдоль его протяженности меняется по закону

$$R = R_0 + \delta \sin z,$$

где $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м - высота подъема образующей подвеса в среднем шпангоуте;

$R_0 = 0,015$ м - радиус торцов поплавок;

z - текущая координата.

Считается, что на поплавок действует плоская волна. Требуется установить максимальные перемещения его поверхности в трех направлениях в среднем шпангоуте, как более подверженному этому воздействию.

Изложение основного материала с обоснованием полученных результатов

Сравнительный анализ показывает, что перемещения $U_{z\max}$ для *катеноида* и *бочонка* практически совпадают для четырех уровней избыточного давления P_{10} .

Максимальные упругие перемещения вдоль параллели в случае *бочкоподобной* поверхности увеличились приблизительно на 25% по сравнению с *катеноидом*, в радиальном направлении увеличились почти в три раза по сравнению с *катеноидом*.

Внешний вид подвеса представлен на рис. 1.

Естественно, что увеличение упругих перемещений поверхности приведет к повышенному упруго-напряженному состоянию подвеса и, как следствие, к росту дополнительных погрешностей гироскопа.

Для значений избыточного давления в 200 Н/м^2 , 300 Н/м^2 и 400 Н/м^2 форма поверхности имеет вид, представленный на рис. 2.

Значения максимальных упругих перемещений $U_{z\max}$, $U_{\phi\max}$ и W_{\max} представлены в табл. 1 - 3 соответственно.

Таблица 1

Максимальные упругие перемещения $U_{z\max}$ поверхности среднего шпангоута

$\omega, \text{ с}^{-1}$	$U_z, \text{ м}$			
	$P_{10} = 100, \text{ Н/м}^2$	$P_{10} = 200, \text{ Н/м}^2$	$P_{10} = 300, \text{ Н/м}^2$	$P_{10} = 400, \text{ Н/м}^2$
600	$0,4729 \cdot 10^{-8}$	$0,9458 \cdot 10^{-8}$	$1,4187 \cdot 10^{-8}$	$1,8916 \cdot 10^{-8}$
1200	$0,4343 \cdot 10^{-8}$	$0,8686 \cdot 10^{-8}$	$1,3029 \cdot 10^{-8}$	$1,7372 \cdot 10^{-8}$
1800	$0,3734 \cdot 10^{-8}$	$0,7468 \cdot 10^{-8}$	$1,1202 \cdot 10^{-8}$	$1,4936 \cdot 10^{-8}$
2400	$0,2949 \cdot 10^{-8}$	$0,5898 \cdot 10^{-8}$	$0,8847 \cdot 10^{-8}$	$1,1796 \cdot 10^{-8}$
3000	$0,2051 \cdot 10^{-8}$	$0,4102 \cdot 10^{-8}$	$0,6153 \cdot 10^{-8}$	$0,8204 \cdot 10^{-8}$
3600	$0,1106 \cdot 10^{-8}$	$0,2212 \cdot 10^{-8}$	$0,3318 \cdot 10^{-8}$	$0,4424 \cdot 10^{-8}$
4200	$-0,02509 \cdot 10^{-8}$	$-0,05018 \cdot 10^{-8}$	$-0,07527 \cdot 10^{-8}$	$-0,10036 \cdot 10^{-8}$
4800	$-0,06615 \cdot 10^{-8}$	$-0,1323 \cdot 10^{-8}$	$-0,19845 \cdot 10^{-8}$	$-0,2646 \cdot 10^{-8}$
5400	$-0,1371 \cdot 10^{-8}$	$-0,2742 \cdot 10^{-8}$	$-0,4113 \cdot 10^{-8}$	$-0,5484 \cdot 10^{-8}$
6000	$-0,1911 \cdot 10^{-8}$	$-0,3822 \cdot 10^{-8}$	$-0,5733 \cdot 10^{-8}$	$-0,7644 \cdot 10^{-8}$

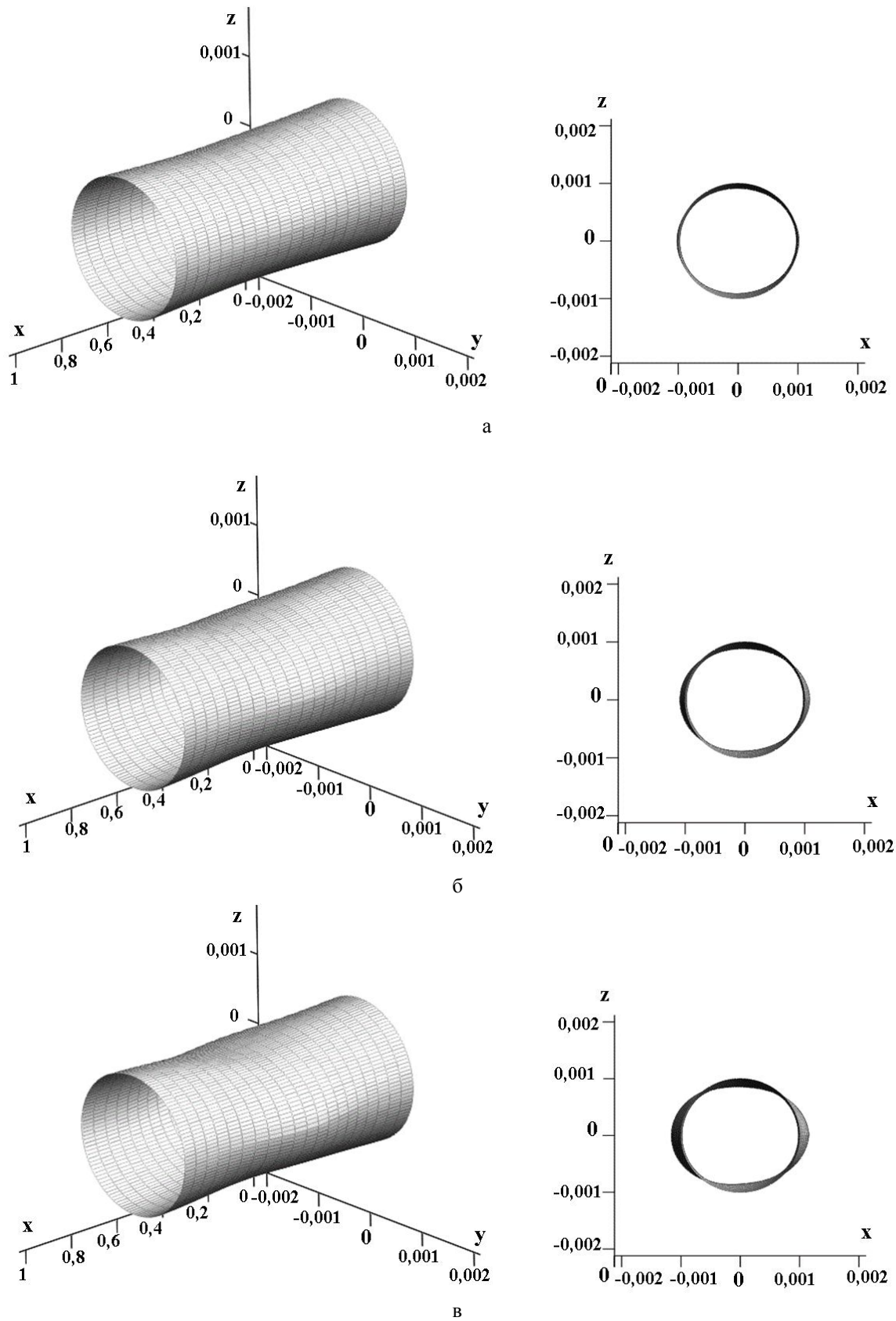


Рис. 1. Поверхность поплавкового подвеса в форме бочонка в аксонометрии и фронтальной плоскости при $P_{10} = 100 \text{ Н/м}^2$:
 а – $\omega = 600 \text{ с}^{-1}$; б – $\omega = 3000 \text{ с}^{-1}$; в – $\omega = 6000 \text{ с}^{-1}$. Стационарная задача

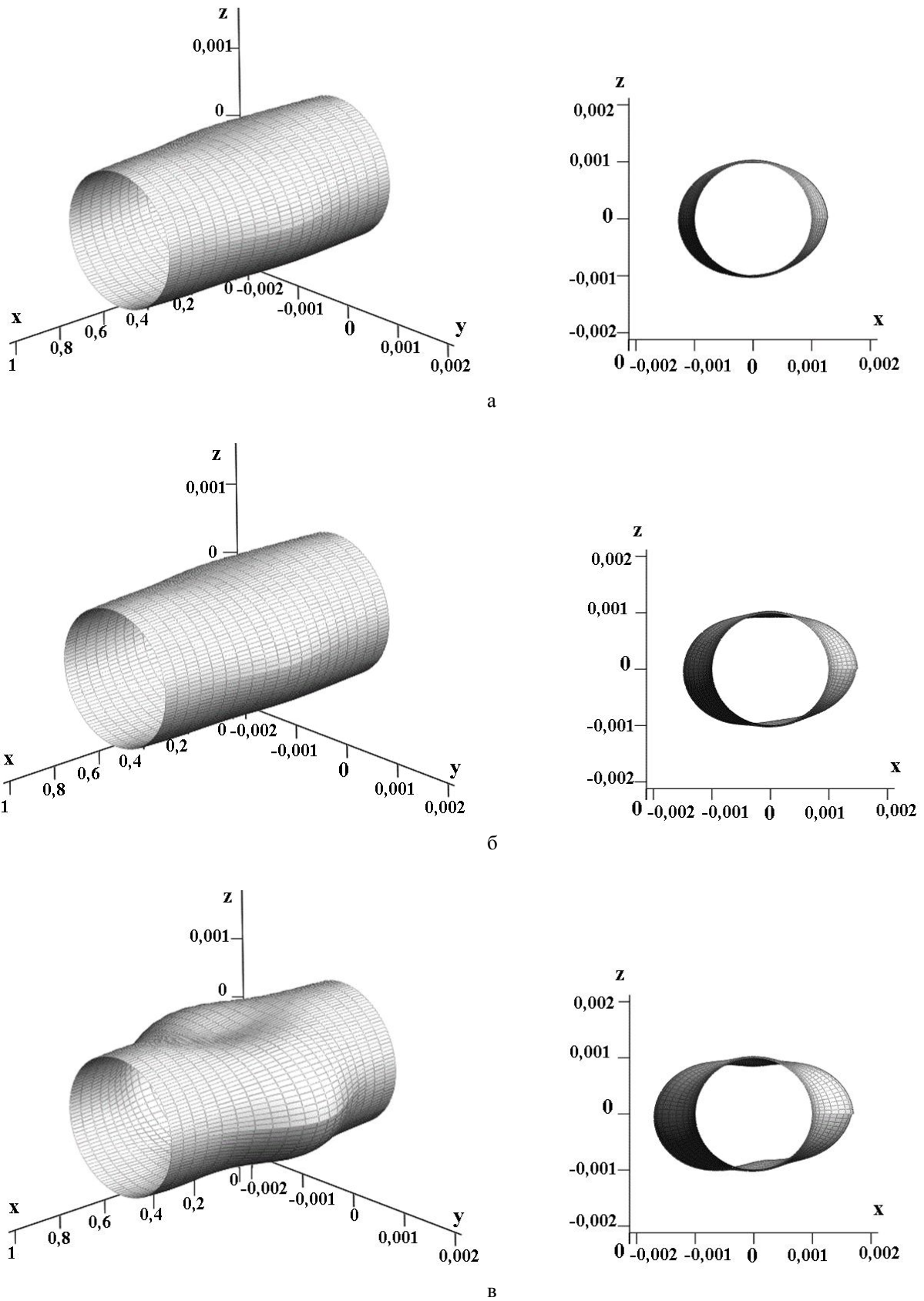


Рис. 2. Деформированная поверхность подвеса при различных уровнях звукового давления:
а – $P_{10} = 200 \text{ Н/м}^2$; б – $P_{10} = 300 \text{ Н/м}^2$; в – $P_{10} = 400 \text{ Н/м}^2$. Стационарная задача

Таблица 2

Максимальные упругие перемещения $U_{\text{фmax}}$ поверхности среднего шпангоута

$\omega, \text{с}^{-1}$	$U_{\text{ф}}, \text{м}$			
	$P_{10} = 100, \text{Н/м}^2$	$P_{10} = 200, \text{Н/м}^2$	$P_{10} = 300, \text{Н/м}^2$	$P_{10} = 400, \text{Н/м}^2$
600	$2,03 \cdot 10^{-8}$	$4,06 \cdot 10^{-8}$	$6,09 \cdot 10^{-8}$	$8,12 \cdot 10^{-8}$
1200	$2,022 \cdot 10^{-8}$	$4,044 \cdot 10^{-8}$	$6,066 \cdot 10^{-8}$	$8,088 \cdot 10^{-8}$
1800	$2,01 \cdot 10^{-8}$	$4,02 \cdot 10^{-8}$	$6,03 \cdot 10^{-8}$	$8,04 \cdot 10^{-8}$
2400	$1,995 \cdot 10^{-8}$	$3,99 \cdot 10^{-8}$	$5,985 \cdot 10^{-8}$	$7,98 \cdot 10^{-8}$
3000	$1,978 \cdot 10^{-8}$	$3,956 \cdot 10^{-8}$	$5,934 \cdot 10^{-8}$	$7,912 \cdot 10^{-8}$
3600	$1,959 \cdot 10^{-8}$	$3,918 \cdot 10^{-8}$	$5,877 \cdot 10^{-8}$	$7,836 \cdot 10^{-8}$
4200	$1,941 \cdot 10^{-8}$	$3,882 \cdot 10^{-8}$	$5,823 \cdot 10^{-8}$	$7,764 \cdot 10^{-8}$
4800	$1,923 \cdot 10^{-8}$	$3,846 \cdot 10^{-8}$	$5,769 \cdot 10^{-8}$	$7,692 \cdot 10^{-8}$
5400	$1,907 \cdot 10^{-8}$	$3,814 \cdot 10^{-8}$	$5,721 \cdot 10^{-8}$	$7,628 \cdot 10^{-8}$
6000	$1,894 \cdot 10^{-8}$	$3,788 \cdot 10^{-8}$	$5,682 \cdot 10^{-8}$	$7,576 \cdot 10^{-8}$

Таблица 3

Максимальные упругие перемещения W_{max} поверхности среднего шпангоута

$\omega, \text{с}^{-1}$	$W, \text{м}$			
	$P_{10} = 100, \text{Н/м}^2$	$P_{10} = 200, \text{Н/м}^2$	$P_{10} = 300, \text{Н/м}^2$	$P_{10} = 400, \text{Н/м}^2$
600	$2,151 \cdot 10^{-8}$	$4,302 \cdot 10^{-8}$	$6,453 \cdot 10^{-8}$	$8,604 \cdot 10^{-8}$
1200	$2,146 \cdot 10^{-8}$	$4,292 \cdot 10^{-8}$	$6,438 \cdot 10^{-8}$	$8,584 \cdot 10^{-8}$
1800	$2,138 \cdot 10^{-8}$	$4,276 \cdot 10^{-8}$	$6,414 \cdot 10^{-8}$	$8,552 \cdot 10^{-8}$
2400	$2,128 \cdot 10^{-8}$	$4,256 \cdot 10^{-8}$	$6,384 \cdot 10^{-8}$	$8,512 \cdot 10^{-8}$
3000	$2,115 \cdot 10^{-8}$	$4,23 \cdot 10^{-8}$	$6,345 \cdot 10^{-8}$	$8,46 \cdot 10^{-8}$
3600	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$6,3 \cdot 10^{-8}$	$8,4 \cdot 10^{-8}$
4200	$2,084 \cdot 10^{-8}$	$4,168 \cdot 10^{-8}$	$6,252 \cdot 10^{-8}$	$8,336 \cdot 10^{-8}$
4800	$2,067 \cdot 10^{-8}$	$4,134 \cdot 10^{-8}$	$6,201 \cdot 10^{-8}$	$8,268 \cdot 10^{-8}$
5400	$2,05 \cdot 10^{-8}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$	$6,15 \cdot 10^{-8}$	$8,2 \cdot 10^{-8}$
6000	$2,033 \cdot 10^{-8}$	$4,066 \cdot 10^{-8}$	$6,099 \cdot 10^{-8}$	$8,132 \cdot 10^{-8}$

Выводы и перспективы дальнейших исследований в данном направлении

Таким образом, “бочкообразная” боковая поверхность поплавка, при принятых параметрах подъема образующей подвеса, не позволяет решить в полной мере задачу оптимизации геометрии облоночной части поплавка.

Вместе с тем, так как реалии летной эксплуатации состоят в том, что акустическое излучение внутри приборного отсека имеет диффузную структуру, то полученные результаты нужно принять как ориентировочные и уточнить их именно с этих позиций. Погрешность прибора класса ДУСУ будет иметь вид, представленный на рис. 3.

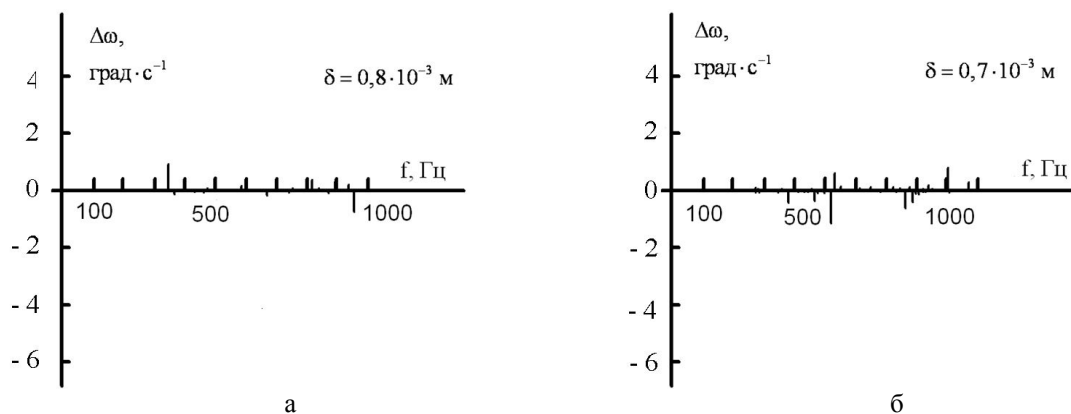


Рис. 3. Расчетная погрешность ДУСУ с бочкообразным подвесом при воздействии ударной волны:

δ - подъем образующей в среднем шпангоуте, $\Delta\omega$ - погрешность прибора

Литература

1. Гиперзвуковой прорыв: DARPA замахнулось на 20М [Электронный ресурс]// CNews.ru: Главные новости. – Режим доступа: <http://www.cnews.ru/news/top/print.shtml?2012/07/12/496232>. – 12.07.2012.
2. Браславский, Д.А. Авиационные приборы [Текст]: уч. пособ./ Д.А. Браславский, С.С. Логунов, Д.С. Пельпор; Мин. обр. РФ. – Москва: Машиностроение, 1965. – 561 с.
3. Иишинский, А.Ю. Ориентация, гироскопы и навигация [Текст]: моногр./ А.Ю. Иишинский; Ин-т пробл. мех. НАН РФ. – М.: Наука, 1976. – 671 с.
4. Фриденедер, Г.О. Инерциальные системы навигации [Текст]: учеб. пособие/ Г.О. Фридендер; Мин. обр. РФ. – М.: Физматгиз, 1961. – 435 с.
5. Луниц, Я.Л. Ошибки гироскопических приборов [Текст]: моногр./ Я.Л. Луниц. – Л.: Судостроение, 1968. – 232 с.
6. Автокомпенсация инструментальных погрешностей гиросистем [Текст]: моногр./ С.М. Зельдович, М.И. Малтинский, И.М. Окон, Я.Г. Остроумов; ЦНИИ “Электроприбор”. – Л.: Судостроение, 1976. – 255 с.
7. Мельник, В.Н. О влиянии проникающего акустического излучения на чувствительные элементы гиросtabilизированной платформы [Текст] / В.Н. Мельник, В.В. Карачун // Прикл. механика. – 2004. – Т. 40, № 10. – С. 122-130.
8. Mel'nik, V.N. Some Aspects of the Gyroscopic Stabilization in Acoustic fields [Текст] / V.N. Mel'nik, V.V. Karachun// Int. Appl. Mech. – 2002. – Т. 38, № 1. – P. 74-80.

Поступила в редакцию 6.03.2013, рассмотрена на редколлегии 13.03.2013

Рецензент: д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры В.В. Карачун, Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев

ПОПЛАВКОВИЙ ПІДВІС ГІРОСКОПУ ІЗ НЕНУЛЬОВОЮ ГАУССОВОЮ КРИВИЗНОЮ. ПЛОСКА ЗВУКОВА ХВИЛЯ

В.М. Мельник, М.Ф. Калініна

Проводиться чисельний аналіз пружних переміщень поверхні поплавкового підвісу двохступеневого гіроскопа під дією плоскої звукової хвилі. Бокова поверхня пропонується бути виготовленою у вигляді "бочки" з метою встановлення можливості зменшення цим шляхом рівня пружно-напруженого стану поверхні в акустичному полі. В рамках стаціонарної задачі виконано кількісну оцінку максимальних значень координатних функцій в площині середнього шпангоута - уздовж протяжності підвісу, вздовж паралелі і в поперечному перерізі. Створено передумови для оптимізації геометрії підвісу.

Ключові слова: поплавковий підвіс, гауссова кривизна, плоска хвиля, координатні функції.

FLOATING GIMBAL OF GYROSCOPE WITH NON-ZERO GAUSSIAN CURVATURE. PLANE SOUND WAVE

V.N. Melnik, M.F. Kalinina

A numerical analysis of the elastic displacement of the surface floating gimbals of the dual stage gyroscope under the influence of a plane sound wave. Lateral surface proposed to be made in the form of "barrels" in order to establish the possibility of reducing this way the level of elastic stress state of the surface in the acoustic field. Within the stationary problem made quantification of the maximum values of the coordinate functions in the plane of the middle frame - along the length of the suspension, along parallels in cross section. A background to optimize the geometry of the gimbals.

Key words: floating gimbals, Gaussian curvature, plane wave, coordinate functions.

Мельник Виктория Николаевна – д-р техн. наук, проф., зав. каф. біотехники і інженерії факультета біотехнології і біотехніки, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, Київ, Україна

Калініна Мирослава Федорівна – аспірант кафедри біотехники і інженерії факультета біотехнології і біотехніки, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, Київ, Україна, e-mail: Kalinina.Miroslava@yandex.ru