

**ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ЗВУКОВИХ ПОЛІВ НА ПОХИБКИ
ПОПЛАВКОВОГО ГІРОСКОПА**

Наведено огляд похибок вимірів двоступеневого гіроскопа з гідростатичним підвісом. Відзначено суттєвий вплив акустичного випромінювання і необхідність зменшення його рівня в блоках приладів керування рухомими об'єктами.

У системах керування ракетами-носіями (РН) широке застосування знайшли, так звані, поплавкові гіроскопи, конструктивно позбавлені основних недоліків "сухих" приладів – значних за величиною (і, головне, змінних) моментів сил сухого тертя на вихідній осі, а також неприпустимо високої чутливості до ударних і вібраційних впливів, особливо небажаних для інтегруючих гіроскопів. Відмінною рисою поплавкових модифікацій стала наявність зануреної у важку фторорганічну (питома вага $1,9 \cdot 10^3 \text{ Нм}^{-3}$) чи хлорорганічну (питома вага $2,7 \cdot 10^3 \text{ Нм}^{-3}$) рідину рухливої частини приладу. Гіромотор розташовується в герметичному, заповненому гелієм чи воднем, циліндричному поплавці, що подовжніми цапфами встановлюється в зовнішньому, також герметичному, коаксіальному круговому циліндрі, що виконує роль корпусу приладу. Опори рухливої частини в деяких випадках виконуються на каменях.

Таке технічне рішення характерне для цілого ряду конструкцій. Прилади, що плавають, на відміну від поплавкових, не мають залишкової ваги.

Зазор між циліндричною частиною поплавка і корпусом дуже малий і складає приблизно 0,2 мм у радіальному напрямку. Велика в'язкість рідини і мала величина робочого зазора дозволяють одержати необхідний коефіцієнт демпфірування в інтегруючому гіроскопі.

Створення гіроскопів, що плавають, стало початком нового етапу розвитку не тільки гіроскопічної техніки як такої, але і розвитку навігаційно-пілотажного устаткування літальних апаратів у цілому. Це технічне рішення дозволило досягти високої точності вимірів не тільки гіроскопів, але і командно-вимірювальних комплексів РН взагалі, вирішити такі задачі керування рухом, які до цього не представлялися такими, які б можна було реалізувати. Створення гіроскопів, що плавають, у свою чергу, поставило перед технікою необхідність розробки і проектування інших елементів систем керування з більш високими точнісними характеристиками.

Ідея двоступеневого гіроскопа, що плаває, була вперше запропонована в 1945 році Л.І. Ткачевим [1], а в 1946 році – Draper C.S. (USA) [2], під керівництвом якого в Масачусетському технологічному інституті були створені дослідні зразки таких приладів. З 1948 р. у США фірмою "Minneapolis Honeywell Reg. Co" покладений початок розробці серійних варіантів гіроскопів, що плавають.

Одним з основних джерел похибок звичайних двоступневих гіроскопів є моменти дебалансу, обумовлені зсувом центра мас рухливої частини відносно вихідної осі [3]. При цьому основну роль тут відіграють температурні переміщення, обумовлені неоднаковим нагріванням елементів підвісу.

У гіроскопах, що плавають, вплив цього фактора практично зведено до нуля шляхом підтримування практично постійного значення температури усередині приладу. Крім того, матеріали деталей гіровузла вибираються з такими коефіцієнтами лінійного розширення, щоб центр мас рухливої частини мало зміщався при варіації температури. Іноді всі деталі виготовляються з одного матеріалу – сталь, кераміка тощо.

Другим джерелом значних похибок у звичайних гіроскопах є момент сил сухого тертя в осях підвісу. У гіроскопах, що плавають, він зведений до мізерно малих величин за рахунок зважування рухливої частини в рідині, з одного боку, і за рахунок дуже малих радіусів цапфових опор – з іншої.

Причиною виникнення моментів-перешкод можуть бути і струмопідводи. Тому необхідно, щоб матеріал, з якого вони виготовляються, не мав би гістерезису, а його питома вага була близькою до питомої ваги рідини. Кількість струмопідводів варто знизити до мінімального, а матеріал, що використовується, забезпечити високим ступенем еластичності.

У гіроскопах, що плавають, джерелом значних шкідливих моментів можуть бути пухирці газу в рідині. Для їхнього попередження здійснюється ряд технологічних заходів перед заповненням приладу, у тому числі і з контролем герметичності.

Датчики кута, які застосовуються в гіроскопах, що плавають, мають реактивні моменти, що складають близько 10^{-7} Нм і нижче. Такий же порядок повинні мати і нульові моменти (при відсутності керуючого сигналу) моментного пристрою.

Перераховані похибки гіроскопів, що плавають, виникають через недосконалість приладу і відносяться до інструментальних, тому їхня структура і рівень цілком визначаються ступенем досконалості технології в приладобудуванні. До інструментальних варто віднести і похибки вимірів, обумовлені віб-

рацією місця установки приладу [3]. Як показали дослідження, причиною цих похибок слід вважати сукупний вплив кінцевої за величиною жорсткості конструкції приладу, сухого і в'язкого тертя (особливо гістерезисного типу) в осях підвісу, а також динамічної невірноваженості окремих комплектуючих [4]. Найбільш повне відображення в науковій літературі знайшли питання аналізу впливу поступальної і кутової вібрації на динаміку гіроприборів у нерезонансних випадках – при лінійному характері пружних характеристик елементів підвісу, у резонансних випадках – при розгляді гіроскопа як сукупності абсолютно твердих тіл, а також врахування нелінійності пружної характеристики шарикопідшипників головної осі і впливу вібрації на моменти сил тертя в опорах [5].

Магістральними напрямками боротьби із силовим впливом на прилад при поступальній і кутовій вібрації основи з урахуванням нежорсткого підвісу варто визнати забезпечення рівножорсткості [6], амортизацію приладу [7], використання динамічного поглинача коливань [8], а також автокомпенсаційні методи зменшення впливу віброзбурень – двоканальна схема [6] і примусове обертання карданового підвісу.

Дослідження показали, що за хитання основи двоступеневий гіроскоп також має похибки, обумовлені інерційними моментами [9]. Творчі пошуки вчених та інженерів дозволили запропонувати цілий ряд ефективних засобів боротьби з цим явищем. До найбільш перспективних з них варто віднести методи автокомпенсації впливу кутового руху основи на похибки вимірів – метод примусового обертання опор карданового підвісу навколо осі, паралельної до вектора кінетичного моменту [10], метод реверсування вектора кінетичного моменту [11] і метод двоканальності [12].

Узагальнюючи вищесказане, можна відзначити, що основними причинами похибок гіроскопа, що плаває, є маятниковий ефект поплавця, обумовлений зсувом центра мас щодо вихідної осі, момент сили, що виштовхує, якщо центр мас зміщений щодо осі поплавця, момент сил гідростатичного тиску, викликаний зміною питомої ваги рідини, момент, створюваний конвекційними потоками рідини при нерівномірному температурному полі в зазорі між поплавцем і корпусом, якщо мають місце зовнішні температурні градієнти, гідродинамічний момент при русі поплавця, якщо він носить несиметричний характер, момент магнітної взаємодії між магнітними масами поплавкового гіровузла і зовнішнім магнітним полем, реактивний момент у датчику кута, момент тяжіння датчика моменту (навіть при відсутності керуючого сигналу) та інші, менш істотні.

Різні моменти, що збурюють, залежать від кутової швидкості повороту рухливої частини приладу. Це стосується моменту сил рідинного тертя в осі підвісу, що залежить від зазначеної кутової швидкості лінійним чином, а також моменту сил сухого тертя, що являє собою залежність від цієї швидкості.

Часто виділяють окремо моменти, що залежать від прискорень РН при поступальному і кутовому русі – хитання, вібрація тощо. При цьому розрізняють моменти, пропорційні першому або другому ступеню прискорення. У поплавкових гіроскопах до перших можна віднести моменти, що з'являються через залишковий дебаланс рухливої частини і конвекційного руху підтримуючої рідини, а також гідродинамічні моменти через несиметричний характер руху поплавця.

До другої групи можна віднести моменти, що виникають внаслідок нерівножорсткості і нежорсткості конструкції приладу в цілому при експлуатації його в умовах постійних перевантажень, а також лінійної і кутової вібрації.

Методичною похибкою приладу є його бічна чутливість по перехресній кутовій швидкості. Ефективним засобом боротьби з її впливом представляються, наприклад, компенсаційні схеми з відпрацюванням на нуль.

Аналітичний опис динаміки гіроскопа та аналіз його похибок досить повно забезпечується уявленнями його розрахункової моделі у вигляді системи із зосередженими параметрами.

У той же час, прикладні дослідження останніх років дають підставу вважати такий підхід вичерпавшим себе і малоефективним. Більш перспективним, для вирішення деяких задач, стає розгляд гіроскопічних пристроїв як систем з розподіленими параметрами.

Мова йде про вплив зовнішнього акустичного випромінювання на механічні системи підвісу гіроскопа, трансляція якого усередину приладу здійснюється не тільки через опори, подібно звуковому містку, але і через навколишнє середовище. Таким чином, під дією пройденої звукової хвилі поплавець буде переміщатися як абсолютно тверде тіло, у бік поширення збурювання, з одного боку, а з іншого боку – елементи його пружної поверхні своїм рухом вплинуть на гіроскоп. Перший фактор послужить причиною збільшення тиску на вихідну вісь і, отже, збільшення моменту сил сухого тертя, що, по суті справи, нівелює саму ідею зважування рухливої частини приладу. Другий – призведе до виникнення моментів сил інерції Коріоліса і, як наслідок, до додаткових похибок вимірів [13].

Основна тенденція в створенні датчиків кутових швидкостей (ДКШ), що плавають, з механічними пружними елементами складається в мініатюризації приладів, тому що ці датчики знайшли застосування в блоці демпфіруючих гіроскопів (БДГ) автопілотів, призначення яких полягає в стабілізації руху літального апарата (ЛА) щодо центра мас. Інше застосування двоступеневих гіроскопів у поплавковому вико-

нанні полягає у виконанні ролі чутливих елементів тривісних гіростабілізованих платформ (ГСП). Ці пристрої дозволяють будувати в просторі площину визначеної кутової орієнтації.

Як виявилось, деякі з новинок науково-технічної думки, що дозволяли успішно вирішувати задачі оптимізації функціонування апаратури в акустичних полях низького і середнього рівнів (до 130 децибелів), втратили свої пріоритети, а в деяких випадках навіть призвели до погіршення паспортних характеристик приладів, наприклад, в акустичних полях високої інтенсивності – 140–150 дБ і вище. А саме такі рівні спостерігаються під обтічником РН за натурних умов.

Пояснення цьому факту лежить на поверхні. Рідинне середовище, яке призначене для зважування рухливої частини гіроскопа і демпфірування коливань, буде кращим провідником звуку, ніж газоподібна фаза, що дозволяє безперешкодно проникнути акустичному випромінюванню усередину не стільки через опори, скільки через корпус. Таким чином, гіроскоп виявляється з цієї сторони цілком незахищеним. Хвильові процеси, що генеруються в підвісі, призводять у своїй сукупності до похибок вимірів (рис. 1).

Вперше на це явище звернули увагу проф. Павловський М.А. і Лапін О.А. при вивченні динаміки бо-

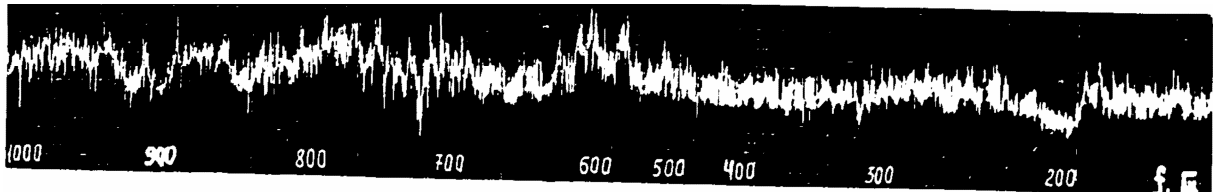


Рис. 1. Зсув нуля вихідного сигналу гіроскопічного датчика кутових швидкостей у поплавковому виконанні ДУСУ2-6АС при акустичному впливі 161 дБ

ртові апаратури РН “Енергія”. Проф. Павловському М.А. належить і створення в Україні наукової школи з вивчення пружної взаємодії акустичного випромінювання з бортовою апаратурою ЛА. Перші результати були отримані його послідовниками: проф. Дідковським В.С. – для “сухих” приладів, проф. Карачуном В.В. – для багатофазних механічних систем.

Встановлено, що найбільшої величини акустичні навантаження від шуму реактивного струменя досягають на Землі і під час старту РН. Зі збільшенням швидкості польоту їхній вплив зменшується, але при цьому зростають навантаження, обумовлені пульсацією тиску в турбулентному прикордонному шарі. На літаках з турбогвинтовими двигунами створюється змінний тиск на панелі фюзеляжу, головним чином, у зоні обертання

Для зменшення рівня (ПЕ) для поплавкових і

Перфорований екран корпусу екран з прямокутними отворами екран обладнаний радіально

Обладнання екрана зменшення жорсткості та демпфування звукової енергії ПЕ показаний на рис. 2, а

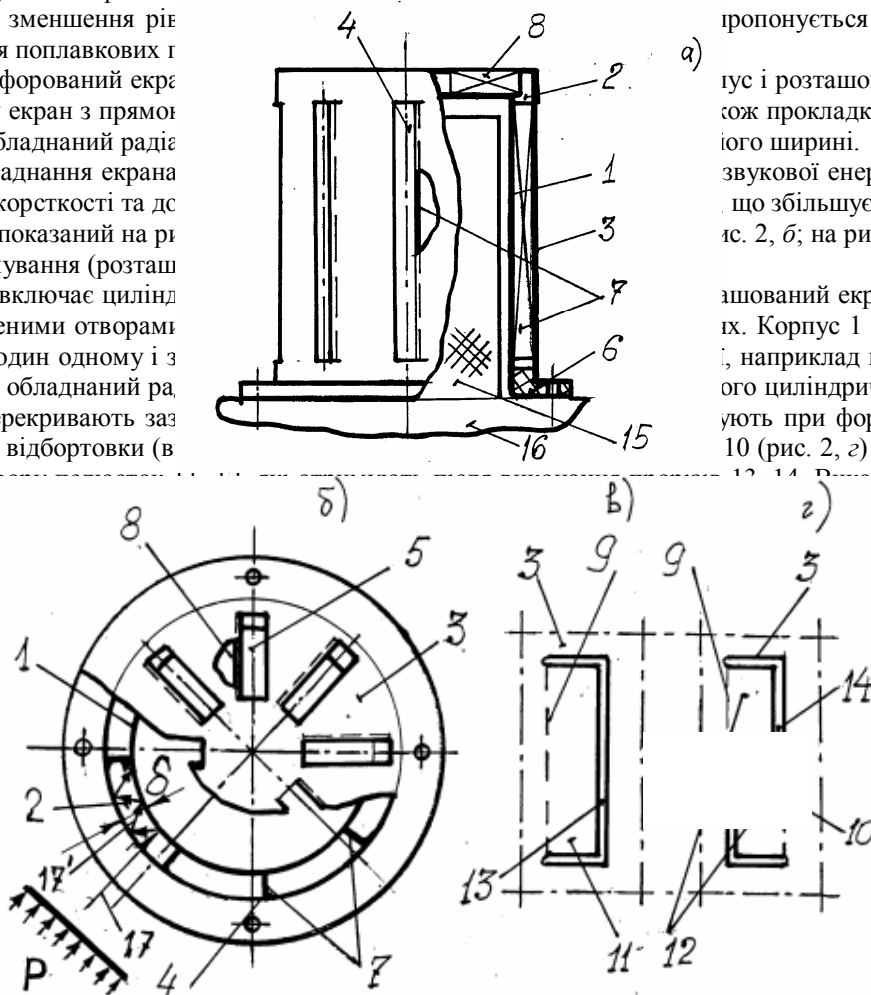
ПЕ включає циліндр з подовженими отворами

соосно один одному і з екраном 3. Екран 3 обладнаний радіально розташованими отворами, які перекривають зазор шляхом відбортовки (в

нагнітання повітря) і виступів 7, 8 у вигляді

фотодетекторів

лю



пропонується перфорований екран

а) і розташований з зазором зовнішнього екрана і прокладкою, згідно з винаходом його ширини.

звуків звукової енергії за рахунок підвищення звукового опору ПЕ.

рис. 2, б; на рис. 2, в та 2, г – варіанти

розташовані екран 3 з прямокутними отворами

наприклад гумової, прокладки 6. Екран 3 має циліндричну та торцеву стінку, яка утворює при формуванні отворів 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 (рис. 2, г) довгих кромках кожної частини

і виступів 7, 8 у вигляді фотодетекторів

і, отже, додатково

прилад, і закріплюється

Рис. 2. Перфорований екран

Працює ПЕ наступним чином.

При дії на ПЕ інтенсивного звукового поля P в стінках екрана 3 виникають складні форми згинних коливань. Внаслідок цього частина звукової енергії поглинається за рахунок внутрішнього тертя, а частина – проходить крізь стінки екрана в корпус 1, в ослабленому вигляді, досягає захищеного об'єкта 15. Внаслідок того, що виступи 7, 9 виконані у вигляді відбортовок і деформуються разом із стінками, вони врівноважують частину виникаючих у стінках згинних зусиль (деформацій). Це обумовлює збільшення розсіювання (поглинання) звукової енергії, що додатково підвищує загальний звуковий опір стінок екрана.

Крім зазначеного, частина звукової енергії, що впливає на ПЕ, проходить крізь отвори 4, 5 і поступає на зовнішню поверхню корпусу 1, наприклад, у вигляді пучка звукових хвиль 17. Після відбиття звукових хвиль 17' від поверхні корпусу частина цієї енергії передається по зазору 2 і, досягнувши виступів 7, 8, частково поглинається ними. Це також збільшує додатковий звуковий опір ПЕ.

Таким чином, збільшення звукового опору ПЕ шляхом підвищення жорсткості екрана і додаткового розсіювання звукової енергії радіальними виступами підвищує ефективність захисту від шуму.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Ткачев Л.И.* Системы инерциальной ориентировки: Учебное пособие. – М.: МЭИ, 1973. – 213 с.
2. *Федосьев В.И., Сняреж Г.Б.* Введение в ракетную технику: Учебное пособие. – М.: Воениздат, 1967. – 197 с.
3. *Павловский М.А., Петренко В.Е.* Виброустойчивость гироскопов. – К.: Изд-во при Киев. ун-те, 1982. – 172 с.
4. *Бутенин Н.В., Климов Д.М., Луниц Я.Л. и др.* Нелинейные задачи теории гироскопических систем. – В кн.: Развитие механики гироскопических и инерциальных систем. – М.
5. *Климов Д.М., Рогачева А.Н., Филиппов В.А.* Резонансные режимы гироскопа в кардановом подвесе // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1972. – № 4. – С. 37–44.
6. *Павловский М.А.* Теория гироскопов: Учебное пособие. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 303 с.
7. *Павловский М.А., Рыжков Л.М.* О моментах упругого дебаланса амортизированного двухгироскопного прибора курса. – В кн.: Методы повышения точности гироскопических приборов. – Киев, 1973. – С. 17–21.
8. *Новожилов И.В.* Силовой гироскопический стабилизатор с динамическим поглотителем колебаний // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1962. – № 4. – С. 41–47.
9. *Назаров Б.И.* О погрешностях двухстепенного интегрирующего гироскопа, вызванных колебаниями основания // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – Т. 3. – Вып. 6, 1960. – С. 21–26.
10. *Slater J.M.* Autocompensation of Errors in Gyros and Accelerometers Control Engineering, May, 1961. – Vol. 8. – № 5. – P. 212–222.
11. Автокомпенсация инструментальных погрешностей гиросистем / С.М. Зельдович, М.И. Малтинский, И.М. Окон, Я.Г. Остроумов / Под ред. С.С. Ривкина. – Л.: Судостроение, 1976. – 255 с.
12. *Одинцов А.А.* Об уменьшении погрешностей интегрирующего гироскопа, вызванных угловыми колебаниями основания // Изв. ВУЗов СССР. Приборостроение. – 1971. – № 2. – С. 24–30.
13. *Карачун В.В., Мельник В.Н., Лозовик В.Г.* Многомерные задачи упругости подвеса поплавкового гироскопа // Космічна наука і технологія. – 2001. – Т. 6. – № 2/3. – С. 92–97.

МЕЛЬНИК Вікторія Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри біотехніки та інженерії Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– динаміка механічних систем приладів керування рухомими об'єктами.

Подано 01.09.2002

Мельник В.Н. Уменьшение влияния звуковых полей на погрешности поплавкового гироскопа
Мельник В.Н. Зменшення впливу звукових полів на похибки Поплавкового гіроскопа
Melnik V.N. Decrease of influence of sound fields on an error of a flash float gyroscope

УДК 534.26

Уменьшение влияния звуковых полей на погрешности поплавкового гироскопа / В.Н. Мельник
Приведен обзор погрешностей измерений двухстепенного гироскопа с гидростатическим подвесом. Отмечено существенное влияние акустического излучения и необходимость уменьшения его уровня в блоках приборов управления подвижными объектами.

УДК 534.26

Decrease of influence of sound fields on an error of a flash float gyroscope / V.N. Melnik
The browse of errors of measurements of a two-degree gyroscope with hydrostatic bracket is reduced. The essential influence of audio radiation and necessity of decrease of his level for blocks of control instruments by relative frame objects is marked.