

6. О'Коннор, Дж. Искусство системного мышления: Необходимые знания о системах и творческом подходе к решению проблем [Текст]: пер. с англ. / Джозеф О'Коннор, Иан Макдермотт. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. — 256 с.
7. Рогов, Е. В. Архитектура системы анализа и обработки данных о поведении процессов [Текст] / Е. В. Рогов // Вестник Московского университета. Сер. 15. Вычисл. матем. и киберн. — 2001. — № 4. — С. 36–45.
8. Шаруда, С. С. Лінгвістична апроксимація технологічних показників хлібопекарського виробництва [Текст] / С. С. Шаруда, В. Д. Кишенько // Штучний інтелект. — Донецьк: ДонДІШІ, 2008. — № 4. — С. 188–193.
9. Толстова, Ю. Н. Основы многомерного шкалирования [Текст]: учебник / Ю. Н. Толстова. — М.: КДУ, 2006. — 160 с.
10. Максимов, В. И. Когнитивный анализ и управление развитием ситуации [Текст]: тезисы докладов в 3-х томах / В. И. Максимов // Материалы 1-й междунар. конференции. — М.: Институт проблем управления РАН, 2001. — Том 2. — С. 10–22.
11. Еремеев, А. П. Модели представления временных зависимостей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений [Текст] / А. П. Еремеев, В. В. Троицкий // Известия РАН. ТИСУ. — 2003. — № 5. — С. 75–88.
12. Юдицкий, С. А. Технология выбора целей при проектировании бизнес систем [Текст] / С. А. Юдицкий, П. Н. Владиславлев // Приборы и системы управления. — 2002. — № 12. — с. 60–66.
13. Кулинич, А. А. Система моделирования плохо определенных нестационарных ситуаций [Текст]: тезисы докладов / А. А. Кулинич // Труды второй международной конференции «Когнитивный анализ и управление развитием ситуации». — М.: ИПУ РАН, 2002. — С. 44–50.
14. Кулинич, А. А. Методология когнитивного моделирования сложных плохо определенных ситуаций [Текст]: тезисы докладов / А. А. Кулинич // Избранные труды второй международной конференции по проблемам управления, 17–19 июня 2003 г. — М.: ИПУ РАН, 2003. — С. 219–226.

ФАКТОРНО-ЦЕЛЕВОЙ АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МНОГОЦЕЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ПИВЗАВОДА

Работа посвящена исследованию вопроса оптимизации основных технологических процессов производства пива. Были

использованы методы факторного анализа и когнитивного моделирования. На основе проведенного экспертного опроса, с помощью метода многомерного шкалирования был осуществлен факторно-целевой анализ функционирования системы для дальнейшей разработки системы сценарного управления технологическим комплексом пивзавода. Приведены причинно-следственная и факторно-целевая диаграммы для процесса приготовления пива.

Ключевые слова: оптимизация производства пива, факторный анализ, ситуационное изменение, диаграмма Исикавы.

Романов Микола Сергійович, аспірант, асистент, кафедра автоматизації процесів управління, Національний університет харчових технологій, Київ, Україна, e-mail: gluk7c5@gmail.com.

Кишенько Василь Дмитрович, кандидат технічних наук, професор кафедри автоматизації процесів управління, Національний університет харчових технологій, Київ, Україна, e-mail: kvd@gmail.com.

Ладанюк Анатолій Петрович, доктор технічних наук, професор, кафедра автоматизації процесів управління, Національний університет харчових технологій, Київ, Україна, e-mail: ladaniuk@ukr.net.

Романов Николай Сергеевич, аспирант, ассистент, кафедра автоматизации процессов управления, Национальный университет пищевых технологий, Киев, Украина.

Кишенько Василий Дмитриевич, кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизации процессов управления, Национальный университет пищевых технологий, Киев, Украина.

Ладанюк Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, кафедра автоматизации процессов управления, Национальный университет пищевых технологий, Киев, Украина.

Romanov Mykola, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine, e-mail: gluk7c5@gmail.com.

Kishenko Vasil, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine, e-mail: kvd@gmail.com.

Ladaniuk Anatoliy, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine, e-mail: ladaniuk@ukr.net

УДК 6297.054

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41465

**Мельник В. Н.,
Карачун В. В.,
Бойко Г. В.**

ВОЗНИКНОВЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В ПОДВЕСЕ ПОПЛАВКОВОГО ГИРОСКОПА

В работе построена уточненная расчетная модель упругого взаимодействия проникающего акустического излучения с цилиндрической оболочкой корпуса поплавкового гироскопа. Введено понятие импеданса упруго податливой поверхности и определяется ее звукопроницаемость в радиальном направлении. Установлено условие «акустической прозрачности» корпуса вследствие наступления резонанса совпадения.

Ключевые слова: поплавковый гироскоп, нелинейные эффекты, резонанс совпадения, расчетные модели.

1. Введение

Исследования относятся к точному машиностроению и посвящены построению расчетных моделей упругого взаимодействия двухстепенного гироскопа с жидкостя-

стическим подвесом с проникающим акустическим излучением гиперзвукового полета летательных аппаратов.

Изучение нелинейных эффектов в гироскопе, обусловленных дифракционными явлениями на подвесе в натуральных условиях, имеет своей целью установление

особенностей резонансного типа и описание природы этого явления.

Отличительной особенностью поплавковых модификаций приборов инерциальной навигации является наличие погруженной в тяжелую жидкость подвижной части гироскопа. Гироскоп располагается в герметичном, заполненном инертным газом, цилиндрическом поплавке, который своими полуосями установлен в торцевых частях корпуса. Опоры, в некоторых случаях, выполняются на камнях.

Все дальнейшие рассуждения будем строить на основе конкретной технической реализации промышленного образца двухстепенного дифференцирующего гироскопа класса ДУСУ, предназначенного для измерения угловой скорости изделия.

Полиагрегатная структура подвеса гироскопа в эксплуатационных условиях гиперзвукового полета порождает нелинейные эффекты, приводящие к дополнительным погрешностям позиционирования летательного аппарата. Особенно ярко проявляющиеся при скоростях до 20 М. Таким образом, описание природы упругого взаимодействия проникающего акустического излучения с подвесом гироскопа, представляется актуальной и неотложной проблемой, решение которой, в конечном счете, позволит улучшить тактико-технические характеристики изделий. В первую очередь это относится к находящимся длительное время на открытых стартовых позициях аппаратов.

2. Анализ исследований изучаемой проблемы

Как уже отмечалось, подвес поплавкового гироскопа содержит два коаксиальных цилиндра, разделенных жидкостью [1, 2]. Во внутреннем, подвижном цилиндре, находится гироагрегат [3, 4]. Проникающее внутрь подвеса тепло и звуковые волны формируют градиент тепла и упруго-напряженное состояние поверхности подвеса [5, 6]. Кроме того, в элементах подвеса имеют место развивающиеся во времени нелинейные колебания [7, 8].

Последние исследования в области гироскопии констатируют сложную структуру возмущенного состояния подвеса гироскопа и строят приближенные расчетные модели явления [9–11].

Необходимость изучения уточненных моделей обусловлена адекватностью степени их соответствия приближенным моделям, что позволит очертить круг необходимой строгости построения механизма упругого взаимодействия факторов гиперзвукового полета с механическими системами бортовой аппаратуры.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объектом исследований — является процесс упругого взаимодействия внешнего проникающего излучения с механическими системами бортовой аппаратуры.

Целью научных исследований является построение точной расчетной модели упругого взаимодействия внешнего акустического излучения с механической системой поплавкового гироскопа в эксплуатационных условиях гиперзвукового полета.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Построить аналитическую модель корпуса прибора.
2. Установить закономерности упругого перемещения поверхности прибора под действием проникающего акустического излучения.

3. Установить круг опасных для работы прибора нелинейных явлений резонансного типа в виде «акустической прозрачности».

4. Построение расчетной модели

Дальнейшие рассуждения построим, основываясь на предположении малости толщины 2δ оболочки корпуса ДУСУ по сравнению с ее радиусом R , т. е. будем

считать, что $2\delta < \frac{R}{20}$ и меньше одной шестой части длины волны изгиба, т. е. $2\delta < \frac{1}{6}\lambda_n$.

Если на оболочку действуют только нормально приложенные к ней возмущения, тогда колебательное движение ее поверхности будет описываться системой уравнений [1–3]:

$$\begin{aligned} (2\delta E)^{-1} \nabla^4 \gamma - R \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} &= 0; \\ R \frac{\partial^2 \gamma}{\partial z^2} + D \nabla^4 W + R^4 m_{\Pi} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} &= R^4 q_{\Pi}, \end{aligned} \quad (1)$$

где W — радиальные смещения оболочки; γ — функция напряжений; $m_{\Pi} = \rho 2\delta$ — масса единицы поверхности; D — цилиндрическая жесткость оболочки; $q_{\Pi} = P_1' - P_3$ — разность звуковых давлений по обе стороны оболочки; ∇^4 — оператор Лапласа:

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial z^4} + \frac{\partial^4}{\partial \gamma^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial z^2 \partial \gamma^2},$$

в безразмерных координатах z и ϕ , которые отображают расстояния (в долях радиуса R).

Введя вспомогательную функцию Φ :

$$W = \nabla^4 \Phi; \quad \gamma = RE 2\delta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}, \quad (2)$$

приведем систему (1) к одному уравнению:

$$D \nabla^8 \Phi + R^2 2\delta E \frac{\partial^4 \Phi}{\partial z^4} + R^4 m_{\Pi} \nabla^4 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = R^4 q_{\Pi}. \quad (3)$$

Пусть на оболочку корпуса ДУСУ падает плоская звуковая волна, направление распространения которой составляет с выбранным радиальным направлением угол θ , а плоскость падения и плоскость шпангоута корпуса образуют угол ψ . Тогда, звуковое давление в падающей волне на внешней поверхности корпуса можно записать в виде:

$$P = P_0 \exp i [\omega t - k_0 2\delta (z \sin \theta \sin \psi - \phi \sin \theta \cos \psi)]. \quad (4)$$

Решение уравнения (3) ищем в виде:

$$\Phi = \Phi_0 \exp i [\omega t - k_0 2\delta (z \sin \theta \sin \psi - \phi \sin \theta \cos \psi)].$$

Если пренебречь рассеянием звука на поверхности оболочечной части корпуса, тогда, с учетом обозначений (2), упругие перемещения W поверхности в плоскости шпангоута можно записать в виде:

$$W = (P_1' - P_2) m_{\Pi}^{-1} \omega^{-2} \times \left(\frac{D\omega^2}{m_{\Pi} c_0^4} \sin^4 \theta + \frac{E2\delta}{m_{\Pi} \omega^2 (2\delta)^2} \sin^4 \psi - 1 \right)^{-1}. \quad (5)$$

Примем, что сопротивление корпуса симметричным колебаниям значительно больше сопротивлению анти-симметричным колебаниям, т. е.:

$$|Z_a| \ll |Z_c|,$$

а выражение для звукопроницаемости преобразуем к виду:

$$\tau_0 = \frac{1}{\left| 1 + Z \frac{\cos \theta}{2\rho_0 c_0} \right|^2}, \quad (6)$$

где импеданс $Z = \frac{P_1' - P_2}{i\omega W}$.

Как видно из выражения (5):

$$Z = im_{\Pi} \omega \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{гр}}} \right)^2 \sin^4 \theta - \left(\frac{\omega_{\text{пп}}}{\omega} \right)^2 \sin^4 \psi \right), \quad (7)$$

где $\omega_{\text{гр}} = 2\pi f_{\text{гр}}$; $\omega_{\text{пп}} = \frac{c_1}{R}$ — круговая частота собственных, чисто радиальных, колебаний кольца шпангоута, возникающих при сжатии-растяжении. При этом, длина продольной (окружной) волны λ_{Π} становится равной длине окружности кольца ($c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ — скорость продольной волны), если угол $\psi = \frac{\pi}{2}$ рад.

Из формулы (6) следует, что *звукопроницаемость корпуса может резко снижаться и при частотах ниже граничной $f_{\text{гр}}$* , в отличие от приближенной расчетной модели в виде пластины. Если $\omega \ll \omega_{\text{гр}}$, то второе слагаемое в формуле (7) пренебрежительно мало по сравнению с единицей и оболочечная часть корпуса станет «акустически прозрачной» (конечно, при отсутствии потерь).

В соответствии с выражением (6) имеем:

$$\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{гр}}} \sin^2 \theta - \frac{\omega_{\text{пп}}}{\omega} \sin^2 \psi \right)^2 = 1 - 2 \frac{\omega_{\text{пп}}}{\omega_{\text{гр}}} \sin^2 \theta \sin^2 \psi. \quad (8)$$

Некоторые частные случаи.

Пусть, $\psi = 0$, тогда:

$$\frac{\omega^2}{\omega_{\text{гр}}^2} \sin^4 \theta = 1; \quad \omega = \frac{\omega_{\text{гр}}}{\sin^2 \theta}. \quad (9)$$

И резонанс наблюдается при:

$$\omega_{\text{гр}} \leq \omega. \quad (10)$$

Если $\psi = \frac{\pi}{2}$ и $\theta = 0$, тогда резонанс имеет место при:

$$\omega_{\text{пп}} = \omega. \quad (11)$$

Таким образом, имеем:

1. $\omega_{\text{гр}} \leq \omega$;
2. $\omega_{\text{пп}} = \omega$.

Итак, построенная расчетная модель дала следующее:

1. Подтвердила наличие резонанса изгибных волн только на частотах выше граничной:

$$\omega = \frac{\omega_{\text{гр}}}{\sin^2 \theta} \Rightarrow \psi = 0.$$

Здесь каждой частоте соответствует свой угол совпадения θ .

2. Установила наличие дополнительно двух резонансов окружных волн на низких частотах:

$$- \omega = \omega_{\text{пп}} \sin^2 \psi \Rightarrow \frac{2\pi R}{\sin \psi} = \lambda_{\Pi} \sin \psi;$$

$$- \omega = \omega_{\text{пп}} = \frac{c_1}{R} = 2,56 (c^{-1}) \Rightarrow \psi = \frac{\pi}{2}; \quad \theta = 0.$$

$$f_{\text{пп}} = 40,76 \text{ кГц.}$$

Здесь $\omega_{\text{пп}}$ — радиальные собственные колебания кольца шпангоута.

При условии, что:

$$\omega_{\text{пп}} \neq \frac{1}{2} \frac{\omega_{\text{гр}}}{\sin^2 \theta \sin^2 \psi},$$

резонанс совпадений наступать не может.

5. Обсуждение результатов построения расчетной модели

Как и всякая уточненная расчетная модель, так и предполагаемая, позволяет открыть дополнительно некоторые нюансы динамики возмущенного движения полиагрегатного подвеса гироскопа в эксплуатационных условиях. Графический материал стендовых исследований позволил бы улучшить восприятие изучаемого явления.

Проведенные исследования будут интересны специалистам авиационно-космической техники.

Результаты являются предположением изучения природы явления на приближенных, грубых, расчетных моделях в виде конструкции с большим волновым размером — плоской.

6. Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- выбор расчетной модели — приближенной или точной — следует делать после вычисления волнового размера оболочки;
- точная расчетная модель позволяет установить наличие еще одного резонанса окружной волны;
- при комбинированном резонансе проявление волнового совпадения имеет место при конкретном значении углов совпадения θ_A и ψ_A ;
- установлено неравенство частоты собственных радиальных кольца шпангоута $\omega_{пп}$ и граничной частоты $\omega_{гр}$, когда можно исключить опасность возникновения резонанса.

Литература

1. Ишлинский, А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация [Текст]: моногр. / А. Ю. Ишлинский. — М.: Наука, 1976. — 672 с.
2. Феодосьев, В. И. Введение в ракетную технику [Текст]: моногр. / В. И. Феодосьев. Г. Б. Снярев. — М.: Оборонгизд, 1961. — 506 с.
3. Ригли, У. Теория, проектирование и испытания гироскопов [Текст]: пер. с англ. / У. Ригли, У. Холлистер, У. Денхард. — М.: Мир, 1972. — 416 с.
4. Мельник, В. Н. Гиперзвуковые технологии и некоторые проблемы навигации [Текст]: моногр. / В. Н. Мельник, В. В. Карачун; НТУУ «КПИ». — К.: «Корнейчук», 2013. — 152 с.
5. Бойко, Г. В. Линейно упругий подвес поплавкового гироскопа в акустическом поле [Текст] / Г. В. Бойко // Технологический аудит и резервы производства. — 2013. — № 6/1(14). — С. 7–10. — Режим доступа: \www/URL: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/19534>
6. Бойко, Г. В. Дополнительные погрешности поплавкового гироскопа при летной эксплуатации [Текст]: тез. доп. Всеукр. наук-практ. конф. молодых ученых, 18–20 листопада 2013 р. / Г. В. Бойко // Проблеми навігації і управління рухом. — Київ: НАУ, 2013. — С. 85.
7. Шибельский, В. Ю. Ейлерові сили інерції в неінерціальній системі координат поплавкового підвісу гіроскопа [Текст] / В. Ю. Шибельский // VIII Міжнародна наук-практ. конф. «Наука і інновації-2013», 07–15 жовтня 2013 р., Польща, Перемишль. — 2013. — С. 90–92.
8. Косова, В. П. Надзвуковий політ і похибки поплавкового гіроскопа [Текст] / В. П. Косова // Матеріали за VIII міжнародна наука практична конф. «ACHIEVEMENT OF HIGH SCOOOL-2012», 17–25 November, 2012. — Том 26. Технології. — Софія: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2012. — С. 30–32.
9. Karachun, V. V. Wave tasks of inertial navigation [Text] / V. V. Karachun, V. N. Mel'nik // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2010. — № 6/3(48). — P. 16–20. — Available at: \www/URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3238>
10. Karachun, V. V. Influence of diffraction effects on the inertial sensors of a gyroscopically stabilized platform: three-dimensional problem [Text] / V. V. Karachun, V. N. Mel'nik // International Applied Mechanics. — 2012. — Vol. 48, № 4. — P. 458–464. doi:10.1007/s10778-012-0533-y
11. Karachun, V. V. Elastic stress state of a floating-type suspension in the acoustic field. Deviation of the spin axis [Text] / V. V. Karachun, V. N. Mel'nik // Strength of Materials. — 2012. — Vol. 44, № 6. — P. 668–677. doi:10.1007/s11223-012-9421-2

ВИНИКНЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ В ПІДВІСІ ПОПЛАВКОВОГО ГІРОСКОПА

В роботі побудована уточнена розрахункова модель пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з циліндричною оболонкою корпусу поплавкового гіроскопа. Введено поняття імпеданса пружно податливої поверхні і визначається її звукопроникливість в радіальному напрямку. З'ясовано умови «акустичної прозорості» корпусу внаслідок прояву резонанса співпадання.

Ключові слова: поплавковий гіроскоп, нелінійні ефекти, резонанс співпадання, розрахункові моделі.

Мельник Вікторія Николаевна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: karachun11@i.ua.
Карачун Володимир Владимирович, доктор технічних наук, професор, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: karachun11@i.ua.

Бойко Галина Владимировна, аспірант, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: karachun11@i.ua.

Мельник Вікторія Миколаївна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Карачун Володимир Володимирович, доктор технічних наук, професор, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Бойко Галина Володимирівна, аспірант, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Mel'nik Viktorij, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: karachun11@i.ua.

Karachun Volodimir, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: karachun11@i.ua.

Bojko Galina, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: karachun11@i.ua.