

## ЗАСТОСУВАННЯ ГІРОСКОПІЧНОГО ГРАВІМЕТРА В АВІАЦІЙНІЙ ГРАВІМЕТРИЧНІЙ СИСТЕМІ

*У статті наводяться узагальнені результати досліджень ефективності функціонування нового типу гравіметра авіаційної гравіметричної системи (АГС) – гірогравіметра на основі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень. Обґрунтовано можливість застосування гірогравіметра в АГС, описано математичну модель динаміки функціонування гірогравіметра в умовах наявності збурень, наведено аналітичні оцінки й оцінки кількісних значень похибок гірогравіметра, а також методи їх зниження, досліджується проблема автоматичного зчитування та обробки сигналів гірогравіметра, дано опис основних методів і результатів експериментальних досліджень ефективності функціонування гірогравіметра.*

**Постановка проблеми.** Гірогравіметри сьогодні є найперспективнішими з погляду широкомасштабного вивчення аномалій гравітаційного прискорення. Вони розглядаються як головний чутливий елемент авіаційної гравіметричної системи (гравіметр АГС). Актуальним є впровадження технологій автоматизації в систему функціонування приладу, що уможливорює комп'ютерну обробку його інформаційних сигналів. Актуальним завданням є створення гіроскопічного гравіметра для АГС з метою підвищення точності вимірювань величини гравітаційного прискорення. Точні знання розподілу гравітаційного поля Землі необхідні в авіаційній та космічній техніці, геології, геофізиці, геодезії.

**Огляд останніх досліджень.** Необхідність досліджень, спрямованих на підвищення точності вимірювання величини вектора гравітаційного прискорення, зумовлена тим, що існуючі на цей час АГС, в яких застосовані кварцові, магнітні, пружинні, струнні гравіметри [1], можуть забезпечити точність авіаційних гравіметричних робіт на рівні 3.6 мГал. Проте точність сучасних АГС [2, 3] вже обмежена не точністю роботи навігаційної системи (0,5..1 мГал), а вихідною точністю гравіметра АГС (3..6 мГал). Водночас для ефективного практичного застосування АГС у наш час визначена вимога до точності її гравіметра на рівні 1..2 мГал [2, 3].

**Формулювання завдання досліджень** – підвищення точності та швидкості вимірювань величини гравітаційного прискорення та автоматизація цього процесу шляхом використання як гравіметра АГС однороторного інтегруючого гіроскопічного гравіметра з додатковим каналом контролю (далі гірогравіметра).

### **Виклад основного матеріалу**

**Постановка завдання.** Проаналізувати основні результати теоретичних та експериментальних досліджень ефективності застосування в АГС нового типу гравіметра – гірогравіметра з додатковими каналами контролю.

**1. Гірографіметр.** З метою підвищення точності та швидкості вимірювань величини вектора гравітаційного прискорення запропоновано застосувати в АГС гірографіметр, що побудований на основі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень. Будова гірографіметра відображена на рис.1, де 5 – гіромотор; 6 – вісь внутрішнього підвісу гіромотора; 7 – зовнішня рамка; 8 – вісь обертання ротора гіромотора; 9 – вісь підвісу зовнішньої рамки; 10 – перший датчик кута  $\beta$  повороту гіромотора; 11 – підсилюючий елемент; 12 – датчик моменту; 13 – другий датчик кута  $\alpha$  повороту зовнішньої рамки; 14 – блок живлення стабілізованої частоти; 15 – датчик частоти обертання ротора гіромотора.

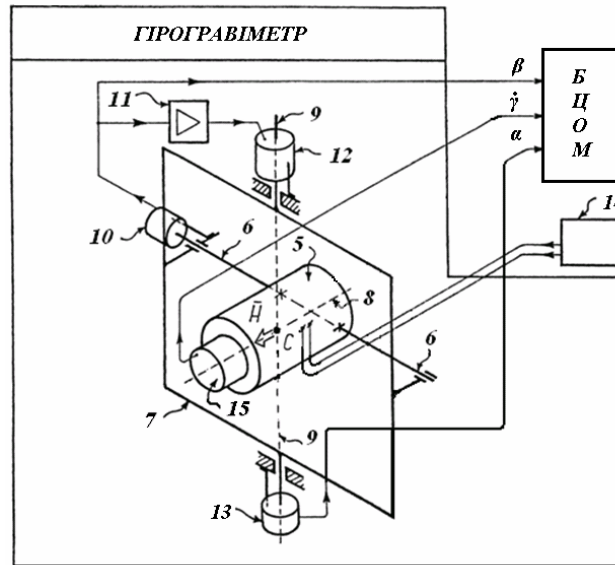


Рис. 1. Гірографіметр АГС

Запропоновано алгоритм визначення величини гравітаційного прискорення за допомогою гірографіметра: бортова цифрова обчислювальна машина (БЦОМ) зчитує інформацію з гірографіметра про кут  $\beta$  відхилення рамок підвісу гіромотора від перпендикулярності, про кут  $\alpha$  повороту зовнішньої рамки та про частоту  $\dot{\gamma}$  обертання ротора гіромотора. БЦОМ перевіряє виконання умов:

$$\dot{\gamma} = const \pm \Delta\dot{\gamma}, \quad \beta = 0 \pm \Delta\beta,$$

де  $\Delta\beta, \Delta\dot{\gamma}$  – відхилення величин  $\beta, \dot{\gamma}$ , якими можна знехтувати і вважати такими, що наближаються до нуля. Якщо умови не виконуються, то відкидається інтервал вимірювальної інформації як такий, що викривлений завадами. Якщо умова виконується, то БЦОМ розраховує поточний статичний передатний коефіцієнт  $R$  гірографіметра:

$$R = m \cdot l / (J \cdot \dot{\gamma}),$$

де  $m \cdot l$  – маятниковість гіромотора;

$J$  – момент інерції ротора гіромотора відносно осі обертання ротора гіромотора.

І наостанок БЦОМ розраховує середнє значення вертикальної складової вектора гравітаційного прискорення:

$$\bar{g}_{\xi, \text{вим}} = \frac{-1}{R} \cdot \left[ (\alpha(t_k) - \alpha(t_n)) - R \cdot \left( \int_{t_n}^{t_k} W_{\xi} dt \right) + \left( \int_{t_n}^{t_k} \omega_{\xi} dt \right) \right] \cdot \frac{1}{(t_k - t_n)},$$

де  $R$  – радіус Землі;

$W_\xi$  – складова абсолютного лінійного прискорення літака;

$\omega_\xi$  – складова кутової швидкості гравіметра за вертикальною віссю;

$\xi$  – вертикальна вісь ГСП;

$t_k, t_n$  – моменти часу початку та кінця відліку інтервалу даних; інтеграли в дужках – поправки за постійні складові векторів лінійного прискорення та кутової швидкості рухомої основи, які БЦОМ розраховує за сигналами від системи навігації.

Застосування гірогравіметра дозволяє уникнути недоліків існуючих гравіметрів АГС тим, що забезпечує підвищення стабільності статичного передавального коефіцієнта гравіметра АГС, можливість визначення поточного статичного передавального коефіцієнта гравіметра АГС, зниження рівня перешкод у вихідному сигналі гравіметра АГС. Крім того, інтегруючи властивості запропонованого гірогравіметра дозволяють виключити етап усереднення даних, отриманих від нього, і цим уникнути похибки нелінійності, яка б виникала при дискретному інтегруванні сигналу.

Новий тип гравіметра АГС у сукупності з запропонованим алгоритмом його роботи уможливають суттєве підвищення точності вимірювання величини гравітаційного прискорення.

## **2. Математична модель функціонування гірогравіметра в умовах збурень.**

Використавши теорему про зміну кінетичного моменту кількості руху системи матеріальних точок [4] до ідеалізованої конструкції гірогравіметра, вдалося розробити математичну модель його функціонування в умовах збурень на борту рухомого апарата з урахуванням динамічної зміни моментів інерції окремих елементів гіросистеми:

$$\begin{cases} \alpha = [p \cdot (B \cdot p + f_1) \cdot M_2 - (H \cdot \cos \beta \cdot p + K_k) \cdot (-m_{z+k} \cdot l \cdot (W_\xi - g_\xi) \cdot \cos \beta + M_1)] / \Delta, \\ \beta = [p \cdot (A \cdot p + f_2) \cdot (-m_{z+k} \cdot l \cdot (W_\xi - g_\xi) \cdot \cos \beta + M_1) - (-H \cdot \cos \beta \cdot p) \cdot M_2] / \Delta, \\ \Delta = p \cdot (A \cdot B \cdot p^3 + (A \cdot f_1 + B \cdot f_2) \cdot p^2 + (f_1 \cdot f_2 + H^2 \cdot \cos^2 \beta) \cdot p + H \cdot \cos \beta \cdot K_k), \end{cases}$$

$$M_1 = -l \cdot (m_{z+k}) \cdot ((W_\eta - g_\eta) \cdot \sin \alpha - (W_\zeta - g_\zeta) \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \beta - B^I \cdot (\dot{\omega}_\eta \cdot \cos \alpha + \dot{\omega}_\zeta \cdot \sin \alpha) + H \cdot (\omega_\xi \cdot \cos \beta + (\omega_\eta \cdot \sin \alpha - \omega_\zeta \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \beta) - M_{T1} \cdot \text{sign}(\dot{\beta}),$$

$$M_2 = -A \cdot \dot{\omega}_\xi - H \cdot (\omega_\eta \cdot \cos \alpha + \omega_\zeta \cdot \sin \alpha) \cdot \cos \beta + N \cdot (-\dot{\omega}_\eta \cdot \sin \alpha + \dot{\omega}_\zeta \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \beta - M_{T2} \cdot \text{sign}(\dot{\alpha}),$$

$$A = I_{X_2.p} + I_{x.k} + I_{x.z}, \quad m_{z+k} = m_z + m_k, \quad H = \dot{\gamma} \cdot I_{z.z}, \quad B = I_{Y_1.k} + I_{Y_1.z}, \quad B^I = (B - l^2 \cdot (m_k + m_z)),$$

$$N = (-l^2 \cdot (m_k + m_z) + (I_{III.Z_1.k} + I_{III.z.z}) - (I_{I.X_1.k} + I_{I.x.z})), \quad p \equiv d / dt,$$

де  $I$  – позначення моментів інерції елементів гірогравіметра: зовнішньої рамки ( $p$ ), кожуха гіромотора ( $k$ ), ротора ( $z$ );

$I, II, III$  – індекси, що вказують на планарні моменти інерції;

$x, z, Y_1, X_2, Z_1, X_1$  – індекси, що вказують на осьові моменти інерції і є позначеннями осей систем координат зв'язаних з елементами гірогравіметра;

$k$  – кут курсу;

$K_k$  – коефіцієнт передачі системи контролю перпендикулярності рамок підвісу;

$f_1, f_2$  – коефіцієнти в'язкого тертя у внутрішньому і зовнішньому підвісах;

$M_{T1}, M_{T2}$  – моменти сухого тертя у внутрішньому і зовнішньому підвісах;

$\zeta, \eta$  – горизонтальні осі горизонтально стабілізованої платформи (ГСП).

Проведено аналіз характеристичного рівняння  $\Delta=0$  і з'ясовано аналітичну умову стійкості гірогравіметра:

$$(A \cdot f_1 + B \cdot f_2) \cdot H > K_k \cdot A \cdot B.$$

Також знайдено корені характеристичного рівняння, які свідчать про наявність у вихідному сигналі  $\alpha(t)$  гірогравіметра згасаючої за 1..3 с експоненційної складової та нутаційних коливань в 100..200 р/с, що згасають приблизно за 1 с; на частоті нутацій можливий незначний резонанс.

**3. Похибки гірогравіметра.** Знайдено уточнені аналітичні вирази, що описують узагальнену характеристику динамічних збурень на борту літака:

$$W_\xi = \left[ \left( \frac{v^2}{r} \right) \cdot d\theta \cdot \cos k - v \cdot dk \cdot \sin k \right] \cdot e \cdot \sin 2\varphi - \left( \frac{v^2}{r} \right) + v \cdot d\dot{\theta} - r \cdot \omega_3^2 \cdot \cos^2 \varphi - 2 \cdot \omega_3 \cdot v \cdot \sin k \cdot \cos \varphi + \left[ W_{\xi,л.в\dot{и}бр} + \dot{\omega}_{\eta,л.в\dot{и}бр} \cdot \rho_{\zeta,л} \right],$$

$$W_\eta = v \cdot dk - \left( \frac{v^2}{r} \right) \cdot \sin k \cdot \operatorname{tg} \varphi - 2 \cdot v \cdot \omega_3 \cdot \sin \varphi - \left[ \left( \frac{v^2}{r} \right) \cdot \cos^2 k \cdot e - v \cdot d\dot{\theta} \cdot e + r \cdot \omega_3^2 / 2 \right] \times$$

$$\times \sin 2\varphi \cdot \sin k + 2 \cdot v \cdot \omega_3 \cdot d\theta \cdot \cos \varphi \cdot \cos k + \left[ W_{\eta,л.в\dot{и}бр} - \dot{\omega}_{\xi,л.в\dot{и}бр} \cdot \rho_{\zeta,л} \right],$$

$$W_\zeta = \left( \frac{v^2}{r} \right) \cdot d\theta + \left[ \left( \frac{v^2}{r} \right) \cdot \cos^2 k \cdot e - v \cdot d\dot{\theta} \cdot e + r \cdot \omega_3^2 / 2 \right] \cdot \sin 2\varphi \cdot \cos k + 2 \cdot v \cdot \omega_3 \cdot d\theta \cdot \cos \varphi \cdot \sin k + \left[ W_{\zeta,л.в\dot{и}бр} \right],$$

$$\omega_{\xi,л.в\dot{и}бр} = dk; \quad \omega_{\eta,л.в\dot{и}бр} = d\dot{\theta}; \quad r = (R + h),$$

де  $W_\xi, W_\eta, W_\zeta$  – складові абсолютного лінійного прискорення літака;

$v$  – шляхова швидкість;

$d\theta, dk$  – поточні відхилення кута тангажа, курсу;

$e$  – стиснення земного еліпсоїда;

$h$  – висота польоту;  $\omega_3$  – кутова швидкість обертання Землі;

$\varphi$  – географічна широта;

$W_{\xi,л.в\dot{и}бр}, W_{\eta,л.в\dot{и}бр}, W_{\zeta,л.в\dot{и}бр}$  – складові вібраційного літакового прискорення;

$\rho_{\zeta,л}$  – відстань від центру мас літака до місця установки гірогравіметра.

Кутові швидкості гірогравіметра знаходили із урахуванням того, що гірогравіметр встановлено на ГСП:

$$\omega_\xi = \left[ \omega_3 - v \cdot \sin k / (r \cdot \cos \varphi) \right] \cdot \sin \varphi + \omega_{\xi,нл.др\varphi},$$

$$\omega_\eta = \left[ \omega_3 - v \cdot \sin k / (r \cdot \cos \varphi) \right] \cdot \cos \varphi \cdot \sin k + \omega_{\eta,нл.др\varphi},$$

$$\omega_\zeta = \left[ \omega_3 - v \cdot \sin k / (r \cdot \cos \varphi) \right] \cdot \cos \varphi \cdot \cos k + \omega_{\zeta,нл.др\varphi},$$

де  $\omega_{\xi,нл.др\varphi}, \omega_{\eta,нл.др\varphi}, \omega_{\zeta,нл.др\varphi}$  – складові кутової швидкості ГСП, що описують дрейф її положення від горизонтального. Підстановкою у формули літакових та польотних параметрів знайдено числові оцінки літакових збурень.

Досліджувалась математична модель динаміки гірогравіметра в динамічному режимі його роботи (статичний режим є окремим випадком динамічного режиму). При цьому використовували метод послідовних наближень й елементи теорії проходження

гармонійного сигналу через лінійну систему. Були знайдені складові-похибки гірографіметра. Найсуттєвіші складові похибки гірографіметра та методи, розроблені для їх мінімізації, наводяться в табл. 1 та табл. 2 (позначка “—” означає постійну складову, а “~” – змінну,  $\varnothing$  – фазу сигналу, яка береться випадково у кожному конкретному випадку).

Таблиця 1

*Початкові оцінки найсуттєвіших систематичних похибок гірографіметра та методи, розроблені для їх зменшення*

Причина виникнення похибки	Кількісна початкова оцінка похибки, мГал	Обрані методи корекції похибок
<b>Складові похибки гірографіметра від літакових збурень</b>		
$\overline{W}_\xi$	$6,2 \cdot 10^3$	вимірювання $\overline{W}_\xi$ навігаційною системою та введення поправки в $\overline{g}_{\xi, \text{вим}}$ ;
$\overline{W}_\eta, \overline{W}_\zeta$	$24 \cdot \sin(\overline{\alpha} \times t + \varnothing)$	прийняття сигналу гірографіметра за цілу кількість періодів кута $\alpha$ ; збільшення $K_k$ ;
$\overline{\omega}_\xi$	$3,4 \cdot 10^2$	вимірювання $\overline{\omega}_\xi$ навігаційною системою та введення поправки в $\overline{g}_{\xi, \text{вим}}$ ; збільшення $\overline{\alpha}$ ;
$\overline{\omega}_\eta, \overline{\omega}_\zeta$	$0,3 \cdot \sin(\overline{\alpha} \times t + \varnothing)$ $0,3 \cdot \sin(\overline{\alpha} \times t + \varnothing)$	прийняття сигналу гірографіметра за цілу кількість періодів кута $\alpha$ ; збільшення $\overline{\alpha}$ , $K_k$ ;
$\overline{W}_\eta, \overline{W}_\zeta, \overline{\omega}_\eta, \overline{\omega}_\zeta$	$0,04 \cdot \sin(2 \overline{\alpha} \times t + \varnothing)$	
$\overline{W}_\eta, \overline{W}_\zeta, \overline{\omega}_\eta, \overline{\omega}_\zeta$	0,1	зменшення $H$ ; підвищення $K_k$ ;
$\widetilde{W}_\eta, \widetilde{W}_\zeta$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	
$\widetilde{W}_\xi$	$0,6 \cdot \sin(\omega_W \times t + \varnothing)$	зменшення $H$ ;
$\widetilde{W}_\xi, \widetilde{W}_\eta, \widetilde{W}_\zeta$	$3,4 \cdot \sin(\overline{\alpha} \times t + \varnothing)$	прийняття сигналу гірографіметра за цілу кількість періодів кута $\alpha$ ;
$\widetilde{\omega}_\xi$	1,6	збільшення $\overline{\alpha}$ ;
<b>Інструментальні похибки гірографіметра</b>		
$\overline{\omega}_{\eta, \text{пл.дрф}}, \overline{\omega}_{\zeta, \text{пл.дрф}}$	0,5	зменшення тривалості польоту $t_{\text{пол}}$ до 3,5 годин;
$\Delta \dot{\gamma}$	10; $(\Delta \dot{\gamma} / \dot{\gamma} = 10^{-5})$	вибір якісного генератора часових імпульсів; визначення поточного $\dot{\gamma}$ на інтервалі зі стабільною $\dot{\gamma}$ ;
$\Delta [t_k - t_n]$	10; $\left( \frac{\Delta [t_k - t_n]}{(t_k - t_n)} = 10^{-5} \right)$	вибір якісного генератора часових імпульсів; побудова швидкодіючої системи прийому сигналу гірографіметра;

$\Delta L$ при зміні температури	1; ( $\Delta L/L = 10^{-6}$ )	розміщення гірографіметра в термостаті;
$\Delta[\Delta\alpha]$	2,4	підвищення точності вимірювання $\Delta\alpha$ ; збільшення $\bar{\alpha}$ ;
Примітки: 1. $\Delta\alpha = \alpha(t_k) - \alpha(t_n)$ ; $\Delta[\Delta\alpha]$ – неточність вимірювання $\Delta\alpha$ , ( $\Delta[\Delta\alpha] = 4,8 \cdot 10^{-6}$ мГал); 2. $\Delta\dot{\gamma}$ – відхилення встановленої частоти обертання ротора гідромотора; 3. $\Delta[t_k - t_n]$ – неточність визначення $(t_k - t_n)$ ; 4. $\Delta[\bar{\omega}_{\xi, \text{вим}}]$ , $\Delta[\bar{W}_{\xi, \text{вим}}]$ – залишкові похибки навігаційної системи після введення поправок за $\bar{\omega}_{\xi}$ та $\bar{W}_{\xi}$ .		

Таблиця 2

## Найсуттєвіші систематичні похибки гірографіметра

Причина виникнення похибки	Кількісна початкова оцінка похибки, мГал	Кінцева оцінка похибки після корекції:	
		символьна	кількісна, мГал
<b>Складові похибки гірографіметра від літакових збурень</b>			
$\bar{W}_{\xi}$	$6,2 \cdot 10^3$	$\Delta[\bar{W}_{\xi, \text{вим}}]$	1
$\bar{W}_{\eta}, \bar{W}_{\zeta}$	$24 \cdot \sin(\bar{\alpha} \times t + \theta)$	$\sqrt{\bar{W}_{\eta}^2 + \bar{W}_{\zeta}^2} \cdot f_2 \cdot \Delta[\Delta\alpha] / ((t_k - t_n) \cdot K_k)$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
$\bar{\omega}_{\xi}$	$3,4 \cdot 10^2$	$\Delta[\bar{\omega}_{\xi, \text{вим}}] \cdot \bar{g}_{\xi} / \bar{\alpha}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$
$\bar{\omega}_{\eta}, \bar{\omega}_{\zeta}$	$0,3 \cdot \sin(\bar{\alpha} \times t + \theta)$	$\sqrt{\bar{\omega}_{\eta}^2 + \bar{\omega}_{\zeta}^2} \cdot f_2 \cdot \Delta[\Delta\alpha] / ((t_k - t_n) \cdot K_k \cdot \bar{\alpha})$	$7,2 \cdot 10^{-8}$
	$0,3 \cdot \sin(\bar{\alpha} \times t + \theta)$	$\frac{\sqrt{\bar{\omega}_{\eta}^2 + \bar{\omega}_{\zeta}^2} \cdot \sqrt{B^2 \cdot \bar{\alpha}^2 + f_1^2} \cdot \bar{g}_{\xi} \cdot \Delta[\Delta\alpha]}{\left( \sqrt{K_k^2 + H^2 \cdot \bar{\alpha}^2} \cdot (t_k - t_n) \cdot \bar{\alpha} \right)}$	$3,3 \cdot 10^{-7}$
$\bar{W}_{\eta}, \bar{W}_{\zeta}, \bar{\omega}_{\eta}, \bar{\omega}_{\zeta}$	$0,04 \cdot \sin(2\bar{\alpha} \times t + \theta)$	$\frac{\sqrt{\bar{\omega}_{\eta}^2 + \bar{\omega}_{\zeta}^2} \cdot \sqrt{\bar{W}_{\eta}^2 + \bar{W}_{\zeta}^2} \cdot H \cdot \Delta[\Delta\alpha]}{\left( 4 \cdot \sqrt{K_k^2 + H^2 \cdot \bar{\alpha}^2} \cdot (t_k - t_n) \cdot \bar{\alpha} \right)}$	$3,8 \cdot 10^{-9}$
$\bar{W}_{\eta}, \bar{W}_{\zeta}, \bar{\omega}_{\eta}, \bar{\omega}_{\zeta}$	0,1	$\frac{\sqrt{\bar{\omega}_{\eta}^2 + \bar{\omega}_{\zeta}^2} \cdot \sqrt{\bar{W}_{\eta}^2 + \bar{W}_{\zeta}^2} \cdot H}{\left( 2 \cdot \sqrt{K_k^2 + H^2 \cdot \bar{\alpha}^2} \cdot (t_k - t_n) \cdot \bar{\alpha} \right)}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$
$\tilde{W}_{\eta}, \tilde{W}_{\zeta}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$\sqrt{\tilde{W}_{\eta}^2 + \tilde{W}_{\zeta}^2} \cdot f_2 \cdot \bar{\alpha} \cdot H^2 / ((t_k - t_n) \cdot K_k \cdot A \cdot B \cdot \omega)$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
$\tilde{W}_{\xi}$	$6 \cdot \sin(\omega_W \times t + \theta)$	$\tilde{W}_{\xi} \cdot H^2 / ((t_k - t_n) \cdot A \cdot B \cdot \omega_W^3)$	0,1

$\tilde{W}_\xi, \tilde{W}_\eta, \tilde{W}_\zeta$	$3,4 \cdot \sin(\bar{\alpha} \times t + \varnothing)$	$\frac{\tilde{W}_\xi \cdot \sqrt{\tilde{W}_\eta^2 + \tilde{W}_\zeta^2} \cdot \sqrt{2} \cdot H \cdot \Delta[\Delta\alpha]}{(4 \cdot B \cdot \omega_w^2 \cdot \bar{g}_\xi \cdot (t_\kappa - t_n))}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$
$\tilde{\omega}_\xi$	1,6	$\tilde{\omega}_\xi \cdot \bar{g}_\xi / \bar{\alpha}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
<b>Інструментальні похибки гірографіметра</b>			
$\bar{\omega}_{\eta, \text{пл.дрф}}, \bar{\omega}_{\zeta, \text{пл.дрф}}$	0,5	$\left\{ \sqrt{\bar{\omega}_{\eta, \text{пл.дрф}}^2 + \bar{\omega}_{\zeta, \text{пл.дрф}}^2} \cdot t_{\text{пол}} \right\}^2 \cdot \bar{g}_\xi / 2$	$2,5 \cdot 10^{-1}$
$\Delta\dot{\gamma}$	10; ( $\Delta\dot{\gamma} / \dot{\gamma} = 10^{-5}$ )	$\Delta\dot{\gamma} \cdot \bar{g}_\xi / \dot{\gamma}; (\Delta\dot{\gamma} / \dot{\gamma} = 10^{-7})$	0,1
$\Delta[t_\kappa - t_n]$	10; $\left( \frac{\Delta[t_\kappa - t_n]}{(t_\kappa - t_n)} = 10^{-5} \right)$	$\Delta[t_\kappa - t_n] \cdot \bar{g}_\xi / (t_\kappa - t_n);$ ( $\Delta[t_\kappa - t_n] / (t_\kappa - t_n) = 10^{-6}$ )	0,1 $\left( \frac{\Delta[t_\kappa - t_n]}{(t_\kappa - t_n)} = 10^{-7} \right)$
$\Delta L$ при зміні температури	1; ( $\Delta L / L = 10^{-6}$ )	$\Delta L \cdot \bar{g}_\xi / L;$	0,1; ( $\Delta L / L = 10^{-7}$ )
$\Delta[\Delta\alpha]$	2,4	$\Delta[\Delta\alpha] \cdot \bar{g}_\xi / ((t_\kappa - t_n) \cdot \bar{\alpha})$	$2,5 \cdot 10^{-1}$
<b>Сума значень складових похибки:</b>			<b>1,9 мГал</b>
<b>Корінь суми квадратів складових похибки:</b>			<b>1,2 мГал</b>

**4. Система прийому та передачі сигналів гірографіметра у БЦОМ.** Проведено аналіз вузьких місць в реалізації зчитування та передачі сигналів від гірографіметра до БЦОМ [6]. Потреба у проміжній системі викликана в першу чергу необхідністю вимірювати моменти початку та кінця відліку даних гірографіметра з точністю  $10^6 \dots 10^7$  секунди. Розроблено систему прийому та передачі сигналів гірографіметра у БЦОМ, в основу якої покладено такі принципи: принцип повної незалежності від БЦОМ (в системі передбачено окремий прецизійний генератор опорної частоти та розроблено підсистему зчитування і збереження даних); принцип підвищеної надійності (систему забезпечено достатнім об'ємом пам'яті для збереження всіх даних від гірографіметра, отриманих протягом всього польоту); принцип жорсткої логіки (для унеможливлення випадкових програмних збоїв в системі не застосовані елементи з програмним управлінням); новий для подібних систем принцип одночасного доступу до пам'яті системи (процес зчитування сигналу гірографіметра у пам'ять системи може відбуватись одночасно зі зчитуванням у пам'ять БЦОМ даних, записаних у пам'ять системи раніше); принцип відкритості системи (розроблено підсистему перевірки працездатності системи за допомогою команд від БЦОМ, причому перевірка здійснюється лише по двом основним шинам зв'язку); принцип двошинної організації між БЦОМ та системою (передбачено одну шину управління (5 біт) та одну шину (16 біт), яка по чергово використовується як шина адреси та шина даних).

### **5. Математичне моделювання функціонування гірогравіметра в умовах збурень.**

Наводяться результати проведення модельного експерименту на ЕОМ із застосуванням моделі функціонування гірогравіметра в умовах збурень. На вході математичної моделі в окремій підсистемі задання параметрів задавалися різні амплітуди і частоти збурень, а також різні співвідношення конструктивних параметрів гірогравіметра, а вихід моделі формувався розв'язанням рівнянь математичної моделі за допомогою ЕОМ та числових методів. У ході експериментів з математичною моделлю підтверджено, що мінімуми похибки гірогравіметра досягаються при встановленому цілому числі періодів кута  $\alpha$ , за які відбувається зняття сигналу гірогравіметра. Подальше зниження похибки досягається шляхом варіації конструктивних параметрів гірогравіметра  $(H, K_k, \bar{\alpha})$ . Похибку гірогравіметра можна знижувати таким методом, але гірогравіметр може втратити стійкість, яку відновлювали підбором коефіцієнта в'язкого тертя  $f_1$ . Знайдені значення  $f_1$  для різних співвідношень  $H, K_k$  підтвердили розраховану аналітично умову стійкості гірогравіметра.

Моделювався випадок, коли параметри збурень відрізнялися від своїх типових значень. Зниження частот та (або) підвищення амплітуд збурень суттєво підвищує похибку гірогравіметра, і навпаки, похибка гірогравіметра знижується при підвищених частотах і (або) знижених амплітудах збурень. Зміна параметрів лінійних вібрацій суттєвіше впливає на похибку гірогравіметра, ніж зміна параметрів кутових вібрацій. При незмінній амплітуді лінійних вібраційних прискорень і зменшенні їх частоти відбувається найсуттєвіше збільшення похибки гірогравіметра. При підвищенні значень постійних складових лінійного прискорення вище  $6 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$  відбувається пропорційне збільшення впливу на похибку гірогравіметра постійних складових вектора кутової швидкості. Але подібний процес не спостерігався для змінних складових векторів кутової швидкості та лінійного прискорення. У результаті модельних експериментів підтверджено в числовій формі правильність розроблених у теоретичній частині аналітичних залежностей. Для типових параметрів літакових збурень моделювання на ЕОМ показало похибку гірогравіметра на рівні 1,25 мГал.

### **6. Результати проведених експериментальних лабораторних досліджень роботи гірогравіметра.**

Експеримент з гірогравіметром проводився на основі лабораторного варіанту гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень. У ході досліджень різні значення маятниковостей задавалися налаштуванням елементів гірогравіметра мікрометричним механізмом; значення частоти обертання ротора гіромотора змінювали перепрограмуванням блоку керування гіромотором; зміну амплітуди і частоти вібраційних збурень забезпечували приладами вібростенда, де було встановлено гірогравіметр. Сигнал з гірогравіметра знімався за допомогою схеми електронних лічильників та блока реєстрів фіксації даних, що підключались до порту ЕОМ. Обробка даних відбувалась програмно в ЕОМ. Досліджувались похибки гірогравіметра в статичному і динамічному режимах його роботи.

*Статичний режим.* Середньоквадратична похибка гірогравіметра утримувалась на рівні 0,12 мГал і не перевищувала 0,14 мГал (тут не зазначено залишкову похибку навігаційної системи через відсутність потреби введення поправки за постійну складову вектора лінійного прискорення літака). Величина середньоквадратичної похибки гірогравіметра підтверджує те, що його конструктивні параметри обрані коректно і дозволяють досягти бажаної точності в статичному режимі його роботи. Під час лабораторних експериментів встановлено, що найсуттєвіші похибки статичного режиму залежать від середньої кутової швидкості зовнішньої рамки при незмінній кількості її обертів, за які знімається сигнал гірогравіметра.

Для статичного режиму встановлено статичну характеристику гірогравіметра:  $\bar{g}_{\xi, \Gamma-H} = \bar{g}_{\xi} \pm 1,5 \cdot 10^{-1}$  мГал; оцінено швидкодію в межах 1..5 секунд, встановлено клас точності наземного гірогравіметра – “ $1,5 \cdot 10^{-5}$ ”.

*Динамічний режим.* За допомогою вібростенда створювали дію типових літакових збурень. Середньоквадратична похибка спостерігалась на рівні 0,23 мГал, що підтверджує ефективність застосованих методів зниження похибки гірогравіметра. Під час лабораторних експериментів підтвердився домінуючий вплив саме лінійних вібраційних прискорень на похибку гірогравіметра. З'ясовано і те, що зменшенням кінетичного моменту гіромотора можна знизити похибку гірогравіметра.

Для динамічного режиму встановлено статичну характеристику гірогравіметра –  $\bar{g}_{\xi, \Gamma-AGC} = \bar{g}_{\xi} \pm 1,25$  мГал (враховано похибку навігаційної системи на рівні 1 мГал); оцінено швидкодію в межах 8..10 секунд; встановлено клас точності гірогравіметра АГС – “ $1,5 \cdot 10^{-4}$ ”.

**Висновки.** У статті наведено теоретичне узагальнення і нове розв'язання наукового завдання створення гіроскопічного гравіметра для авіаційної гравіметричної системи з метою підвищення точності вимірювань величини гравітаційного прискорення. Наукове завдання вирішено шляхом застосування в АГС гірогравіметра на основі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень.

*Описано нові наукові результати:*

обґрунтовано теоретичні основи використання як гравіметра АГС гірогравіметра на основі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень;

розроблено математичну модель динаміки функціонування гірогравіметра в умовах збурень на борту рухомого апарата з урахуванням динамічної зміни моментів інерції окремих елементів гіросистеми під час її функціонування;

уточнено рівняння руху АГС з урахуванням розміщення гравіметра АГС на певній відстані від центру мас літака та його кутових вібрацій під час польоту;

визначено аналітичні залежності складових похибки гірогравіметра від параметрів літакових збурень та конструктивних параметрів гірогравіметра;

розроблено систему автоматичного зняття та передачі сигналів гірогравіметра у БЦОМ, у якій застосовано новий принцип одночасного доступу до елементів її пам'яті.

*Практичне значення отриманих результатів:*

розроблено принцип дії та алгоритм роботи АГС нового типу, в якій застосовано гірогравіметр з цифровою обробкою інформації;

створено функціональну схему, принцип дії та алгоритм роботи системи автоматичного зняття та передачі сигналів гірогравіметра у БЦОМ;

розроблено ефективні методи та рекомендації стосовно зниження похибок гірогравіметра АГС;

запропоновано уточнену методику аналітичного опису однороторних гіросистем з перехресними осями підвісу та зміщеним центром мас гідромотора, яка дозволяє враховувати динамічну зміну моментів інерції елементів гіросистеми в процесі її роботи;

розроблено методики досліджень гірогравіметра за допомогою ЕОМ, зокрема в лабораторних умовах;

визначено основні метрологічні характеристики роботи гірогравіметра як наземного гравіметра та гравіметра АГС (відносна та приведена похибка, межа чутливості, діапазон перетворення, швидкодія, розрядність вихідного сигналу, клас точності).

Прикладне значення отриманих результатів у тому, що нова АГС з гірогравіметром, окрім фундаментальних досліджень у галузі геодезії, геофізики, може бути також використана для вирішення локальних геологічних завдань, зокрема пошуку покладів корисних копалин.

Висновок про ефективність застосування гірогравіметра як гравіметра АГС теоретично обґрунтовано розробленими аналітичними залежностями його похибки від параметрів літакових збурень та конструктивних параметрів гірогравіметра, а також здійсненою числовою оцінкою зазначених аналітичних залежностей, яка становить 1,2..1,9 мГал, що в 1,5..3 рази нижче похибок існуючих гравіметрів АГС (3..6 мГал).

Достовірність отриманих теоретично результатів дослідження точності гірогравіметра підтверджена в ході моделювання на ЕОМ його динаміки в умовах літакових збурень, яке показало сумарну похибку гірогравіметра на рівні 1,25 мГал.

Остаточне рішення про доцільність використання гірогравіметра як гравіметра АГС було прийняте після обробки результатів лабораторних досліджень його експериментального зразка, під час яких похибка гірогравіметра утримувалась на рівні 0,23 мГал (відсутня складова в приблизно 1 мГал від неточності поправки за вертикальне прискорення).

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Безвесільна О. М. Вимірювання гравітаційних прискорень: підруч. / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖІТІ, 2002. – 264 с.
2. Wei M., Schwarz K. P. Flight test results from a strapdown airborne gravity system / Wei M., Schwarz K. P. // Journal of Geodesy. – 1998. – Vol. 72. – P. 323–332.
3. Hannah J. Airborne gravimetry: a status report / Hannah J. – Department of Surveying, University of Otago, 2001. – 307 p.
4. Павловський М. А. Теоретическая механика: учеб. пособ. / М. А. Павловський, Т. В. Пуятя. – К. : Вища школа, 1985. – 328 с.

5. Струтинський В. Б. Тензорні математичні моделі процесів та систем: підруч. / В. Б. Струтинський. – Житомир : ЖДТУ, 2005. – 635 с.
6. Коваленко І. О. Метрологія та вимірювальна техніка: навч. посіб. / І. О. Коваленко, А. М. Коваль. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 652 с.

Подано 24.04.08

**Е. Н. Безвесильная, А. А. Добржанский**  
**ПРИМЕНЕНИЕ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ГРАВИМЕТРА В АВИАЦИОННОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

*В статье представлены обобщенные результаты исследований эффективности функционирования нового типа гравиметра авиационной гравиметрической системы (АГС) – гиросгравиметра на основе гироскопического интегратора линейных ускорений. Обосновано возможность применения гиросгравиметра в АГС, представлена математическая модель динамики функционирования гиросгравиметра в условиях присутствия возмущений, приведены аналитические оценки и оценки количественных значений погрешностей гиросгравиметра, а также методы их уменьшения, исследуется проблема автоматического считывания и обработки сигналов гиросгравиметра, даётся описание основных методов и результатов экспериментальных исследований эффективности функционирования гиросгравиметра.*

**О. М. Bezvesilna, O. O. Dobrzhansky**  
**GYROGRAVIMETER APPLICATION TO AIRBORNE GRAVIMETRIC SYSTEM**

*The article deals with generalized results of functional effectiveness of new type gravimeter in airborne gravimetric system (AGS) that is gyrogravimeter based on integrating gyroscope. The problems substantiated by the author are as follows: possibilities of gyrogravimeter in application to AGS, mathematical model of gyrogravimeter functional dynamic under perturbation conditions, analytical and quantitative evaluation of gyrogravimetric errors and ways of their redaction, the problem of gyrogravimeter automatic data reading and signal treatment, description of main experimental methods and results of gyrogravimeter functional effectiveness investigations.*