

Бойко Галина Владимировна

кандидат технических наук, ученый секретарь

Отдела ученого секретаря КПИ им. Игоря Сикорского

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Boiko Galina

Candidate of Technical Sciences, Academic Secretary of the

Scientific Secretary Department Kyiv Polytechnic Institute

named after Igor Sikorsky

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ВЛИЯНИЕ ПОДВЕСА ГИРОСКОПА НА ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЛУЧА

INFLUENCE OF THE GYROSCOPE SUSPENSION ON THE ACTION OF ULTRASONIC BEAM

Аннотация. Раскрыт механизм появления акустической погрешности инерциального сенсора с поплавковым жидкостатическим подвесом. Проведен сравнительный анализ реализаций выходного сигнала датчика ДУСУ2 при выключенном гиросагрегате. Определена средняя величина «сдвига нуля» от волнового совпадения продольной волны.

Ключевые слова: гироскоп, акустическая погрешность, ультразвуковой луч.

Summary. The mechanism of the appearance of the acoustic error of an inertial sensor with a float liquid-liquid suspension is disclosed. A comparative analysis of the realizations of the output signal of the DUSU2 sensor with the gyroaggregate turned off. The average value of the «zero shift» from the wave coincidence of the longitudinal wave is determined.

Key words: gyroscope, acoustic error, ultrasonic beam.

Введение. Инжектируемая в окружающую среду энергия ракетных двигателей той своей частью, которая реализуется в виде проникающего акустического излучения, будет оказывать негативное влияние на приборы и системы навигационных комплексов ухудшая их паспортные характеристики, а равно и понижая тактико-технические характеристики оборонной техники в целом. Причиной этих изменений является генерируемая в механических системах приборов, или в чувствительных элементах систем коррекции, акустическая вибрация. Как оказалось, многие перспективные решения в этом случае не только не выполняют своего предназначения, но и вредят. В частности, это в полной мере относится к многофазным системам с жидкофазными элементами, которые служат прекрасным проводником звуковых волн. Причем опасность проникающего акустического поля обусловлена его пространственным характером, в отличие от кинематического или силового, проходящего внутрь приборов через опоры.

Анализ состояния исследований изучаемой проблемы. Поплавковые гироскопы, нашедшие широ-

кое применение в инерциальных навигационных системах (ИНС), в полной мере подвержены тем нежелательным внешним воздействиям, о которых речь шла выше. Особенно опасна акустическая вибрация элементов подвеса для интегрирующего гироскопа, так как в этом случае погрешность прибора неизменно растет. Если поплавковый гироскоп сам выступает в роли чувствительного элемента, например, в трехосной гиросtabilизированной платформе, его погрешность (уходы) приведет к дрейфу ГСП относительно всех трех осей стабилизации [1, 2, 3].

Описание природы этого явления и построение расчетных моделей шло от простого к сложному. Вначале исследовалась динамика элементной базы подвеса гироскопа — пластин и оболочек — бесконечных по протяженности [4, 5, 6]. Затем рассматривались пластины конечных размеров [7] и перемещение абсолютно твердого цилиндра под действием акустической волны (речь шла о движении поплавка гироскопа) [8], плоско-параллельные пластины, соединенные упругой связью [9], напряженно-деформированное состояние поверхности поплавка

[10], действие на фрагменты поверхности поплава акустической нагрузки [11], струнного подвеса [12], и, наконец, изучалась динамика многофазного подвеса гироскопа [13]. Это были первые результаты анализа природы явления и описывали они собственно акустическую вибрацию поверхности какого-либо элемента, либо их сочетаний.

Комплексное изучение погрешностей гироскопических приборов в акустических полях началось позднее. В 1999 году появляются первые работы, посвященные ошибкам гировертикалей при старте РН [14], затем — погрешностям курсоуказания ракет-носителей и многомерным задачам упругости подвеса поплавкового гироскопа в акустических полях [15], а также динамике сложных гироскопических систем — трехосным гиросtabilизованным платформам [16], влиянию анизотропности жидкофазной части подвеса на погрешность поплавкового гироскопа [17, 18]. Расчетные схемы постепенно усложнялись и позволяли все глубже вскрывать природу возникновения дополнительных погрешностей гироскопов.

Качественно новый уровень приобрели эти исследования когда стали строиться расчетные модели с учетом одновременного действия двух внешних возмущающих факторов — кинематического (угловое движение корпуса летательного аппарата) и проникающего акустического излучения, имеющего пространственный характер [19]. По сути дела, такой подход оправдан и в плане более точного соответствия натурным условиям. Уже первые расчеты подтвердили соответствие теоретических и экспериментальных исследований на примере серийно выпускаемых промышленностью приборов класса ДУСУ, предназначенных для использования в летательных аппаратах длительного действия [20]. Как оказалось, в механических системах с носителями кинетического момента наличие переносного движения (качки корпуса РН) приводит к возникновению дополнительных гироскопических моментов, являющихся еще одним источником погрешностей измерений. Это проявляется в возникновении «ложной» угловой скорости во входном сигнале прибора.

Постановка задачи исследований. Проанализируем подробно влияние радиальных (в плоскости шпангоута) волн оболочечной части корпуса гироскопического датчика угловых скоростей класса ДУСУ и распространяющихся по параллели (окружных) упругих волн под действием проникающего ультразвукового излучения на возникновение *энергетической активности поддерживающей жидкости* в эксплуатационных условиях гиперзвукового полета. Генерируемая в корпусе ДУСУ радиальная волна и волна, бегущая вдоль параллели его внутренней поверхности, будут излучать в жидкостатическую часть подвеса гироскопа звуковые волны. Они, кроме всего прочего, будут служить причиной появления акустических поверхностей.

Цель исследований. С целью подтверждения аналитических прогнозов на предмет проявления резонансных особенностей подвеса в поле ультразвукового луча, была проведена оценка погрешности прибора при облучении его ультразвуковым лучом частоты 42 кГц . Речь идет о создании резонансной обстановки продольной (окружной) волной.

Методы исследований. В системах управления ракетами-носителями (РН), крылатыми ракетами, гиперзвуковыми ЛА широкое применение нашли, так называемые, поплавковые гироскопы, конструктивно лишённые основных недостатков «сухих» приборов — значительных по величине (и, главное, непостоянных) моментов сил сухого трения на выходной оси, а также недопустимо высокой чувствительности к ударным и вибрационным воздействиям, особенно нежелательных для интегрирующих гироскопов. Отличительной особенностью поплавковых модификаций стало наличие погруженной в тяжелую фторорганическую (удельный вес $1,9 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-3}$) или хлорорганическую (удельный вес $2,7 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-3}$) жидкость подвижной части прибора. Гиromотор располагается в герметичном, заполненном гелием или водородом, цилиндрическом поплавке, который продольными цапфами устанавливается в наружном, также герметичном, коаксиальном круговом цилиндре, выполняющем роль корпуса прибора. Опоры подвижной части в некоторых случаях выполняются на камнях.

Такое техническое решение характерно для целого ряда конструкций. Плавающие приборы, в отличие от поплавковых, не имеют остаточного веса.

Зазор между цилиндрической частью кожуха и корпусом весьма мал и составляет приблизительно $0,2 \text{ мм}$ в радиальном направлении. Большая вязкость жидкости и малая величина рабочего зазора позволяют обеспечить требуемый коэффициент демпфирования в интегрирующем гироскопе.

Все дальнейшие рассуждения будем строить ориентируясь на конкретную техническую реали-



Рис. 1. Ультразвуковая установка, модель 3560

зацию серийно выпускаемого авиационной промышленностью поплавкового прибора. Например, на гироскопический датчик угловых скоростей, унифицированный, класса ДУСУ2-30В, предназначенный для использования в летательных аппаратах длительного действия.

По принципу действия прибор является инерциальным, то есть не нуждается в связи с внешней средой. Динамические свойства датчика описываются колебательным звеном. По техническому исполнению ДУСУ представляет собой многофазную (полиагрегатную) структуру. По своему целевому назначению — служит измерителем угловой скорости гиперзвукового ЛА. Диапазон измерений угловых скоростей составляет $\pm 30 \text{ град}\cdot\text{с}^{-1}$. Порог чувствительности датчика ДУСУ2-30В около $0,45 \text{ град}\cdot\text{с}^{-1}$.

Тестирование датчика угловых скоростей на функциональную способность проводилось на ультразвуковой установке MINI ULTRASONIC CLEANER MODEL 3560 (рис. 1). Генерирование ультразвукового пучка обеспечивается пьезокерамической пластиной, что создает возможности для воспроизведения практически безградиентного вдоль линии фронта излучения.

Соответствие датчика угловых скоростей унифицированного ДУСУ2-30В на функциональную готовность проводилось облучением оболочечной части корпуса прибора достаточно широким звуковым пучком (рис. 2).

Датчик погружался, согласно требованиям на эксплуатацию ультразвуковой установки MINI ULTRASONIC CLEANER MODEL 3560, в наполненную водой ванночку и жестко фиксировался на штативе с помощью крепежа. Выходной сигнал прибора записывался измерительной аппаратурой для двух режимов — при выключенном гиросагрегате и при включенном гиросомоторе.

Результаты исследований. Сравнительный анализ реализаций выходного сигнала датчика дает возможность установить степень влияния ультразвукового луча, собственно, на полиагрегатный подвес



Рис. 2. Испытательный стенд: а) внешний вид; б) генератор плоской волны ультразвукового излучения

гироскопа в виде «сдвига нуля» и очертить динамику ее развития во времени при гиперзвуковом полете. Датчик ДУСУ устанавливался на штативе таким образом, чтобы поворотом корпуса прибора относительно своей оси на фиксированный угол φ можно было бы выяснить наиболее опасное направление действия проникающего акустического излучения при летной эксплуатации.

Как и предполагалось, при угле падения звуковой волны $\theta = 5^{\circ}03'$ продольная волна формирует резонанс совпадения в жидкостатической части подвеса и «сдвиг нуля» (в долях угловой скорости) прибора достигает $0,32 \text{ град}\cdot\text{с}^{-1}$. Для сравнения, на рис. 3 представлены графики «сдвига нуля» прибора в трех режимах: $\theta = 0^{\circ}$ (ультразвуковая волна падает перпендикулярно на поверхность корпуса); $\theta = 5^{\circ}03'$ (продольная волна создает резонансную ситуацию); $\theta = 10^{\circ}37'$ (изгибная волна создает резонансную ситуацию).

Очевидно, что средняя величина «сдвига нуля» от волнового совпадения продольной волны составляет около $0,2 \text{ град}\cdot\text{с}^{-1}$ (рис. 3, кривая 2). Волновое совпадение изгибной волны с ультразвуковым лучом оказывает гораздо большее влияние на выходной сигнал ДУСУ (рис. 3, кривая 3). Средняя величина составляет около $0,48 \text{ град}\cdot\text{с}^{-1}$, максимальная — достигает $0,65 \text{ град}\cdot\text{с}^{-1}$.

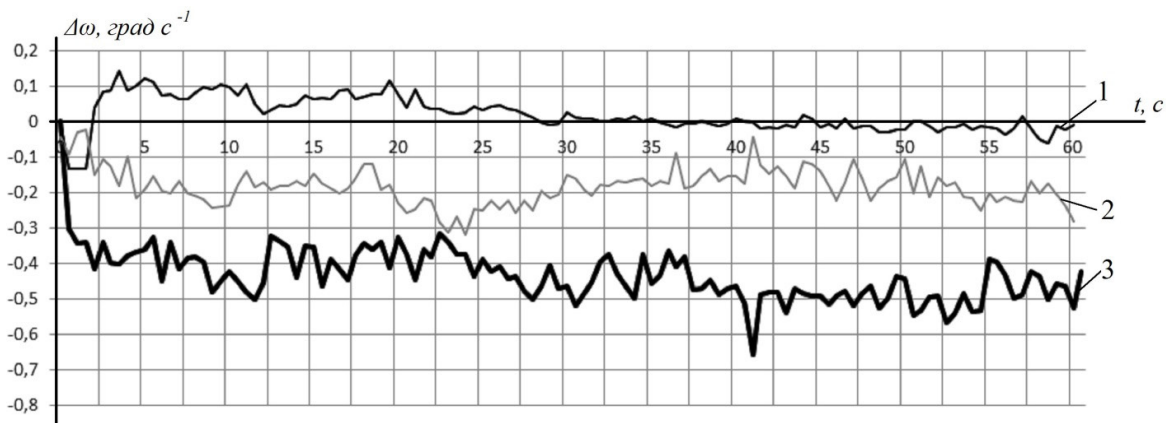


Рис. 3. Выходной сигнал ДУСУ при $\varphi = 0^{\circ}$: 1 - $\theta = 0^{\circ}$; 2 - $\theta = 5^{\circ}03'$; 3 - $\theta = 10^{\circ}37'$

Вывод. Проведенная стендовая полунаатурная аттестация серийно выпускаемого авиационной промышленностью двухстепенного поплавкового гироскопа класса ДУСУ2-30В дает возможность сказать, что при выключенном гироскопе подвес гироскопа реагирует на действие ультразвукового луча в виде «сдвига нуля» на величину, значительно превышающую пороговое значение.

Литература

1. 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.
2. Koshljakov, V.N. The some Aspects of Flaigt Safety in Conditions Penetrate Acoustic Radiation [Текст] / V.N. Koshljakov, V.V. Karachun, V.N. Mel'nik, V.G. Saverchenko, V. Kh. Balanin. // «Aviation in the XXI-st Century»: The World Congress, Kyiv, Ukraine, National Aviation University, September 14–16, 2003. — P. 2.37–2.40.
3. Melnik, V. N. Some Aspects of the Gyroscopic Stabilization in Acoustic fields [Текст] / V. N. Melnik, V. V. Karachun // Int. Appl. Mech. — 2002. — Т. 38, № 1. — P. 74–80.
4. Карачун, В.В. Задачі супроводу та маскування рухомих об'єктів [Текст]: моногр. / В.В. Карачун, В.М. Мельник; Нац. техн. ун-т України «КПІ». — К.: «Корнейчук», 2012. — 128 с.
5. Бойко, Г.В. Резонанс волнового совпадения в условиях гиперзвукового полета [Текст] / Г.В. Бойко // Космічна наука і технологія. — 2014. — Т. 20, № 3(88). — С. 28–33.
6. Карачун, В.В. Підводний об'єкт як плоска перешкода акустичному випромінюванню [Текст] / В.В. Карачун, В.М. Мельник «АКТУАЛНИ VYMOZENOSTI VEDY-2009»: MATERIALY V MEZINARODNI VEDECKO- PRAKTICKA KONFERENCE, Praha, 27.06.-05.07.2009. Dil 13. — Str. 14–17.
7. Карачун, В.В. Об особенностях акустического нагружения пластин конечных размеров [Текст] / В.В. Карачун // Проблемы прочности. — 1990, № 10. — С. 93–96.
8. Карачун, В.В. О перемещении абсолютно твердой оболочки под воздействием внешней акустической волны давления [Текст] / В.В. Карачун, В.С. Мартыненко // ДАН УССР. Сер. А. — 1991, № 3. — С. 42–45.
9. Карачун, В.В. Об одномерных изгибных колебаниях двухслойной пластины в поле избыточного давления [Текст] / В.В. Карачун // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Сер. Приборостроение. — 1986. — Вып. 16. — С. 8–9.
10. Мельник, В.М. Двовимірна задача пружної деформації поверхні оболонки внаслідок дифракції зовнішніх звукових хвиль на щілині [Текст] / В.М. Мельник, В.В. Карачун // Вісник ЖДТУ/ Технічні науки. — 2009, № 4(51). — С. 57–62.
11. Мельник, В.Н. Усилия и моменты на краях выпуклой оболочки [Текст] / В.Н. Мельник, В.В. Карачун // Авіаційно-космічна техніка і технологія. — 2009, № 8/65. — С.7–11.
12. Карачун, В.В. Дротяні елементи приладів в акустичному середовищі [Текст]: моногр. / В.В. Карачун, Н.А. Кубрак; НТУУ «КПІ». — К.: «Корнійчук», 2001. — 160 с.
13. Мельник, В.Н. Нелинейные колебания в полиагрегатном подвесе гироскопа [Текст]: моногр. / В.Н. Мельник, В.В. Карачун; НТУУ «КПІ». — К.: «Корнейчук», 2008. — 104 с.
14. Карачун, В.В. О погрешности построения вертикали при старте носителей [Текст] / В.В. Карачун, Е.Р. Потапова, В.Н. Мельник // Космічна наука і технологія. — 2000. — Т. 5, № 3–4. — С. 58–61.
15. Карачун, В.В. Многомерные задачи упругости подвеса поплавкового гироскопа [Текст] / В.В. Карачун, В.Н. Мельник, В.Г. Лозовик // Космічна наука і технологія. — 2000. — Т. 6, № 2/3. — С. 92–97.
16. Мельник, В.Н. Некоторые аспекты гироскопической стабилизации в акустических полях [Текст] / В.Н. Мельник, В.В. Карачун // Прикл. механика. — 2002, Т. 38, № 1. — С. 95–101.
17. Мельник, В.М. Вплив анізотропності рідиннофазної частини підвісу на похибку інтегруючого гіроскопа [Текст] / В.М. Мельник // Вісник НТУУ «КПІ». ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. — 2003. — Вып. 25. — С. 94–97.
18. Мельник, В.М. Нелінійні коливання рухомої частини поплавкового гіроскопа внаслідок неоднорідності рідиннофазної частини підвісу [Текст] / В.М. Мельник // Доповіді Нац. акад. наук України. — 2003, № 8. — С. 54–58.
19. V. V. Karachun, V. N. Mel'nick, I. Korobiichuk, M. Nowicki, R. Szewczyk, S. Kobzar The Additional Error of Inertial Sensors Induced by Hypersonic Flight Conditions // Sensors — 2016, 16 (3), 299; doi: 10.3390/916030299.
20. Карачун В.В., Мельник В.Н. Возникновение резонанса в акустической среде подвеса поплавкового гироскопа // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2016. — № 1/7 (79). — С. 39–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59892.