

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

ШИБЕЦЬКИЙ ВЛАДИСЛАВ ЮРІЙОВИЧ

УДК 629.7.054:534.83

**ВЗАЄМОДІЯ ПОТУЖНОЇ УДАРНОЇ N-ХВИЛІ З ПРУЖНОЮ
КОНСТРУКЦІЄЮ ПІДВІСУ ГІРОСКОПА ТА ПОХИБКИ
ВИМІРЮВАНЬ**

Спеціальність 05.11.03 – Гіроскопи та навігаційні системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

КИЇВ – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі біотехніки та інженерії Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
КАРАЧУН Володимир Володимирович,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", професор
кафедри біотехніки та інженерії

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Корольов Володимир Миколайович
Академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра
Сагайдачного, провідний науковий співробітник
Наукового центру Сухопутних військ

кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник
Захарін Фелікс Михайлович
Державний науково-дослідний інститут авіації,
провідний науковий співробітник НДВ розробки та
модернізації бортового обладнання і систем
повітряної розвідки

Захист відбудеться "29" травня 2015 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.07 при Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37, корп. 1, ауд. 317.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37.

Автореферат розісланий " 27" квітня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої
ради, к.т.н., доцент



Ю.В. Киричук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Незаперечною перевагою гіроскопічних приладів в питаннях навігації і управління рухом постає їх автономність. Ця властивість не дає можливості навіть глобальним супутниковим системам посунути інерціальні засоби на другорядні позиції.

Стрімкий розвиток гіперзвукових технологій і екстремальні умови їх експлуатаційного застосування примусили переглянути і глибше проаналізувати точностні характеристики гіроприладів. В першу чергу це стосується одного з основних зовнішніх збурюючих чинників – проникаючого акустичного випромінювання, в тому числі і *N-хвилі*. Просторовий характер звукових хвиль вилучив будь-яку можливість боротьби з їх впливом вже відомими в гіроскопії методами. Нарешті, побудова розрахункових схем у вигляді сукупності абсолютно твердих тіл підвісу гіроскопа перестала «спрацьовувати», бо нелінійні пружні коливання в матеріалі елементної бази підвісу сформували явища, які примушують розглядати підвіс гіроскопа як імпедансну систему з розподіленими параметрами.

Таким чином, вивчення природи пружної взаємодії акустичних полів гіперзвукового руху з механічними системами інерціальних приладів за допомогою заново побудованих розрахункових моделей і з'ясування механізму появи додаткових похибок гіроскопа в експлуатаційних умовах, дозволять надалі окреслити шляхи зменшення похибок інерціальних сенсорів, а також поліпшити тактико-технічні характеристики як пілотованих, так і безпілотних літальних апаратів в цілому, зокрема, що являє собою надзвичайно **актуальну** задачу суборбітальних і атмосферних гіперзвукових технологій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Наукові дослідження проводилися на кафедрі біотехніки та інженерії НТУУ «КПІ» відповідно до НДР «Фокусування енергії і виникнення зон каустики в поліагрегатних системах під дією потужної *N-хвилі*», державний реєстраційний номер 0112U008154 від 23.10.2012 р. (здобувачем вивчається природа виникнення концентрації енергії в рідинностатичній складовій внаслідок виникнення хвильового співпадання).

Мета і задачі досліджень. Метою дослідження постає побудова розрахункових моделей пружної взаємодії проникаючого випромінювання з підвісом гіроскопа, які б дозволили з'ясувати природу вивчаємого явища.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

1. Узагальнюється наявний досвід вивчення взаємодії звукових хвиль з механічними системами бортової апаратури і формулюються принципи побудови розрахункових моделей явища, коли поверхня підвісу гіроскопа переходить в категорію імпедансної структури.

2. Розкривається природа ефекту вибіркості кінематичним збуренням фюзеляжу, у вигляді хитамиці, акустичної вібрації елементної бази підвісу гіроскопа.

3. Пояснюється механізм виникнення Ейлерових сил інерції в підвісі гіроскопа та їх вплив на формування додаткової похибки гіроскопа внаслідок дифракційних явищ гіперзвукового руху.

4. Виконується кількісний і якісний аналіз ступеня впливу геометрії лінії меридіану бічної поверхні поплавкового підвісу на похибку вимірювань. В плані вирішуваних задач проводиться аналіз доцільності переходу поплавкового підвісу з класичної циліндричної форми до поверхні з ненульовою гаусовою кривизною.

5. З метою підтвердження аналітичної моделі явища і отриманих висновків аналізу, проводяться стендові напівнатурні дослідження серійного поплавкового гіроскопа в полі ультразвукового променя гіперзвукового польоту. Експериментально виявлена небезпека появи енергетичної активності в рідиностатичній частині підвісу, яка, «по суті» справи, робить прилад непрацездатним. Цим самим доводячи безумовну необхідність створення для пілотажно-навігаційного обладнання акустичного «комфорту» в експлуатаційних умовах.

Об'єктом досліджень слугує процес пружної взаємодії проникаючого ззовні акустичного випромінювання з підвісом гіроскопа в умовах гіперзвукового руху літального апарату.

За предмет досліджень обрано серійно випускаємий промисловістю датчик кутових швидкостей класу ДКШУ, який використовується в літальних апаратах тривалої дії.

Методи досліджень ґрунтуються на використанні:

- диференціальних рівнянь тонких оболонок для визначення координатних функцій поплавкового підвісу під впливом проникаючого акустичного випромінювання при асиметричному та циклічному навантаженні (розділ 1);

- методів теоретичної механіки для визначення Ейлерових сил, що діють на поплавок (розділ 1);

- методів прикладної теорії гіроскопів для обчислення «хибної» кутової швидкості прецесійного руху поплавкового підвісу (розділ 1, розділ 3, розділ 5);

– методів прикладної акустики та опору матеріалів для обчислення пружних переміщень поверхні підвісу під дією плоскої хвилі і в дифузному полі (розділ 2, розділ 5);

– теореми Резаля і методів теорії гіроскопів для обчислень переміщень підвісу в акустичному полі (розділ 1, розділ 4, розділ 5).

Наукова новизна одержаних результатів

1. Побудовані найбільш узагальнені розрахункові моделі тривимірної взаємодії потужної *N*-хвилі з лінійно-напруженим підвісом поплавкового гіроскопа в експлуатаційних умовах. Означені причини виникнення «хибної» кутової швидкості на входній осі гіроскопа, і її трансформація в похибку вимірювань.

2. Розкрита природа виникнення додаткових похибок двостепеневого поплавкового гіроскопа в натурних умовах гіперзвукового руху і окреслені умови породження і розвитку в часі і просторі Ейлерових сил інерції, як чинника циклічного пружно-напруженого стану імпедансної поверхні поплавкового підвісу в дифузному полі проникаючого акустичного випромінювання, формуючого ці похибки.

3. В рівняннях збуреного руху підвісу поплавкового гіроскопа визначене місце і ступінь впливу Ейлерових сил інерції на похибку вимірювань за надзорстких умов гіперзвукового польоту.

4. Звертається увага і аналітично обґрунтовується незмінна присутність ефекту вибіркості з боку дії на гіроскоп двох зовнішніх збурюючих чинників – проникаючого акустичного випромінювання і хитавиці основи, асинхронної і полігармонічної за структурою. Доведено, що за цих умов у вихідному сигналі гіроскопа окрім детермінованих складових похибки, незмінно з'являється сталий зсув нуля, подібно до синхронної хитавиці.

5. Будуються розрахункові моделі поплавкового підвісу з ненульовою гаусовою кривизною, як ефективного засобу боротьби з додатковими похибками гіроскопа в умовах гіперзвукового руху. Створена практична основа для вирішення задач оптимізації за допомогою побудованих програм обчислень на ПЕОМ.

Практична цінність одержаних результатів

1. Практично доведена необхідність створення «акустичного комфорту» для пілотажно-навігаційних приладів при експлуатаційному застосуванні. Стендові напівнатурні випробовування промислового зразка двостепеневого поплавкового гіроскопа класу ДУСУ2-30В довели слушність теоретичних передбачень стосовно небезпеки виникнення в підвісі особливостей резонансного типу та окреслили ступінь впливу акустичного випромінювання гіперзвукового польоту на паспортні

характеристики пілотажно-навігаційного обладнання у вигляді додаткових похибок. З'ясовано, що за прояву хвильового співпадання неприпустимо різко зростають додаткові похибки гіроскопа, що ставить під сумнів функціональну спроможність приладів інерціальної навігації.

2. Запропоновано методи пасивної звукоізоляції, з яких окремі технічні рішення мають охоронні документи: Патент України № 80018 «Поплавковий гіроскоп»; Патент України № 80065 «Поплавковий гіроскоп».

3. Матеріали дисертації знайшли застосування в розробках ПАТ «НВО «КЗА ім. Г.І. Петровського» на етапі проектування дослідних зразків бортової апаратури при визначенні похибок гіроприладів.

4. Результати наукових і стендових досліджень упроваджені в навчальному процесі кафедри в курсах «Робототехнічні системи і комплекси ФБВ» та «Комп'ютерне проектування обладнання ФМП».

Результати досліджень можуть бути використані спеціалістами галузі при тестуванні виробів навігаційних приладів і бортової апаратури.

Особистий внесок здобувача

Магістральні напрямки наукових досліджень, а також головні теоретичні положення дисертації опрацьовані разом з науковим керівником. Вирішення конкретних задач чисельного аналізу нелінійних коливань в поплавковому підвісі гіроскопа та їх перетворення на додаткові похибки гіроскопа в експлуатаційному режимі, створення програмного продукту, його апробація і висновки щодо подальшого використання у промисловості, а також наладка робочого місця на стенді, виконані особисто здобувачем.

Доцільність переходу гаусової кривизни поплавкового підвісу з нульової до обраної, окреслена дисертантом для серійного зразка двостепеневого гіроскопа з рідинностатичним підвісом.

Апробація результатів дисертації

Основні результати досліджень доповідалися, обговорювалися та отримали визнання на наступних науково-практичних конференціях:

– Міжнародна науково-технічна конференція «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи», м. Київ, Україна: XI (24-25 квітня 2012 р.); XII (23 квітня 2013 р.); XIII (23-24 квітня 2014 р.);

– Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос», м. Дніпропетровськ, Україна: XIV (11-13 квітн. 2012 р.); XV (12 квітня 2013 р.); XVI (9-11 квітня 2014 р.);

– VIII Міжнародна науково-практична конференція «Перспективные разработки науки и техники - 2012», 27-29 травня 2013 р., м. Київ, Україна;

– VI Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси - 2013», 27-29 травня 2013 р., м. Київ, Україна;

– Науково-практична конференція «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки», 27 червня 2013 р., м. Київ, Україна;

– VIII Міжнародна науково-практична конференція «Наука и инновации – 2013», 07-15 жовтня 2013 р., м. Перемишль, Польща;

– VIII Міжнародна науково-практична конференція «Достижения высшей школы – 2013» :, 17-25 листопада 2013 р., м. Софія, Болгарія;

– Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених і студентів «Проблеми навігації і управління рухом», 18-20 листопада 2013 р., м. Київ, Україна.

Публікації. За матеріалами дисертації надруковані 26 публікації: 6 науково-технічних статей, 1 стаття опублікована в м. Чита (Росія), 1 стаття у м. Санкт-Петербург (Росія), 1 стаття у м. Оберн (США), 15 доповідей і тез доповідей, 2 Патенти України на корисну модель.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота містить Перелік умовних позначень і скорочень, Вступ, Аналіз стану проблеми і постановку задач досліджень, п'ять Розділів, Висновки, Список використаних літературних джерел з 127 найменувань та 36 Додатків на 84 сторінках. Основна частина роботи складає 141 сторінку друкованого тексту. В основній частині наведені 59 рисунків, 16 таблиць, 2 програми для чисельних обчислень.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтовується актуальність теми досліджень, розкривається сутність поставленої наукової задачі, розкривається зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, формується мета і задачі досліджень, окреслюється об'єкт досліджень і обирається предмет досліджень, визначаються методи досліджень, підсумовується наукова новизна одержаних результатів та їх практична цінність, особистий вклад пошукача і апробація результатів дисертації, публікації за матеріалами дисертації, структура і об'єм дисертації.

В розділі **Аналіз стану проблеми і постановка задачі досліджень** надається технічна характеристика сучасних надзвукових літальних апаратів – крилатих ракет, гіперзвукових літаків (пілотованих і безпілотованих), балістичних ракет, – які в експлуатаційних умовах суборбітального і атмосферного руху знаходяться в наджорстких експлуатаційних умовах, розкривається причина виникнення звукових хвиль високої інтенсивності і ударної *N-хвилі* та їх пружна взаємодія з

бортовою апаратурою літальних апаратів, окреслюються і конкретизуються магістральні та локальні задачі досліджень.

Перший розділ присвячений побудові на літальному апараті жорстко з ним зв'язаної триортогональної системи координат за допомогою тривісної гіростабілізованої платформи, чутливими елементами якої слугують двостепеневі гіроскопи з рідинностатичним підвісом. Визначаються координатні функції поплавкового підвісу і Ейлерові сили інерції, які породжені пружно-напруженим станом підвісу, і окреслюють додаткові похибки інерціальних сенсорів в експлуатаційних умовах.

У випадку *стаціонарної* задачі, пружні переміщення поверхні підвісу розвиваються за законом:

$$U_z(z, \varphi) = a_1^{(1)} z^2 (1-z)^2 \cos \varphi \cos z + a_1^{(2)} z^2 (1-z)^2 \sin \varphi \sin z; \quad (1)$$

$$U_\varphi(z, \varphi) = b_1^{(1)} z^2 (1-z)^2 \sin \varphi \cos z + b_1^{(2)} z^2 (1-z)^2 \cos \varphi \sin z; \quad (2)$$

$$W(z, \varphi) = c_1^{(1)} z^4 (1-z)^4 \cos \varphi \cos z + c_1^{(2)} z^4 (1-z)^4 \sin \varphi \sin z. \quad (3)$$

Відповідно до розглянутої структури акустичного впливу, чисельний аналіз пружно-напруженого стану поплавкового підвісу проводиться для *плоскої монохроматичної хвилі* і для *дифузної структури звукового поля*.

Логічним продовженням постає аналіз пружного стану підвісу у разі ненульової *гаусової кривизни* його поверхні з метою виявлення локальних особливостей і формулювання рекомендацій для оптимізації лінії меридіану

Другий розділ підпорядкований кількісному аналізу пружних нелінійних коливань поверхні підвісу гіроскопа з нульовою і ненульовою гаусовою кривизною під дією проникаючого акустичного випромінювання. Вивчається дія плоскої звукової хвилі і дифузного поля.

Як походить з обчислень, максимальні пружні переміщення поверхні підвісу у вигляді класичного колового циліндра у випадку дії плоскої хвилі спостерігаються при акустичному тиску $P_{10} = 400 \text{ Н / м}^2$ і складають $1,89 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$ уздовж протяжності, $6,16 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$ – уздовж паралелі і $5,36 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$ – в площині шпангоута. Амплітуди пружних переміщень поверхні, відповідно до розрахункових формул, пропорційні величині надлишкового тиску P_{10} .

Ведучи мову про дифузне поле, мається на увазі, що в цьому випадку поширення плоских хвиль акустичного випромінювання рівномірне для всіх кутів падіння ε_1 і ε_2 .

Зовнішній вигляд підвісу в дифузному полі зображений на рис. 1 для значення надлишкового тиску 400 Н / м^2 при частоті випромінювання $\omega = 3000 \text{ с}^{-1}$.

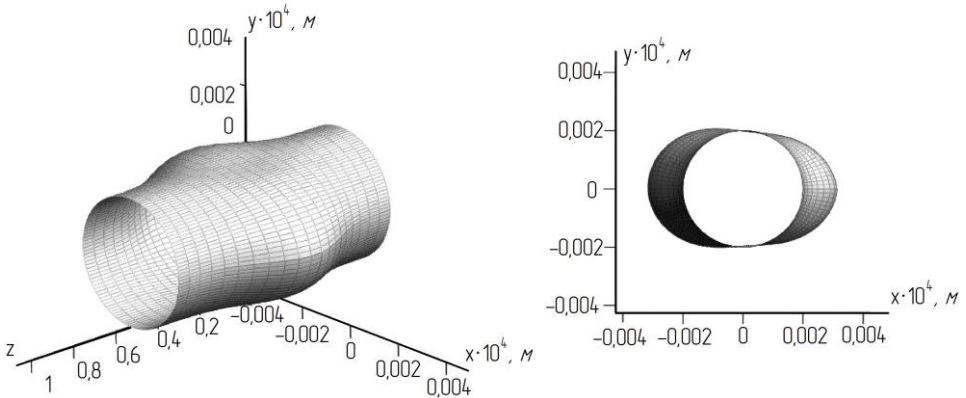


Рис. 1. Пружно-напружений стан поверхні підвісу в дифузному полі в аксонометрії і у фронтальній площині

Обчислення довели, що максимальні пружні переміщення при $P_{10} = 400 \text{ Н / м}^2$ в напрямку протяжності підвісу складають $0,98 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$, $5,75 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$ – уздовж паралелі і $12 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$ – в радіальному напрямку.

Якщо при $P_{10} = 400 \text{ Н / м}^2$ в дифузному полі максимальні значення пружних переміщень уздовж протяжності зменшилися на $0,9 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$, а в коловому напрямку – на $0,4 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$, навпроти, в поперечній площині вони збільшилися на $6,7 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$.

Якщо перейти від підвісу у вигляді класичного колового циліндра, тобто з нульовою гаусовою кривизною, до підвісу з визначеною гаусовою кривизною, наприклад $k = 1,316 \text{ м}^{-2}$, тоді виявляється, що значення прогинів під дією плоскої акустичної хвилі у площині шпангоута зменшуються практично в два рази і складають $3,13 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$ при $P_{10} = 400 \text{ Н / м}^2$.

Максимальні значення пружних переміщень $U_{z\max}$ уздовж протяжності підвісу дорівнюють на частоті звукової хвилі $\omega = 3000 \text{ с}^{-1}$ $0,8 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$ при $P_{10} = 400 \text{ Н / м}^2$. Максимальні переміщення $U_{\varphi\max}$ на частоті 3000 с^{-1} сягають значень $4,8 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}$ при акустичному тиску $P_{10} = 400 \text{ Н / м}^2$.

Зовнішній вигляд поверхні підвісу *катеноїдної* форми для значень акустичного тиску в 400 Н / м^2 при $\omega = 3000 \text{ с}^{-1}$ в дифузному полі наведений на рис. 2.

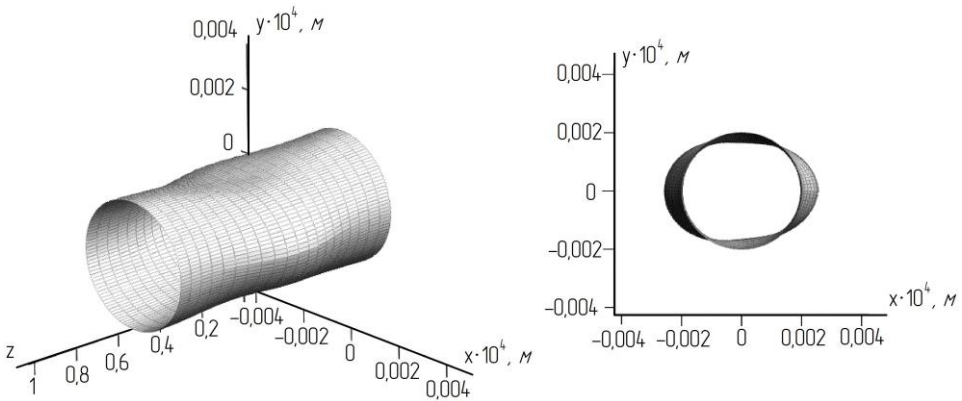


Рис. 2. Поверхня підвісу *катеноїдної* форми для значень акустичного тиску в 400 Н / м^2 при $\omega = 3000 \text{ с}^{-1}$ в дію дифузного поля

У **третьому розділі** уточнюються диференціальні рівняння збуреного руху підвісу з нульовою гаусовою кривизною навколо осі прецесії, обчислюються додаткові похибки двостепеневих гіроскопічних чутливих елементів ГСП за синхронної та асинхронної хитавиці, визначається стала та періодична складові кута повороту рухомої частини.

Четвертий розділ присвячений вивченню дифракційних явищ на підвісі гіроскопа, які породжують сталі похибки кутового положення ГСП за синхронної та асинхронної хитавиці фізеляжу. Вивчається найбільш загальна – тривимірна – задача для двох видів підвісу – катеноїдної та опуклої форм.

Для класичного колового циліндру числовий аналіз доводить, що на частоті хитавиці ЛА у 300 Гц систематична похибка приладу складає $0,24 \text{ град / с}$, а на частоті 500 Гц – $0,35 \text{ град / с}$ (рис. 3, а). На частоті 600

$\Gamma_{\text{ц}} - (-0,38 \text{ град} / \text{с})$, на частоті $800 \text{ Гц} - (-0,48 \text{ град} / \text{с})$, на $960 \text{ Гц} - (-0,39 \text{ град} / \text{с})$.

Результати стендових випробувань промислових зразків ДКШУ виявили, що на частоті 300 Гц систематична похибка становить $0,24 \text{ град} / \text{с}$, на частоті $500 \text{ Гц} - 0,31 \text{ град} / \text{с}$, на частоті $800 \text{ Гц} - (-0,6 \text{ град} / \text{с})$, а на частоті $960 \text{ Гц} - (-0,13 \text{ град} / \text{с})$ (рис. 3, б).

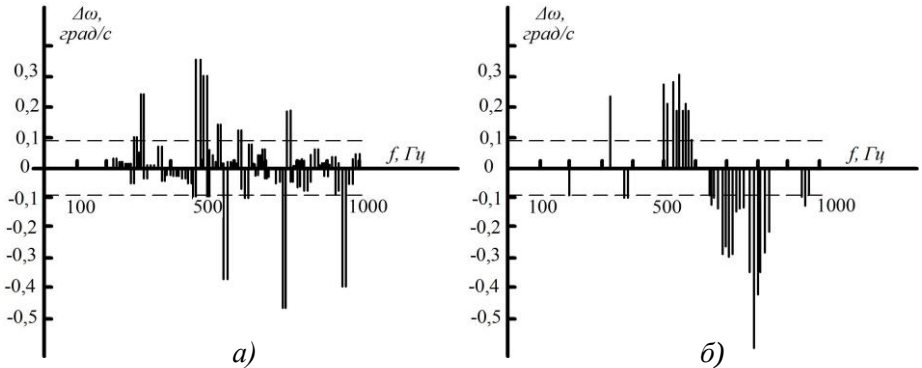


Рис. 3. Похибка ДКШУ в акустичному полі: а) розрахункова, при синхронній хитавиці; б) стендова, в акустичній камері. Пунктирна лінія окреслює поріг чутливості приладу

Таким чином, за результатами стендових випробувань *максимальні* значення похибки поплавкового гіроскопа мають місце на частотах проникаючого акустичного випромінювання 300 Гц , 500 Гц , 700 Гц , 800 Гц , 960 Гц . Кількісний аналіз виявив *максимальні* значення похибок приладу, для умов експерименту, також на частотах 300 Гц , 500 Гц , 800 Гц . Причому, вони практично збіглися не лише за величиною, а також і за знаком.

Деякі невідповідності мають місце на частотах 700 Гц і 960 Гц . Стендові випробування на частоті 700 Гц виявляють похибку приладу в $(-0,27 \text{ град} / \text{с})$, а теоретичні – похибку в $(-0,35 \text{ град} / \text{с})$ на частоті 580 Гц , тобто трохи вліво по осі частот. Різниця становить $0,08 \text{ град} / \text{с}$, що при порозі чутливості в $0,09 \text{ град} / \text{с}$, дає право нею нехтувати. Стендові випробування на частоті 960 Гц вказують на похибку $(-0,14 \text{ град} / \text{с})$, а теоретичні окреслюють її значення в $(-0,38 \text{ град} / \text{с})$.

Для вирішення проблеми, що виникає в класичному коловому циліндрі – в площині шпангоута радіальні переміщення поверхні під дією

акустичної хвилі істотно перевищують величини пружних переміщень у двох інших напрямках – доцільним постає використання не лише підвісу з ненульовою кривизною у вигляді *катеноїда*, але також у вигляді *опуклої* оболонки.

Для *катеноїдної* форми підвісу на частоті $f = 300 \text{ Гц}$ систематична похибка становить $0,2 \text{ град/с}$, на частоті $f = 600 \text{ Гц}$ – $0,17 \text{ град/с}$ проти $0,12 \text{ град/с}$ (рис. 4, а). Систематичні похибки на частотах 500 Гц ($0,35 \text{ град/с}$), 550 Гц ($0,15 \text{ град/с}$) і 780 Гц ($0,2 \text{ град/с}$) зникають зовсім.

Далі, при нульовій гаусовій кривизні на частотах – 580 Гц , 760 Гц і 940 Гц систематичні похибки становлять $(-0,35 \text{ град/с})$, $(-0,46 \text{ град/с})$ і $(-0,40 \text{ град/с})$ відповідно. Перехід до ненульової гаусової кривизни дозволив повністю усунути систематичну похибку на частоті 580 Гц , а на частоті 760 Гц зменшив її до $(-0,32 \text{ град/с})$ і зсунув вліво на частоту 720 Гц . На частоті 940 Гц – зменшив до $(-0,36 \text{ град/с})$ і перемістив вліво на частоту 930 Гц . На частоті 300 Гц виявлена похибка у $(-0,28 \text{ град/с})$. Звертає на себе увагу той факт, що насиченість величини $\Delta\omega$ істотно зменшилася.

У випадку *опуклого* підвісу для частоти 300 Гц систематична похибка становить $0,11 \text{ град/с}$ (рис. 4, б), тоді як для підвісу з нульовою кривизною $0,24 \text{ град/с}$; на частоті 500 Гц похибка взагалі відсутня, хоча рівень її сягав $0,35 \text{ град/с}$; зменшення похибки до рівня, меншого за поріг чутливості, спостерігається на частотах 800 Гц і 960 Гц – $(-0,02 \text{ град/с})$ і $(-0,07 \text{ град/с})$, відповідно, при попередніх значеннях $(-0,48 \text{ град/с})$ і $(-0,39 \text{ град/с})$. На частоті 230 Гц з'явилася похибка $(-0,27 \text{ град/с})$, на частоті 540 Гц – $(-0,35 \text{ град/с})$. Рівень похибки на частоті 630 Гц зростає до $(-0,88 \text{ град/с})$, що майже в 2 рази перевищує абсолютне максимальне значення похибки в теоретичних дослідженнях для підвісу з нульовою гаусовою кривизною.

Аналізуючи результати чисельного аналізу для максимального прогину твірної у 2 мм , варто зазначити, що обидва варіанти реалізації підвісу гіроскопа з ненульовою кривизною, дозволяють, для більшості частот, суттєво знизити рівень похибки вимірювань. Але, з огляду на те,

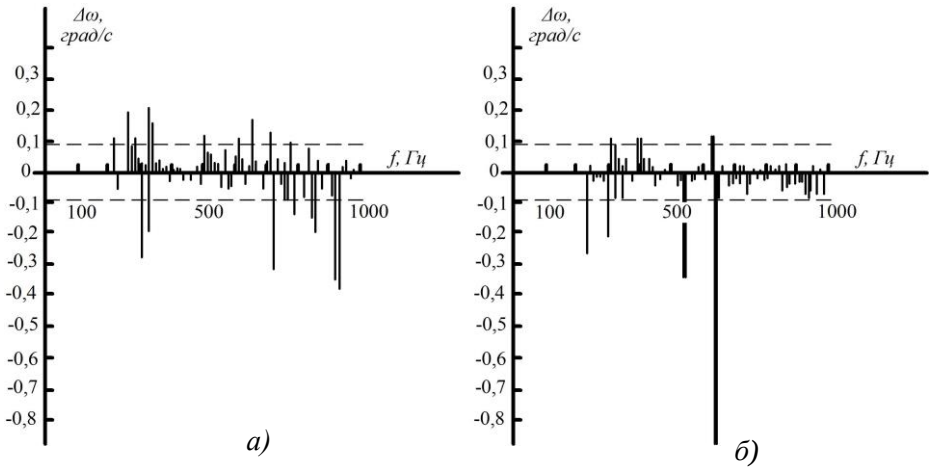


Рис. 4. Розрахункова систематична похибка ДКШУ під дією N-хвилі: а) ненульова гаусова кривизна підвісу – *катеноїд* ($\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м в середньому шпангоуті); б) ненульова гаусова кривизна – *опуклий* підвіс ($\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м в середньому шпангоуті)

що опуклий підвіс, на частоті 630 Гц не зменшує, а навпаки, трохи збільшує величину похибки. Оптимальним технічним рішенням для використання слугує ненульова гаусова кривизна підвісу з угнутою лінією меридіану, тобто *катеноїд*.

При обчисленні похибки вимірювань *катеноїдної* форми підвісу для інших, припустимих, величин прогину утворюючої в середньому шпангоуті в діапазоні значень прогину $\delta = 0,1 \cdot 10^{-3} - 2,0 \cdot 10^{-3}$ м встановлено, що прогин у $0,11 \cdot 10^{-3}$ м являє собою найкращий варіант: майже на всіх частотах похибка менше порогу чутливості (рис. 5).

Максимальне значення похибки сягає ($-0,1$ grad/c)

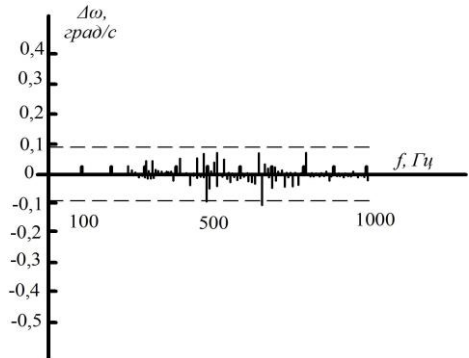


Рис. 5. Розрахункова систематична похибка ДКШУ з ненульовою гаусовою кривизною підвісу при величині прогину $\delta = 0,11 \cdot 10^{-3}$ м

на частоті 670 Гц. Крім цього ще одне значення може бути зафіксованим датчиком: на частоті 500 Гц значення похибки сягає $(-0,09 \text{ град} / \text{с})$.

П'ятий розділ містить результати стендових досліджень серійного промислового зразка класу ДКШУ в ультразвуковому промені експлуатаційних умов.

Найбільш небезпечним положенням корпусу відносно ультразвукового променя є $\varphi = 0^\circ$. При вимкненому гіроагрегаті, вихідний сигнал датчика кутових швидкостей в ультразвуковому промені зазнає стохастичних змін не тільки за величиною, але і за знаком (рис. 6, тонкою лінією на діаграмах вихідного сигналу датчика кутових швидкостей позначений “зсув нуля” приладу при вимкненому гіромоторі, контурною лінією представлений вихідний сигнал при включеному гіроагрегаті).

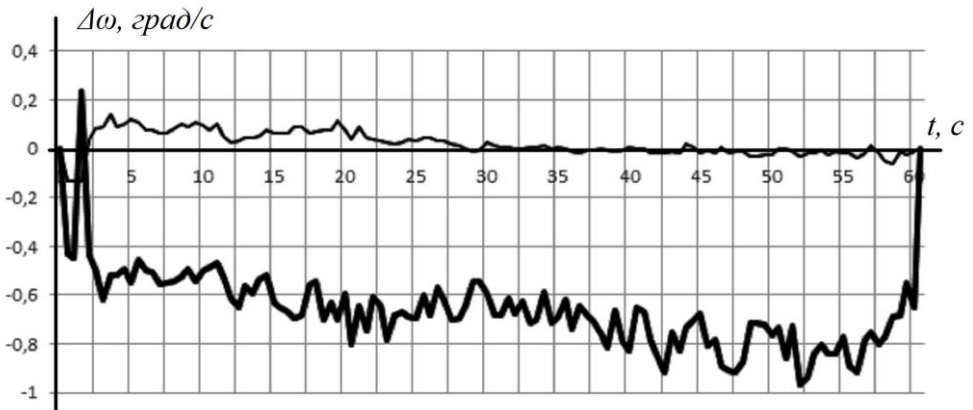


Рис. 6. Вихідний сигнал ДКШУ при $\varphi = 0^\circ$

При включеному гіроагрегаті, очевидно, відбудуться зміни вихідного сигналу приладу, викликані гіроскопічною реакцією. Так, якщо $\varphi = 0^\circ$, похибка приладу збільшується практично в десять разів і, до того ж, змінює знак (рис. 6). Максимальна її величина досягає $\Delta\omega_{\max} = 0,95 \text{ град} \text{ с}^{-1}$. Середня – складе $\Delta\omega_{\text{ср}} = 0,66 \text{ град} \text{ с}^{-1}$.

Являє певний інтерес порівняльний аналіз похибки ДКШУ при кінематичному впливі і спільному впливі кінематичного збурення з ультразвуковим випромінюванням.

Очевидно, що спектр кутового руху поплавця стає більш насиченим, причому явно присутня систематична складова у вихідному сигналі.

Розкид значень також збільшується і перевищує в 2-3 рази значення за кінематичного збурення.

Таке насичення спектра похибки $\Delta\omega$ пояснюється наявною суперпозицією кінематичної похибки $\Delta\omega_k$ і акустичної похибки $\Delta\omega^a$.

Визначаються умови виникнення зон каустики в рідиннестатичній частині підвісу гіроскопа. В гіроскопі виникає каустична поверхня радіусом $r_1 = 1,43$ см при радіусі внутрішньої поверхні корпусу у $R = 1,50$ см (рис. 7).

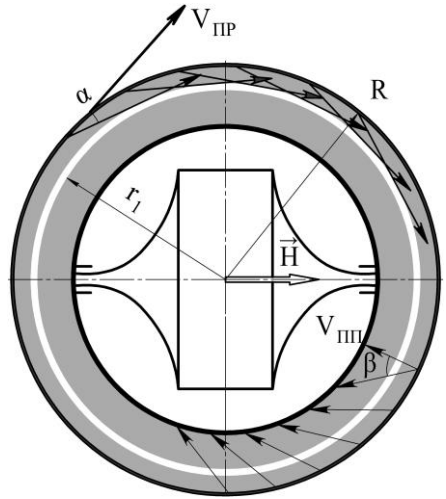


Рис. 7. Фокусування енергії акустичного випромінювання в оболонці з рідиною

ВИСНОВКИ

Проведені аналітичні дослідження і стендові випробування промислового зразка двостепеневого гіроскопа з рідиннестатичним підвісом дозволили узагальнити наявні відомості прикладної гіроскопії щодо особливостей роботи інерціальних сенсорів в експлуатаційних умовах, а також звернути увагу на маловідомі особливості гіперзвукових технологій.

Набули подальшого розвитку методи вивчення властивостей гіроскопічних приладів в натурних умовах і окреслені причини появи додаткових похибок вимірювань на резонансному рівні внаслідок дифракційних явищ проникаючої ударної *N-хвилі*. Досягнення поставленої **мети досліджень** спирається на певність і надійність складових дисертаційної роботи, а саме:

1. Побудовані тривимірні розрахункові схеми пружної взаємодії ударної *N-хвилі* гіперзвукових технологій з механічними системами підвісу гіроскопа пояснюють природу виникнення додаткових похибок гіроскопа в

експлуатаційних умовах. Розкрито механізм появи похибок на резонансному рівні внаслідок дифракційних явищ циклічного навантаження підвісу дифузними акустичними полями. Окреслено небезпеку переходу поверхні поплавка з абсолютно твердої в імпедансну фазу, що супроводжується його пружно-напруженим станом, який породжує збурюючі Ейлерові сили інерції і, як наслідок, додаткові похибки приладів.

2. Створені програми чисельних обчислень в середовищі *MathCad* надають змоги для проведення кількісної оцінки пружних переміщень поверхні поплавкового підвісу під дією проникаючого акустичного випромінювання. Проведений порівняльний аналіз результатів дозволив оцінити ступінь переваги гаусової кривизни підвісу на користь *катеноїдної* форми, яка майже вдвічі зменшила нелінійні коливання поверхні і довела їх до $6,972 \cdot 10^{-2}$ мкм в площині середнього шпангоута.

3. Проведений порівняльний аналіз похибки гіроскопа в умовах синхронної, асинхронної і полігармонічної хитаவிці фізеляжу переконав у доцільності *катеноїдної* форми поплавка для ефективної боротьби з дифракційними явищами. Так, прогин лінії меридіану в середньому шпангоуті на величину $0,11 \cdot 10^{-3}$ м зменшив акустичну похибку до рівня порогу чутливості приладу, тобто до $0,10$ град/с (для ДУСУ2-6АС поріг чутливості становить $0,09$ град/с).

4. Виявлено ефект вибіркості форм акустичної вібрації поплавка хитаவிцею основи, який породжує окрім детермінованої також і систематичну похибку вимірювань приладу. Доведено, що це стосується не тільки синхронної, але і асинхронної структури кутового руху літального апарату.

5. Напівнатурні стендові дослідження серійного поплавкового приладу класа ДУСУ2-30В в полі ультразвукового променя виявили різке збільшення похибки вимірювань до $0,95$ град/с (поріг чутливості становить $0,45$ град/с). Розкрито умови появи похибок приладу на резонансному рівні хвильового співпадання.

6. Матеріали дисертації знайшли застосування в розробках ПАТ «НВО «КЗА ім. Г.І. Петровського» на етапі проектування дослідних зразків бортової апаратури при визначенні похибок гіроприладів. Запропоновано методи пасивної звукоізоляції, з яких окремі технічні рішення мають охоронні документи: Патент України № 80018 «Поплавковий гіроскоп»; Патент України № 80065 «Поплавковий гіроскоп».

7. Прилади інерціальної навігації в експлуатаційних умовах гіперзвукового польоту потребують «акустичного комфорту».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

Статті у виданнях іноземних держав:

1. Шибецкий, В. Ю. Влияние гауссовой кривизны подвеса поплавкового гироскопа на упругую податливость в акустическом поле [Текст] / В. Ю. Шибецкий // Молодой ученый. – 2012. – №12. – С. 116-120. (Росія).

2. Шибецкий, В.Ю. Поплавковый подвес гироскопа при летной эксплуатации [Текст] / В.Ю. Шибецкий, В.В. Карачун // Известия ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение: науч. журнал. – СПб.: ГУАП, 2013. – Вып. 4 – С. 41-44. (Росія).

Здобувачем окреслено коло негативних чинників, що виникають при льотній експлуатації та їх прояви.

3. Shybetskiy, V. Errors of threeorthogonal coordinate systems construction on aircraft [Текст] / V. Shybetskiy // Young Scientist USA. Applied science. – 2014. – V. 5. – P. 95-99. (США).

Статті у наукових фахових виданнях:

4. Карачун, В.В. Пассивные методы уменьшения погрешностей поплавкового гироскопа при действии N-волны [Текст] / В.В. Карачун, В.Ю. Шибецкий // «Восточно-Европейский журнал передовых технологий». – 2012. – №5/7 (59). – С. 8-10.

Здобувачем обрані геометричні характеристики твірної циліндричної частини підвісу гіроскопа.

5. Карачун, В.В. Погрешности гироскопа, обусловленные развивающейся качкой фюзеляжа при летной эксплуатации [Текст] / В.В. Карачун, В.Н. Мельник, В.Ю. Шибецкий // «Восточно-Европейский журнал передовых технологий». – 2013. – №5/7 (65). – С. 45-47.

Здобувачем побудована розрахункова модель явища.

6. Шибецкий, В.Ю. Нелінійні коливання поплавкового підвісу під дією N-хвилі. Циклічне навантаження [Текст] / В.Ю. Шибецкий // «Восточно-Европейский журнал передовых технологий». – 2013. – №6/9 (66). – С. 22-25.

7. Карачун, В.В. Вплив потужної N-хвилі на інерціальні прилади автономного позиціонування. Тривимірна задача [Текст] / В.В. Карачун, В.Ю. Шибецкий // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – 3 (100). – С. 81-84.

Здобувачем створені програми розрахунків.

8. Карачун, В.В. Взаимодействие выпуклой оболочки с сильной ударной волной [Текст] / В.В. Карачун, В.Н. Мельник, В.Ю. Шибецкий // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – 9 (106). – С. 48-52.

Здобувачем обрана геометрія лінії меридіану підвісу.

9. Шибецький, В.Ю. Похибки двохступеневого гіроскопа в напівнатурних умовах гіперзвукового польоту [Текст] / В.Ю. Шибецький // Космічна наука і технологія. – 2014. №20 (2). – С. 52-54

Патенти України на корисну модель:

10. Пат. № 80018 U Україна, кл. G01C 19/20. Поплавковий гіроскоп / В. М. Мельник, В.Ю. Шибецький, В.В. Карачун, М.С. Тривайло; заявл. 22.11.2012 ; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9. — 4 с.

Здобувачем внесені зміни в конструкцію теплового кожуха.

11. Пат. № 80065 U Україна, кл. G01C 19/20. Поплавковий гіроскоп / В. М. Мельник, В.Ю. Шибецький, В.В. Карачун, М.С. Тривайло; заявл. 22.11.2012 ; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9. — 4 с.

Здобувачем обрана геометрія лінії меридіану підвісу.

Тези доповідей в збірниках матеріалів конференції

12. Шибецький, В.Ю. Поплавковий гіроскоп в акустическом поле [Текст] / В.Ю. Шибецький // ПРИЛАДОБУДУВАННЯ : стан і перспективи : XI Міжнар. наук.-тех. конф., 24-25 квітня 2012 р., Київ, Україна. – К. : Нац. техн. ун-т України «КП». – 2012. – С. 42.

13. Калініна, М.Ф. Прояв акустичного імпедансу при старті РН [Текст] / М.Ф. Калініна, В.Ю. Шибецький // Людина і Космос : XIV Міжнар. молодіжн. наук.-практ. конф., 11-13 квітн. 2012 р., Дніпропетровськ, Україна. – Дніпропетровськ : НЦАОМУ ім. О.М. Макарова, 2012. – С. 14.

Здобувачем окреслені особливості поведінки поверхні підвісу поплавкового гіроскопа при старті РН.

14. Карачун, В.В. Дрейф нуля интегрирующего гироскопа при асинхронной качке фюзеляжа [Текст] / В.В. Карачун, В.Ю. Шибецький // "ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи" : XII Міжнародна науково-технічна конференція, 23 квітня 2013 р., Київ, Україна. – Київ, НТУУ "КПІ". – 2013. – С. 40.

Здобувачем запропоновано рішення по забезпеченню акустичного комфорту.

15. Шибецький, В.Ю. Метод уменьшения погрешностей поплавкового гироскопа при действии ударной волны [Текст] / В.Ю. Шибецький, В.В. Карачун // "Людина і космос" : XV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція, 12 квітня 2013 р., Дніпропетровськ, Україна. – Дніпропетровськ, НЦАОМ ім. О.М. Макарова. – 2013. – С.25.

Здобувачем обрано геометрію підвісу поплавкового гіроскопа.

16. Шибецький, В.Ю. Влияние гауссовой кривизны подвеса поплавкового гироскопа на упругую податливость в акустическом поле

[Текст] / В.Ю. Шибецький, В.В. Карачун // "Людина і космос" : XV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція, 12 квітня 2013 р., Дніпропетровськ, Україна. – Дніпропетровськ, НЦАОМ ім. О.М. Макарова. – 2013. – С.26.

Здобувачем обґрунтовано вибір величини прогину твірної підвісу поплавкового гіроскопа з ненульовою гаусовою кривизною.

17. Мельник, В.М. Резонансний поглинач звукових збурень [Текст] / В.М. Мельник, В.В. Карачун, М.С. Тривайло, В.Ю. Шибецький // "Перспективные разработки науки и техники - 2012" : VIII Міжнародна науково-практична конференція, 07-15 листопада 2012 р. Перемишль, Польща. – Перемишль: "Nauka i studia". – 2012. – т. 20. – С.82-84.

Здобувачем запропонована форма резонаторів.

18. Карачун, В.В. Действие ударной N-волны на поплавковый подвес при циркуляции [Текст] / В.В. Карачун, В.Ю. Шибецький // "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси - 2013" : шоста міжнародна науково-практична конференція, 27-29 травня 2013 р., Київ, Україна. – Київ : НАУ. – 2013. – С. 32-33.

Здобувачем описаний механізм виникнення моментів сил інерції Коріоліса.

19. Шибецький, В.Ю. Способи зменшення похибок навігаційного обладнання в складних умовах експлуатації гіперзвукових літальних апаратів [Текст] / В.Ю. Шибецький // Науково-практична конференція "Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки", 27 червня 2013 р., Україна, Київ. - 2013. – С. 112.

20. Шибецький, В.Ю. Ейлерові сили інерції в неінерціальній системі координат поплавкового підвісу гіроскопа [Текст] / В.Ю. Шибецький // «Наука и инновации – 2013» : VIII Міжнародна науково-практична конференція, 07-15 жовтня 2013 р., Польща, Перемишль. – Перемишль : "Nauka i studia". – 2013. – С. 90-92.

21. Шибецький, В.Ю. Збурюючий вплив на чутливі датчики ГСП при льотній експлуатації гіперзвукових літальних апаратів [Текст] / В.Ю. Шибецький // «Достижения высшей школы – 2013» : VIII Міжнародна науково-практична конференція, 17-25 листопада 2013 р., Болгарія, Софія. – Софія : Бял ГРАД-БГ. – 2013. – С. 10-12.

22. Шибецький, В.Ю. Пружно-напружений стан підвісу поплавкового гіроскопа при льотній експлуатації [Текст] / В.Ю. Шибецький // «Проблеми навігації і управління рухом» : Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених і студентів, 18-20 листопада 2013 р., Київ, Україна. – Київ : НАУ. – 2013. – С. 83.

23. Шибецький, В.Ю. Гіперзвукові технології і проблеми інерціальної навігації [Текст] / В.Ю. Шибецький // "Приладобудування:

стан і перспективи": XIII Міжнародна науково-технічна конференція, 23-24 квітня 2014 р., Київ, Україна. – Київ : НТУУ «КПІ». – 2014. – С. 36-37.

24. Шибєцький, В.Ю. Взаємодія систем навігації гіперзвукових літальних апаратів з потужною N-хвилею [Текст] / В.Ю. Шибєцький, В.В. Карачун // «ЛЮДИНА І КОСМОС» : XVI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція, 9-11 квітня 2014 р., Дніпропетровськ, Україна. – Дніпропетровськ : НЦАОМ ім. Макарова. – 2014. – С. 22.

Здобувачем проаналізовані шкідливі чинники, що впливають на системи навігації в умовах гіперзвукового польоту.

25. Шибєцький, В.Ю. Побудова три ортогональної системи координат на гіперзвуковому літальному апараті [Текст] / В.Ю. Шибєцький, В.В. Карачун // «ЛЮДИНА І КОСМОС» : XVI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція, 9-11 квітня 2014 р., Дніпропетровськ, Україна. – Дніпропетровськ : НЦАОМ ім. Макарова. – 2014. – С. 124.

Здобувачем обрано опорну систему координат.

26. Шибєцький, В.Ю. Ліквідація зони каустики в поплашковому гіроскопі [Текст] / В.Ю. Шибєцький // «Наука: Теорія і практика» : X міжнародна науково-практична конференція, 07 серпня 2014 р., Перемишль, Польща. – Перемишль : "Nauka i studia". – 2014. – С. 36-39.

АНОТАЦІЯ

Шибєцький В.Ю. Взаємодія потужної ударної N-хвилі з пружною конструкцією підвісу гіроскопа та похибки вимірювань. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.03 – Гіроскопи та навігаційні системи. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ, 2015.

В роботі узагальнюються наявні відомості прикладної гіроскопії щодо особливостей динаміки приладів інерціальної навігації при льотній експлуатації. Аналітично окреслюється природа пружної взаємодії гіроскопа з потужною N-хвилею для різних умов експлуатації гіперзвукових ЛА. Доводиться, що в акустичних полях високого рівня дифракційні явища породжують Ейлерові сили інерції, які слугують чинником виникнення додаткових похибок гіроскопа.

Побудовані розрахункові моделі і створене програмне забезпечення в середовищі MathCad для кількісної оцінки пружних переміщень поверхні поплашкового підвісу під дією проникаючого акустичного випромінювання експлуатаційного функціонування.

Розроблені програми і проведений чисельний аналіз похибки двостепеневого гіроскопа з рідинностатичним підвісом для умов старту з відкритих стартових позицій. Обчислена систематична похибка ДКШУ за синхронної, асинхронної і полігармонічної хитавиці в акустичних полях багаточислового навантаження.

Проведені напівнатурні стендові дослідження поплавкового приладу класу ДУСУ2-30В на функціональну спроможність в полі ультразвукового променя гіперзвукового руху ЛА. Проаналізовано вплив променя на механічну систему підвісу і на гіроскоп в експлуатаційному режимі, з'ясовані найбільш небезпечні для приладу напрямки ультразвукового променя.

Аналітично окреслені поверхні енергетичної активності рідинностатичної складової підвісу гіроскопа – зони каустики – і з'ясована природа виникнення цього явища як наслідок наявної аберації звукових хвиль і формування на цій основі конфокальних внутрішній поверхні корпусу ДКШУ зон каустики, які поділяють внутрішній рідинний простір підвісу на ділянки акустичної тіні.

Ключові слова: акустичне випромінювання, систематична похибка, поплавковий гіроскоп, катеноїд, опуклий підвіс

SUMMARY

Shybetskiy, V.Y. Interaction of powerful shock N-wave with elastic structure of gyroscope suspension and measurement errors. - Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences after specialty 05.11.03 – Gyroscopes and navigation systems. – National technical university of Ukraine "Kyiv polytechnic institute", Kyiv, 2015.

This paper summarizes the available information on the specifics of applied gyroscopes dynamics of inertial navigation devices in flight operation. Analytical defined nature of the elastic interaction of gyroscope with a powerful N-wave for different conditions of hypersonic aircraft. Proved, that in the high-level acoustic fields diffraction generate Euler inertial forces that serve as a factor of additional errors of gyroscope.

Built calculation models and established software environment with MathCad to quantify the elastic displacement of surface of floating suspension under acoustic radiation penetrating operational performance.

Programs were developed and the numerical analysis of gyro errors was made for the start from open starting position. Calculated systematic error SAVU for synchronous, asynchronous and polyharmonic pitching in acoustic fields for poly cycle load.

Conducted semi natural test for serial device class DUSU2-30V functional ability in the field of ultrasound beam hypersonic aircraft movement. The analysis of the impact of the beam on the mechanical suspension system and a gyroscope in an operational mode, cleared the most dangerous areas of the device to the ultrasound beam.

Analytical defined surface energy activity of liquid component of gyroscope suspension - caustic zone - and clarified the nature of the manifestation of this phenomenon is due to the existing aberrations of sound waves and the formation of the basis of confocal inner surface of the shell SAVU caustic zones that share the inner space of the suspension on an acoustic shadow areas.

Key words: acoustic radiation, systematic error, float gyroscope katenoid, convex suspension

АННОТАЦИЯ

Шибецкий В.Ю. Взаимодействие мощной ударной N-волны с упругой конструкцией подвеса гироскопа и погрешности измерений. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.03 – Гироскопы и навигационные системы. – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", Киев, 2015.

В работе обобщаются имеющиеся сведения прикладной гироскопии об особенностях динамики приборов инерциальной навигации при летной эксплуатации. Аналитически определяется природа упругого взаимодействия гироскопа с мощной N-волной для различных условий эксплуатации гиперзвуковых ЛА. Доказывается, что в акустических полях высокого уровня дифракционные явления порождают Эйлеровы силы инерции, которые служат фактором возникновения дополнительных погрешностей гироскопа.

Построены расчетные модели и создано программное обеспечение в среде MathCad для количественной оценки упругих перемещений поверхности поплавкового подвеса под действием проникающего акустического излучения эксплуатационного функционирования.

Разработаны программы и проведен численный анализ погрешности двухстепенного гироскопа с жидкостатическим подвесом для условий старта с открытых стартовых позиций. Рассчитана систематическая погрешность ДУСУ при синхронной, асинхронной и полигармонической качке в акустических полях многоциклового нагружки. Проанализировано

влияние степени гауссовой кривизны подвеса гироскопа на величину систематической погрешности ДУСУ. Подобрано оптимальную величину прогиба образующей подвеса, при которой значения погрешности ДУСУ практически не превышает значения порога чувствительности прибора класса ДУСУ2-6АС. Доказано, что переход к ненулевой гауссовой кривизна подвеса в виде катеноида позволяет не только снизить максимальную величину значения систематической погрешности прибора, но и существенно снизить насыщенность спектра погрешности.

Проведены полунатурные стендовые исследования поплавкового прибора класса ДУСУ2-30В на функциональную способность в поле ультразвукового луча гиперзвукового движения ЛА. Проанализировано влияние луча на механическую систему подвеса и на гироскоп в эксплуатационном режиме, выяснены наиболее опасные для прибора направления ультразвукового луча. Обнаружено, что при одновременном воздействии на ДУСУ угловой качки и проникающего акустического излучения имеет место эффект избирательности акустической вибрации импедансной поверхности подвеса угловой качкой летательного аппарата, что приводит к появлению систематической составляющей погрешности, а также к насыщению спектра.

Аналитически очерчены поверхности энергетической активности жидкостатической составляющей подвеса гироскопа – зоны каустики – и выяснена природа возникновения этого явления как следствие имеющейся абберрации звуковых волн и формирования на этой основе конфокальной внутренней поверхности корпуса ДУСУ зон каустики, которые разделяют внутреннее пространство подвеса на участки акустической тени.

Ключевые слова: акустическое излучение, систематическая погрешность, поплавковый гироскоп, катеноид, выпуклый подвес