

**Технічні науки**

УДК 636.631.223.018

**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 широкое 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 поплавка 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 каустических 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  $42 \text{ кГц}$ . 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 лишены 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. Гиросотор 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 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 реализацию 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.



Рис. 1. Ультразвуковая установка, модель 3560

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



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

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 гироскопе и при включенном гироскопе.

**Результаты исследований.** Сравнительный анализ реализаций выходного сигнала датчика дает возможность установить степень влияния ультразвукового луча, собственно, на полиагрегатный подвес 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  $\varphi$  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  $0,65 \text{ град}\cdot\text{с}^{-1}$ .

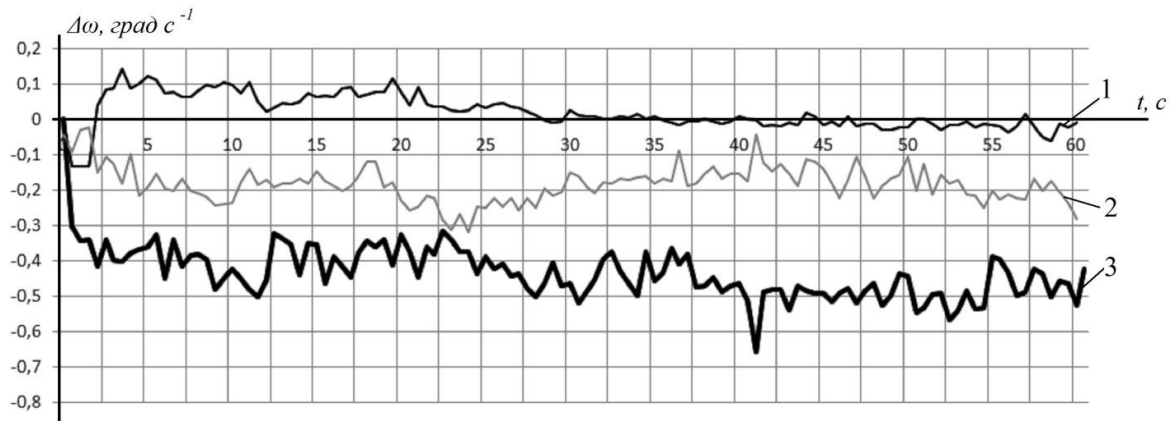


Рис. 3. Выходной сигнал ДУСУ при  $\varphi = 0^\circ$ : 1 –  $\theta = 0^\circ$ ; 2 –  $\theta = 5^\circ 03'$ ; 3 –  $\theta = 10^\circ 37'$

**Вывод.** Проведенная стендовая полунатурная аттестация серийно выпускаемого авиационной промышленностью двухстепенного поплавкового гироскопа класса ДУСУ2-30В дает возможность сказать, что при выключенном гидроагрегате 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 гиростабилизированной 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 "AKTUALNI 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. – Вип. 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: 10.3390/9 16030299.
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.