

УДК 621.317

¹Безвесільна О.М., д.т.н.
²Добржанський О.О., к.т.н.
²Коваль А.В.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКЕТУ ГІРОГРАВІМЕТРА АВІАЦІЙНОЇ ГРАВІМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

¹Національний технічний університет України "КПІ"

²Житомирський державний технологічний університет

У статті проведено лабораторні дослідження роботи гірогравіметра.

Ключові слова: гравіметрія, гірогравіметр.

Постановка проблеми

У [1] запропоновано новий гіроскопічний гравіметр більшої точності та швидкодії у порівнянні з відомими. Однак у літературі[2] не наведено відомостей щодо експериментальних досліджень цього гравіметра.

Аналіз досліджень

Аналіз літератури[2] показав, що відомі струнні гравіметри мають недостатню точність 6 мГл, тому що мають резонанс; відомі сильно демпфовані гравіметри мають недостатню швидкість та точність (8 мГл). Відомі гравіметри є не автоматизованими. Обробку їх результатів проводять на Землі після польоту протягом місяців часу. Як показано в літературі[1, 2] найбільшій точності та швидкодії має новий автоматизований гірогравіметр. Доцільно навести відомості щодо експериментальних досліджень цього гравіметра.

Мета роботи: експериментально з'ясувати характеристики точності гірогравіметра на основі гіроінтегратора лінійних прискорень (ГІІП) за різних умов його роботи та при різних значеннях конструктивних параметрів гірогравіметра.

Основна частина

У якості дослідного гірогравіметра обрано лабораторний гіроскопічний інтегратор лінійних прискорень, схема якого зображена на рис. 1. Його основні елементи: гіромотор 1 із берилієвим ротором 2, який встановлено на осі 12 внутрішнього підвісу так, щоб була створена маятниковість відносно осі 12 внутрішнього підвісу, а центр мас гіромотора розташовувався на осі ξ обертання зовнішньої рамки при взаємній перпендикулярності осі обертання ротора гіромотора та осі підвісу зовнішньої рамки. Зовнішньою рамкою є поворотна платформа 6, на якій розташовано стійки з підшипниковими вузлами для кріплення осі 12 внутрішнього підвісу гіромотора. На осі 12 внутрішнього підвісу гіромотора закріплено ротор датчика 3 кута β повороту гіромотора, а статор датчика 3 закріплено на платформі 6. Для демпфування кутових коливань гіромотора 1 навколо осі 12 внутрішнього підвісу гіромотора передбачено рідинний демпфер 5. Підбором робочого зазору між лопаткою та корпусом рідинного демпфера забезпечується підвищення коефіцієнту в'язкого тертя до $f_1 = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$. Сигнал з датчика 3 підсилюється і направляється на датчик моменту, в якості якого працює серводвигун 7, що прикладає до поворотної платформи обертовий момент, який пропорційний сигналу з датчика 3 кута β . У внутрішньому підвісі гіромотора 1 передбачено виготовлені з одного матеріалу проміжні елементи кріплення: пл.1 та пл.2, для того, щоб під дією температури через лінійне розширення конструкції не виникало зміни положення центру мас гіромотора 1 відносно осі ξ . У приладі передбачена спеціальна механічна система налагодження довжини елементів пл.1 та пл.2. Гіромотор за допомогою спеціальних фіксуючих гвинтів нерухомо закріплюється у початковому положенні ($\beta = 0$, центр мас гіромотора лежить на осі обертання поворотної платформи). Гвинти кріплення гіромотора до осі внутрішнього підвісу послаблюються. Обертанням мікрометричного гвинта змінюють довжину елементів пл.1, пл.2 одночасно. При цьому змінюється відстань між віссю обертання поворотної платформи та віссю внутрішнього підвісу гіромотора, а центр мас гіромотора залишається нерухомим

відносно поворотної платформи. Відрегулювавши мікрометричний гвинт, гіро мотор кріпиться до осі внутрішнього підвісу гвинтами кріплення, а гвинти, що фіксували положення гіро мотора та його центру мас, послаблюються.

На поворотній платформі 6 передбачено зміщену в радіальному напрямку світлонепроникну мембрану 10 із щілиною, над якою розташоване джерело 11 вузьконаправленого світла. На кожному оберті поворотної платформи зосереджений світловий промінь проходить над фотоприймачем 8. При цьому виникає короткий імпульс, що інформує про здійснений поворотною платформою 6 повний оберт навколо осі ξ . Точність відліку становить 5 мікрорадіан. Цей імпульс (сигнальний вихід гірогравіметра) направляється через підсилювач 9 на схему блоку електронних лічильників. Пристрій поміщений у алюмінієвий захисний циліндр (магнітний захист).

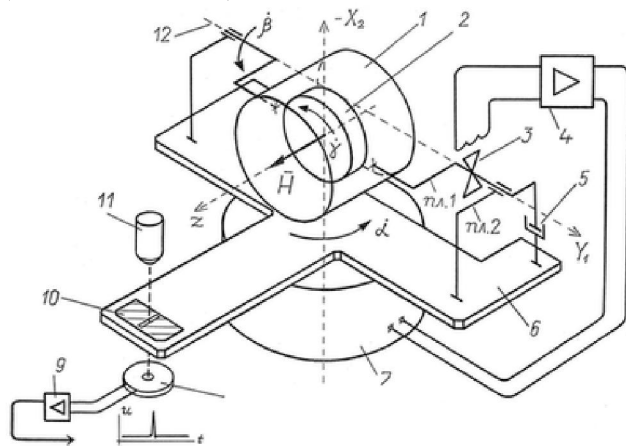


Рис. 1 Дослідний гірогравіметр

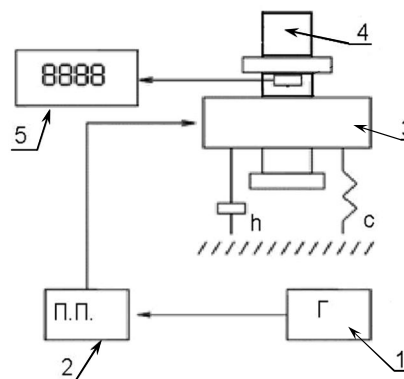


Рис. 2. Блок-схема вібростенда:

1 – генератор; 2 – підсилювач потужності; 3 – котушка електромагнітного генератора механічних коливань; 4 – дослідний гірогравіметр; 5 – блок вимірювання та індикації параметрів коливань

Експериментальне дослідження впливу лінійних вібрацій на похибку гірогравіметра

Обладнання: вібростенд (рис. 2), пульт керування вібростендом, термостат, дослідний гірогравіметр з блоком керування гіро мотором, блок електронних лічильників, блок реєстрів фіксації даних, опорний генератор, ЕОМ, допоміжні прилади (осцилограф, вольтметр).

Проведення експерименту

Сигнальний вивід гірогравіметра підключали до сигнального входу блоку електронних лічильників. Шину даних з блоку лічильників підключали до паралельного порту ЕОМ (LPT1 – порт принтера), включали живлення на схему блоку електронних лічильників. Перевіряли, чи всі уставки вібростенда виставлені у нуль. Через деякий час запускали програму обчислення $\bar{g}_{\xi, \text{вим}}$ за інформацією знятою з гірогравіметра.

В якості дійсного (опорного) $\bar{g}_{\xi, \text{оп}}$ значення величини вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення приймали результат попередніх вимірювань за допомогою відкаліброваного кварцового гравіметра типу ГАЛ ($\bar{g}_{\xi, \text{оп}} = 981,0734 \text{ Гл} \pm 0,1 \text{ мГл}$). Попередні вимірювання проводились достатньо тривалий час (3 дні) для виключення впливу атмосферних явищ та припливного потенціалу на результат вимірювань.

Дані, які фіксувались й оброблювались у ЕОМ [113-118], а також результати їх обробки представлені у табл. 1. Всі уставки вібростенда при цьому були виставлені у нульове положення. Через приблизно 36 зареєстрованих програмою обертів зовнішньої рамки гірогравіметра обчислене ЕОМ значення величини $M[\bar{g}_{\xi, \text{вим}}]$, а також величини середньоквадратичної похибки $\sigma[\bar{g}_{\xi, \text{вим}}]$ та величини $d[\bar{g}_{\xi, \text{вим}}] = (M[\bar{g}_{\xi, \text{вим}}] - \bar{g}_{\xi, \text{вим}})$ стабілізувались. Подальша їх зміна відбувалась на рівні $\pm 0,02..0,03 \text{ мГл}$.

На наступному етапі зміною уставок на пульті вібростенда задавались різні амплітуди та частоти лінійних віброприскорень. Значення $\bar{g}_{\xi, \text{вим}}$ визначалося для кожних трьох обертів

зовнішньої рамки гірографіметра. Для кожної уставки амплітуди та частоти лінійного прискорення проводилося двадцять – двадцять чотири реєстрації вихідного сигналу гірографіметра. Результати замірів ранжували за величиною $g_{\xi, \text{вим}}$. Половина результатів, що давала менше значення $d[\bar{g}_{\xi, \text{вим}}]$ відкидалась, а ті результати, що залишились, усереднювались.

Для них визначалось математичне очікування та середньоквадратичне відхилення. Результати відображені у табл. 2. Похибка гірографіметра визначалась відносно $\bar{g}_{\xi, \text{он}}$.

Дослідження резонансного режиму роботи гірографіметра.

Спектр збуджуючих вібраційних лінійних прискорень на літаку є смуговий з максимумом на частоті 1640р/с. Тому на нижчих резонансних частотах амплітуди вібраційних лінійних збуджуючих прискорень менші. З опорою на цей факт обирали уставки амплітуд і частот для вібростенда. Методику обробки результатів не змінювали. Результати приведені в табл. 3.

Дослідження впливу зміни маятниковості на похибку гірографіметра.

Всі уставки вібростенда встановлювали у нульове положення. Відключали термостат і, розкривши його, давали можливість охолонути гірографіметру (2..3 години). Далі вивільняли гірографіметр із оболонки термостата. Необхідну маятниковість, при масі гіромотора $m = 0,15$ кг, відрегульовували зміщуючи вісь внутрішнього підвісу гіромотора в площині, яка перпендикулярна до площини зовнішньої рамки на необхідну відстань l за допомогою мікрометричного гвинта (при цьому центр мас гіромотора залишався на осі підвісу зовнішньої рамки). Але як змінні у програму ЕОМ вводились дані про значення $l_{50^\circ\text{C}}$ при номінальній температурі термостату 50°C . Гірографіметр знову встановлювали у термостат, під'єднували необхідні сигнальні лінії, закривали і вмикали термостат, також вмикали гірографіметр, встановлювали необхідний код частоти обертів гіромотора, включали програму на ЕОМ та знімали дані. Знімали 20..30 замірів. Обробку даних виконували як і у попередніх експериментах. Далі, для встановленого значення маятниковості $m \cdot l$ здійснювали дві заміни частоти $\dot{\gamma}$ обертів ротора гіромотора, реєстрували та оброблювали дані. Після цього відключали гірографіметр, термостат, охолоджували їх протягом 2..3 годин та змінювали маятниковість гіромотора. Проводили експеримент при включеному та виключеному вібростенді для трьох значень маятниковості (для $l_{20^\circ\text{C}} = 6$ мм, $l_{20^\circ\text{C}} = 12$ мм, $l_{20^\circ\text{C}} = 3$ мм).

Результати представлені у табл. 4 та табл. 5.

Дослідження впливу зміни частоти обертання ротора гіромотора на похибку гірографіметра.

Всі уставки вібростенда встановлювали у нульове положення. Послідовно у реєстр налагодження роботи гіромотора заносили коди бажаних частот $\dot{\gamma}$ обертання ротора. Після кожної установки коду через 5..6 хвилин (відводився час на стабілізацію частоти на заданому рівні) на ЕОМ запускали програму обробки даних від гірографіметра. У якості змінних вводили параметр $l_{50^\circ\text{C}}$ та, відповідне встановленому значенню частоти $\dot{\gamma}_i$, розраховане окремо, поточне значення $H_i = I_{z,z} \cdot \dot{\gamma}_i$. У якості дійсного значення величини \bar{g}_{ξ} приймали величину $\bar{g}_{\xi, \text{он}}$. За допомогою програми знімали 20..30 замірів даних (60..90 повних обертів зовнішньої рамки гірографіметра). Половина результатів $g_{\xi, \text{вим}}$, що мали найменше значення відкидали, а ті, що залишались, усереднювали.

На наступному етапі всі вищезазначені дії повторили для таких уставок вібростенда: амплітуда лінійних віброприскорень 10м/с^2 ; частота лінійних віброприскорень 1640р/с . Результати експериментів занесено до табл. 6.

Дослідження впливу зміни величини гравітаційного прискорення на похибку гірографіметра.

Забезпечувати зміну \bar{g}_{ξ} можливо, якщо розташовувати вісь ξ (вісь OX_2 підвісу зовнішньої рамки гірографіметра) під деяким кутом k до вертикалі місця. Тоді проекція g_{ξ} вектора \vec{g} визначатиметься як $|\vec{g}| \cdot \cos k = g_{\xi} \equiv \bar{g}_{\xi}$.

Можливо розрахувати необхідне значення кута k , щоб значення \bar{g}_{ξ} змінилось на $d\bar{g}_{\xi}$:

$$|\vec{g}| \cdot \cos k = g_{\xi} - dg_{\xi}, \quad g_{\xi} \cdot \cos k = g_{\xi} - dg_{\xi},$$

$$\cos k = 1 - \frac{dg_{\xi}}{g_{\xi}} \rightarrow k = \arccos \left[1 - \frac{dg_{\xi}}{g_{\xi}} \right].$$

Максимальна зміна \bar{g}_{ξ} на земній поверхні складає $dg_{\xi, \max} = 5$ Гл. В той же час, великою вважається гравітаційна аномалія $dg_{\xi, \text{аном}} = 0,15$ Гл. Отже, для забезпечення dg_{ξ} в межах $(0..5)$ Гл, необхідно змінювати кут k так:

$$k = \arccos \left[1 - \frac{5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2}{9,810734 \text{ м/с}^2} \right] = 5,8^{\circ}.$$

У ході експерименту використовували шкалу, що відкалібрована за допомогою сучасної кутовимірювальної системи з точністю $\pm 0,3^{\circ}$. Обробка даних проводилась як і в інших експериментах. Результати експерименту занесено до табл. 7.

Таблиця 1.

Прийняті ЕОМ дані від схеми системи реєстрації сигналу гірогравіметра та результати їх обробки

16-кові дані отримані ЕОМ від блоку електронних лічильників				Розраховані й ЕОМ час, с	Поточний кут α , рад	Визначене ЕОМ $\bar{g}_{\xi, \text{вим}}$, Гл (за кожні три оберти зовнішньої рамки)	Абсолютна похибка $\bar{g}_{\xi, \text{вим}}$ відносно $\bar{g}_{\xi, \text{оп}}$, мГл
I ліч.	II ліч.	III ліч.	IV ліч.				
2B6	099	16C	3	694,1533643	6·π	—	—
2BE	2B4	14C	2	702,6923322	12·π	981,0733942	-5,8·10 ⁻³
2C7	0E7	12C	7	711,2313007	18·π	981,0733368	-6,3·10 ⁻²
2CF	302	10d	3	719,7702693	24·π	981,0733138	-8,6·10 ⁻²
2D8	135	0EC	4	728,3092364	30·π	981,0734862	+8,6·10 ⁻²
2E0	350	0CD	2	736,8482052	36·π	981,0732908	-1,1·10 ⁻¹
2E9	183	0AD	2	745,3871732	42·π	981,0733828	+1,7·10 ⁻²
2F1	39E	08D	5	753,9261415	48·π	981,0733483	-5,2·10 ⁻²
2FA	1D1	070	3	762,4651123	54·π	981,0730611	-3,4·10 ⁻¹
303	004	050	0	771,0040800	60·π	981,0734172	+1,7·10 ⁻²
306	21F	030	0	779,5430487	66·π	981,0733023	-9,8·10 ⁻²
314	052	00F	6	788,0820156	72·π	981,0735091	+1,1·10 ⁻¹
Математичне очікування середнього значення $M[\bar{g}_{\xi, \text{вим}}]$, Гл						$M[\bar{g}_{\xi, \text{вим}}] = 981,073$ 3493	$\bar{g}_{\xi, \text{оп}} = 981,0734$ Гл ($\pm 0,1$ мГл)
Середньоквадратичне відхилення $\sigma[\bar{g}_{\xi, \text{вим}}]$, мГл						$\sigma[\bar{g}_{\xi, \text{вим}}] = 0,1192$ мГл	
Різниця $d[\bar{g}_{\xi, \text{вим}}] = (M[\bar{g}_{\xi, \text{вим}}] - \bar{g}_{\xi, \text{оп}})$, мГл						$d[\bar{g}_{\xi, \text{вим}}] = -0,05$ мГл	

Таблиця 2.

Вплив амплітуди та частоти лінійних вібрацій на похибку (мГл) гірогравіметра

		Частоти лінійних вібрацій, p/c											
		800	950	1050	1200	1450	1640	2000	2150	2300	2600	3000	3200
Амплітуди лінійних вібраційних прискорень, м/с ²	5	0,65	0,42	0,34	0,26	0,20	0,17	0,149	0,143	0,139	0,143	0,1285	0,127
	5,3	0,68	0,44	0,35	0,27	0,20	0,18	0,15	0,14	0,14	0,134	0,129	0,1274
	6,6	0,81	0,51	0,41	0,30	0,22	0,19	0,16	0,15	0,145	0,137	0,131	0,1293
	8	0,96	0,60	0,47	0,34	0,25	0,21	0,17	0,16	0,151	0,141	0,133	0,131
	10	1,17	0,72	0,56	0,40	0,28	0,23	0,18	0,17	0,158	0,146	0,137	0,134
	12	1,38	0,84	0,64	0,46	0,31	0,25	0,19	0,18	0,166	0,151	0,14	0,137
	15	1,70	1,02	0,77	0,54	0,36	0,28	0,21	0,19	0,177	0,159	0,146	0,141
	18	2,01	1,20	0,91	0,62	0,40	0,31	0,22	0,20	0,189	0,167	0,151	0,145
	20	3,28	1,32	0,99	0,68	0,44	0,36	0,24	0,21	0,197	0,172	0,154	0,148
Примітка. За умов застосування гірогравіметра на літаку вказані у табл. 5.9 значення підвищуються на значення похибки визначення навігаційною системою інерційного прискорення літака (1 мГл).													

Таблиця 3.

**Похибка гірогравіметра (мГл) на середніх частотах лінійних прискорень
(перевірка гірогравіметра на можливість резонансного режиму)**

		Частоти лінійних вібрацій, p/c											
		55	80	100	112	126	141	158	178	200	250	300	650
Амплітуди лінійних вібраційних прискорень, м/с ²	1	192	145	128	112	92	72	44	28	16	6,8	4,1	0,18
	1,5	286	226	193	169	138	112	67	43	23	10,2	7,4	0,22
	2	384	278	257	224	183	145	87	57	31	13,7	9,2	0,23
	2,5	481	362	321	281	235	182	112	71	41	16	9,5	0,27
	3	572	433	384	337	276	216	131	83	49	21,4	11,8	0,29
	3,5	676	514	447	393	321	253	154	98	56	24,1	13,6	0,38
	4	768	579	512	447	368	289	175	113	65	27,2	16,3	0,54
	4,5	893	647	567	524	415	323	198	127	71	31,6	18,1	0,63
Примітка. За умов застосування гірогравіметра на літаку вказані у табл. 5.10 значення підвищуються на значення похибки визначення навігаційною системою інерційного прискорення літака (1мГл).													

Таблиця 4.

Похибка гірогравіметра (мГл) при різних значеннях параметрів $\dot{\gamma}$ та l гірогравіметра (вібростенд вимкнено)

Параметр l , мм						
l при 20°C				3	6	12
l при 50°C				3,000081	6,000162	12,000324
Параметр $\dot{\gamma}$, p/c	428,6	Розраховане значення H , кг·м ² /с	0,006	0,11	0,12	0,24
	258,7		0,004	0,11	0,13	0,25
	214,2		0,003	0,11	0,15	0,29

Таблиця 5.

Похибка гірогравіметра (мГл) при різних значеннях параметрів $\dot{\gamma}$ та l гірогравіметра (вібростенд увімкнено: амплітуда лінійних віброприскорень – 10м/с², частота – 1640p/c)

Параметр l , мм						
l при 20°C				3	6	12
l при 50°C				3,000081	6,000162	12,000324
Параметр $\dot{\gamma}$, p/c	428,6	Розраховане значення H , кг·м ² /с	0,006	0,23	0,43	0,6
	258,7		0,004	0,13	0,24	0,55
	214,2		0,003	0,12	0,16	0,3

Примітка. За умов застосування гірогравіметра на літаку вказані у табл. 5.11 та табл. 5.12 значення підвищуються на значення похибки визначення навігаційною системою інерційного прискорення літака (1мГл).

Висновки

Проведено лабораторні дослідження роботи гірогравіметра, метою яких було з'ясування характеристик точності гірогравіметра на основі ГІЛП за різних умов його роботи та при різних значеннях конструктивних параметрів гірогравіметра. Результати лабораторних досліджень такі:

1. За відсутності лінійних та кутових вібраційних збурень (статичний режим роботи гірогравіметра) характеристики точності гірогравіметра співпали із характеристиками точності відкаліброваного стандартного гравіметра (в нашому випадку гравіметра типу ГАЛ). Середньоквадратична похибка гірогравіметра не перевищила значення 0,15мГл.

Типове значення середньоквадратичної похибки гірогравіметра спостерігалось на рівні 0,15мГл. Різниця між усередненим результатом вимірювання $\bar{g}_{\xi, \text{вим}}$ гірогравіметром та результатом вимірювання $\bar{g}_{\xi, \text{он}}$ гравіметром типу ГАЛ, що сягнула 0,05мГл, може бути пояснена тим, що $\bar{g}_{\xi, \text{вим}}$ та $\bar{g}_{\xi, \text{он}}$ вимірювались у різний час, і, до того ж, $\bar{g}_{\xi, \text{вим}}$ усереднювалось на невеликій кількості замірів (11 замірів). Проте, величина середньоквадратичної похибки 0,15мГл свідчить про те, що параметри гірогравіметра $H = 0,004 \text{ кг·м}^2/\text{с}$ та $l = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ обрані коректно.

Таблиця 6.

**Похибка (мГл) гірографіметра
для різних значень частоти $\dot{\gamma}$ обертання ротора гіромотора**

Встановлене значення $\dot{\gamma}$, р/с	Встановлений в реєстрі БКГ двійковий код	Розраховане для $\dot{\gamma}$ значення H , кг·м ² /с	Визначена ЕОМ середньоквадратична похибка гірографіметра, мГл
Амплітуда віброприскорень 0м/с ² Частота віброприскорень 0р/с			
571,4	1110.0111.0010.0111.0110	0,008	0,11
428,6	1101.1100.0011.0101.1010	0,006	0,12
285,7	1100.1010.0100.1111.1001	0,004	0,12
214,2	1011.1000.0110.0010.1011	0,003	0,13
142,8	1001.0100.1001.0100.0001	0,002	(нестійка робота)
Амплітуда віброприскорень 10м/с ² Частота віброприскорень 1640р/с			
571,4	1110.0111.0010.0111.0110	0,008	0,38
428,6	1101.1100.0011.0101.1010	0,006	0,31
285,7	1100.1010.0100.1111.1001	0,004	0,25
214,2	1011.1000.0110.0010.1011	0,003	0,24
142,8	1001.0100.1001.0100.0001	0,002	(нестійка робота)

Таблиця 7.

Похибка гірографіметра (мГл) для різних значень величини гравітаційного прискорення

Виставлений кут k між вертикаллю місця та віссю ξ основи гірографіметра	Виміряне усереднене значення			$\bar{g}_{\xi, on} \cdot \cos k$, Гл	$M[\bar{g}_{\xi, вим}] - \bar{g}_{\xi, on} \cdot \cos k$, мГл
	$M[\bar{g}_{\xi, вим}]$, Гл	$\sigma[\bar{g}_{\xi, вим}]$, мГл			
		Статичний режим	Динамічний режим		
1°	980,9239617	0,12	0,37	980,9239778	-0,02
2°	980,4758453	0,11	0,44	980,4757566	-0,09
3°	979,7289861	0,13	0,32	979,728873	+0,11
4°	978,6835639	0,13	0,38	978,6835545	+0,01
5°	977,3402135	0,11	0,31	977,3401195	+0,09

2. За наявності лінійних вібраційних збурень (динамічний режим роботи гірографіметра) типових для літакових вимірювань (частота 1640р/с; амплітуда 10м/с²) середньоквадратична похибка гірографіметра з урахуванням похибки навігаційної системи не перевищує бажаної границі похибки гірографіметра у 2мГл. Цим ще раз підтверджується правильність обрання параметрів $H = 0,004$ кг·м²/с та $l = 6 \cdot 10^{-3}$ м.

3. За наявності лінійних вібраційних збурень (динамічний режим роботи гірографіметра), нетипових для літакових вимірювань, спостерігалось підвищення похибки гірографіметра пропорційно підвищенню амплітуди вібраційних прискорень та зворотно-пропорційно зменшенню їх частоти: при частоті 800р/с та амплітуді 10м/с² лінійних вібрацій середньоквадратична похибка зросла до 2,17мГл; при подальшому зниженні частоти похибка квадратично зростала і приймала високі (10..100мГл) значення навіть за малих амплітуд вібраційних збурень (1..1,5м/с²).

4. За наявності лінійних вібраційних збурень (динамічний режим роботи гірографіметра) з частотами, що перевищують типову (1640р/с) для літакових вимірювань частоту вібраційних збурень, спостерігалось зменшення середньоквадратичної похибки за квадратичною залежністю, а на частотах вібраційних збурень вище 3000р/с середньоквадратична похибка утримувалась в межах 1,12..1,15мГл (з урахуванням похибки навігаційної системи в 1мГл). З чого можна зробити висновок, що похибки від високочастотних збурень прямують до нуля при підвищенні частоти збурень, а залишаються лише похибки, властиві статичному режиму роботи гірографіметра.

Приймаючи до уваги описану залежність середньоквадратичної похибки гірографіметра від частоти та амплітуди збурень робимо висновок, що в цій залежності простежуються інтегруючі властивості гірографіметра.

5. Перевірка роботи гірогравіметра на частотах вібраційних збурень, що близькі частотам резонансу (100..200р/с), показала відсутність будь-яких суттєвих ознак резонансу: не спостерігалось ознак різкого зростання похибок, раптових стрибків кутової швидкості $\dot{\alpha}$ обертання поворотної платформи, виходу механічної системи гірогравіметра із режиму стійкості на режим нестійких коливань. Це й факт можливо пояснити тим, що одним з параметрів гірогравіметра, що налагоджувався, був коефіцієнт в'язкого тертя у внутрішньому підвісі гіромотора, який, при налагодженні на осі внутрішнього підвісу рідиневого демпфера із в'язкою демпфуючою рідиною, досяг значення $f_1 = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$. Підвищення f_1 вплинуло на коефіцієнти характеристичного рівняння гірогравіметра і, найімовірніше, змістило резонанс в область нижчих частот.

6. Зміною параметрів $\dot{\gamma}$ та l варіювали значення параметрів H та $\bar{\alpha}$ (при $n = \text{const}$). Встановлено, що при $n = \text{const}$ та при відсутності вібраційних збурень (статичний режим роботи гірогравіметра), середньоквадратична похибка помітно зменшується при зменшенні l та менш помітно зменшується при збільшенні H . Або враховуючи, що $\bar{\alpha} = m \cdot l \cdot \bar{g}_\xi / H$, то похибка знижується при зниженні $\bar{\alpha}$ (на 0,03мГл при зміні параметру на 1,12р/с). Це можна пояснити тим, що найсуттєвіші похибки статичного режиму роботи гірогравіметра при $n = \text{const}$ залежать переважно від $\bar{\alpha}$: при підвищенні $\bar{\alpha}$ зменшується час $(t_k - t_n)$, при цьому зростає похибка від $\Delta[t_k - t_n]$, і додатково, якщо $\bar{\alpha}$ зменшується за рахунок збільшення H при збільшенні $\dot{\gamma}$, то зменшується похибка від $\Delta\dot{\gamma}$, якщо $\Delta[t_k - t_n]$ та $\dot{\gamma} = \text{const}$.

7. Також встановлено, що при $n = \text{const}$ та при наявності збурюючих лінійних прискорень середньоквадратична похибка гірогравіметра зменшується (динамічний режим роботи гірогравіметра) пропорційно зменшенню l , але вона також зменшується при зменшенні H (на 0,15мГл при зміні параметру на 0,003 $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$), хоча у статичному режимі зменшення H викликає підвищення середньоквадратичної похибки гірогравіметра. Характер зміни середньоквадратичної похибки гірогравіметра у динамічному режимі можливо пояснити наявністю домінуючої похибки від \tilde{W}_ξ . При зменшенні l зменшується $\bar{\alpha}$, а значить збільшується $(t_k - t_n)$ при $n = \text{const}$. При збільшенні $(t_k - t_n)$ за отриманим виразом (3.92) похибка від \tilde{W}_ξ зменшується. Вираз (3.92) підтверджує, що похибка від \tilde{W}_ξ буде зменшуватись як при зменшенні l , так і при зменшенні H , і навіть інтенсивніше при зменшенні H . Хоча інші похибки, теоретично, можуть мати інший характер змін, теоретично і експериментально підтверджено: похибка від \tilde{W}_ξ домінує і визначає характер зміни загальної похибки гірогравіметра у динамічному режимі його роботи.

8. Зміною нахилу осі чутливості гірогравіметра (вісь ξ) у межах 0..5° змінювали значення g_ξ у межах 0..5Гл. Гірогравіметр чітко реагував на зміну g_ξ . Середньоквадратична похибка не залежала від змін g_ξ . Різниця між теоретично розрахованими значеннями $\bar{g}_{\xi, \text{вим}}$ та тими, що отримані від гірогравіметра, не перевищувала 0,1мГл і також не залежала від змін g_ξ . Робимо висновок, що зміна g_ξ в межах ± 0.5 Гл не впливає суттєво на величину похибки гірогравіметра, а гірогравіметр чітко реагує на зміну g_ξ у всьому діапазоні вимірювань: $g_\xi \in (\bar{g}_\xi \pm 5\text{Гл})$.

Список літературних джерел

1. Пат. 53478 А Україна, МПК G 01 V 7/00. Гравіметр / О. М. Безвесільна, Є. І. Бобруйко, К. В. Меньшикова, С. О. Нечай, Д. Г. Тулупов. – № 2002064813 ; заявл. 11.06.02 ; опубл. 15.01.03, Бюл. № 1.
2. Безвесільна О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – 604с.