

## ПРИЛАДИ. РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 531.383

О.М. Безвесільна, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України "КПІ"

О.О. Добржанський, аспір.

Житомирський державний технологічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГІРОСКОПІЧНОГО ГРАВІМЕТРА В АВІАЦІЙНІЙ ГРАВІМЕТРИЧНІЙ СИСТЕМІ

*В статті представлено узагальнені результати досліджень ефективності функціонування нового типу гравіметра авіаційної гравіметричної системи (АГС): гірогравіметра на основі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень. Автором дано обґрунтування можливості застосування гірогравіметра в АГС, представлено математичну модель динаміки функціонування гірогравіметра в умовах збурень, наведено аналітичні оцінки та оцінки кількісних значень похибок гірогравіметра та методи їх зниження, досліджується проблема автоматичного зчитування та обробки сигналів гірогравіметра, дано опис основних методів та результатів експериментальних досліджень ефективності функціонування гірогравіметра.*

**Постановка проблеми.** Гірогравіметри сьогодні є найперспективнішими, з точки зору широкомасштабного вивчення аномалій гравітаційного прискорення. Гірогравіметр розглядається як головний чутливий елемент авіаційної гравіметричної системи (гравіметр АГС). Актуальним є впровадження технологій автоматизації в систему функціонування приладу, що уможливує комп'ютерну обробку інформаційних сигналів приладу. 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.

**Аналіз останніх досліджень.** Необхідність досліджень спрямованих на підвищення точності вимірювання величини вектора гравітаційного прискорення зумовлена тим, що існуючі на цей час авіаційні гравіметричні системи (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 обмежена вихідною точністю гравіметра АГС (3...6 мГал). Водночас для ефективного практичного застосування АГС в наш час визначена вимога до точності гравіметра АГС на рівні 1...2 мГал [2], [3].

**Загальна проблема.** Підвищення точності та швидкості вимірювань величини гравітаційного прискорення та автоматизація процесу вимірювань величини гравітаційного прискорення шляхом використання як гравіметра авіаційної гравіметричної системи (АГС) однороторного інтегруючого гіроскопічного гравіметра з додатковим каналом контролю (далі гірогравіметра).

**Постановка завдання.** Представити основні результати теоретичних та експериментальних досліджень ефективності застосування в авіаційній гравіметричній системі нового типу гравіметра: гірогравіметра з додатковими каналами контролю.

**Основна частина.**

**1. Гірогравіметр.** З метою підвищення точності та швидкості вимірювань величини вектора гравітаційного прискорення запропоновано застосувати в АГС гірогравіметр, що побудований на основі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень. Будова гірогравіметра 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.

Запропоновано алгоритм визначення величини гравітаційного прискорення за допомогою гірогравіметра: бортова цифрова обчислювальна машина (БЦОМ) зчитує інформацію з гірогравіметра 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:

$$\dot{\gamma} = \text{const} \pm \Delta\dot{\gamma}, \quad \beta = 0 \pm \Delta\beta, \quad (1)$$

де  $\Delta\beta, \Delta\dot{\gamma}$  – відхилення величин  $\beta, \dot{\gamma}$ , якими можна знехтувати і вважати такими, що прямують 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  $R$  гірогравіметра:

$$R = m \cdot I / (J \cdot \dot{\gamma}), \quad (2)$$

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:

$$\bar{g}_{\xi, \text{вум}} = \frac{-1}{R} \cdot \left[ (\alpha(t_k) - \alpha(t_n)) - R \cdot \left( \int_{t_n}^{t_k} W_{\xi} dt \right) + \left( \int_{t_n}^{t_k} \omega_{\xi} dt \right) \right] \cdot \frac{1}{(t_k - t_n)}, \quad (3)$$

де  $t_k, t_n$  – моменти часу початку та кінця відліку інтервалу даних; нтеграли 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 подолати недоліки існуючих гравіметрів АГС тим, що забезпечує підвищення стабільності статичного передатного коефіцієнта гравіметра АГС, можливість визначення поточного статичного передатного коефіцієнта гравіметра АГС; зниження рівня перешкод у вихідному сигналі гравіметра АГС. До того ж, інтегруючі властивості запропонованого гірогравіметра дозволяють виключити етап усереднення даних, отриманих від гірогравіметра, і цим звільнитись від похибки нелінійності, яка б виникала при дискретному інтегруванні сигналу.

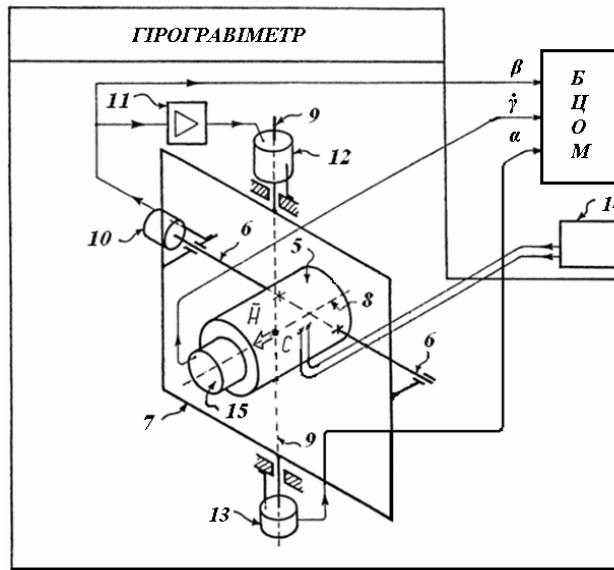


Рис. 1. Гірогравіметр АГС

Новий тип гравіметра АГС разом із 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 функціонування гірогравіметра в умовах збурень на борту рухомого апарата з урахуванням динамічної зміни моментів інерції окремих елементів гіросистеми:

$$\alpha = [p \cdot (B \cdot p + f_1) \cdot M_2 - (H \cdot \cos \beta \cdot p + K_k) \cdot (-m_{e+k} \cdot l \cdot (W_{\xi} - g_{\xi}) \cdot \cos \beta + M_1)] / \Delta, \quad (5)$$

$$\beta = [p \cdot (A \cdot p + f_2) \cdot (-m_{e+k} \cdot l \cdot (W_{\xi} - g_{\xi}) \cdot \cos \beta + M_1) - (-H \cdot \cos \beta \cdot p) \cdot M_2] / \Delta, \quad (6)$$

$$\Delta = p \cdot (A \cdot B \cdot p^3 + (A \cdot f_1 + B \cdot f_2) \cdot p^2 + (f_1 \cdot f_2 + H^2 \cdot \cos^2 \beta) \cdot p + H \cdot \cos \beta \cdot K_k), \quad (7)$$

$$M_1 = -l \cdot (m_{e+k}) \cdot ((W_{\eta} - g_{\eta}) \cdot \sin \alpha - (W_{\zeta} - g_{\zeta}) \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \beta - B' \cdot (\dot{\omega}_{\eta} \cdot \cos \alpha + \dot{\omega}_{\zeta} \cdot \sin \alpha) + H \cdot (\omega_{\xi} \cdot \cos \beta + (\omega_{\eta} \cdot \sin \alpha - \omega_{\zeta} \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \beta) - M_{\tau_1} \cdot \text{sign}(\dot{\beta}), \quad (8)$$

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

$$+ N \cdot (-\dot{\omega}_\eta \cdot \sin \alpha + \dot{\omega}_\zeta \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \beta - M_{T2} \cdot \text{sign}(\dot{\alpha}), \quad (9)$$

$$A = I_{X_2,p} + I_{X,k} + I_{X,e}, \quad m_{e+k} = m_e + m_k, \quad (10)$$

$$H = \dot{\gamma} \cdot I_{z,e}, \quad B = I_{Y_1,k} + I_{Y_1,e}, \quad B^I = (B - I^2 \cdot (m_k + m_e)), \quad (11)$$

$$N = (-I^2 \cdot (m_k + m_e) + (I_{III,z_1,k} + I_{III,z,e}) - (I_{I,X_1,k} + I_{I,X,e})), \quad p \equiv d / dt, \quad (12)$$

де “ $I$ ” – позначення моментів інерції елементів гірогравіметра: зовнішньої рамки (індекс “ $p$ ”), кожуха гіромотора (“ $k$ ”), ротора (“ $e$ ”); індекси “ $I, II, III$ ” вказують на планарні моменти інерції; індекси “ $x, z, Y_1, X_2, Z_1, X_1$ ” вказують на осьові моменти інерції і є позначеннями осей систем координат, пов’язаних з елементами гірогравіметра;  $K_k$  – 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);  $\xi$  – вертикальна вісь ГСП.

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

$$(A \cdot f_1 + B \cdot f_2) \cdot H > K_k \cdot A \cdot B. \quad (13)$$

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

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

$$W_\xi = \left[ (v^2/r) \cdot d\theta \cdot \cos k - v \cdot dk \cdot \sin k \right] \cdot e \cdot \sin 2\varphi - (v^2/r) + v \cdot d\dot{\theta} - r \cdot \omega_3^2 \cdot \cos^2 \varphi - 2 \cdot \omega_3 \cdot v \cdot \sin k \cdot \cos \varphi + [W_{\xi,л.вібр} + \dot{\omega}_{\eta,л.вібр} \cdot \rho_{\zeta,л}], \quad (14)$$

$$W_\eta = v \cdot dk - (v^2/r) \cdot \sin k \cdot tg\varphi - 2 \cdot v \cdot \omega_3 \cdot \sin \varphi - [(v^2/r) \cdot \cos^2 k \cdot e - v \cdot d\dot{\theta} \cdot e + r \cdot \omega_3^2 / 2] \cdot \sin 2\varphi \cdot \sin k + 2 \cdot v \cdot \omega_3 \cdot d\theta \cdot \cos \varphi \cdot \cos k + [W_{\eta,л.вібр} - \dot{\omega}_{\xi,л.вібр} \cdot \rho_{\zeta,л}] \quad (15)$$

$$W_\zeta = (v^2/r) \cdot d\theta + [(v^2/r) \cdot \cos^2 k \cdot e - v \cdot d\dot{\theta} \cdot e + r \cdot \omega_3^2 / 2] \cdot \sin 2\varphi \cdot \cos k + 2 \cdot v \cdot \omega_3 \cdot d\theta \cdot \cos \varphi \cdot \sin k + [W_{\zeta,л.вібр}], \quad (16)$$

$$\omega_{\xi,л.вібр} = dk, \quad \omega_{\eta,л.вібр} = d\dot{\theta}, \quad r = (R + h), \quad (17)$$

де  $W_\xi, W_\eta, W_\zeta$  – складові абсолютного лінійного прискорення літака;  $v$  – шляхова швидкість;  $d\theta, dk$  – поточні відхилення кута тангажу, курсу;  $e$  – стиснення земного еліпсоїда;  $R$  – радіус Землі;  $h$  – висота польоту;  $\omega_3$  – кутова швидкість обертання Землі;  $\varphi$  – географічна широта;  $W_{\xi,л.вібр}, W_{\eta,л.вібр}, W_{\zeta,л.вібр}$  – складові вібраційного літакового прискорення;  $\rho_{\zeta,л}$  – відстань від центра мас літака до місця установки гірогравіметра;  $k$  – кут курсу.

Кутіві швидкості гірогравіметра знаходили з урахуванням того, що гірогравіметр встановлено на ГСП:

$$\omega_\xi = [\omega_3 - v \cdot \sin k / (r \cdot \cos \varphi)] \cdot \sin \varphi + \omega_{\xi,пл.дрф}, \quad (18)$$

$$\omega_\eta = [\omega_3 - v \cdot \sin k / (r \cdot \cos \varphi)] \cdot \cos \varphi \cdot \sin k + \omega_{\eta,пл.дрф}, \quad (19)$$

$$\omega_\zeta = [\omega_3 - v \cdot \sin k / (r \cdot \cos \varphi)] \cdot \cos \varphi \cdot \cos k + \omega_{\zeta,пл.дрф}, \quad (20)$$

де  $\omega_{\xi,пл.дрф}, \omega_{\eta,пл.дрф}, \omega_{\zeta,пл.дрф}$  – складові кутової швидкості ГСП, що описують дрейф положення ГСП 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 і елементи теорії проходження гармонійного сигналу через лінійну систему. Було знайдено складові-похибки гірогравіметра. Найсуттєвіші складові похибки гірогравіметра та методи розроблені для їх мінімізації представлені в табл. 1–2 (позначка “~” означає постійну складову, а “~” – змінну).

**4. Система прийому та передачі сигналів гірогравіметра у БЦОМ.** Проведено аналіз вузьких місць в реалізації читування та передачі сигналів від гірогравіметра 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 двох основних шинах 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 гірографіметра в умовах збурень.** Представлено результати проведення модельного експерименту на ЕОМ із застосуванням моделі функціонування гірографіметра в умовах збурень. На вході математичної моделі в окремій підсистемі задання параметрів задавались різні амплітуди і частоти збурень, а також різні співвідношення конструктивних параметрів гірографіметра, а вихід моделі формувався розв'язанням рівнянь математичної моделі за допомогою ЕОМ та чисельних методів. У ході експериментів з математичною моделлю підтверджено, що мінімуми похибки гірографіметра досягаються при встановленому цілому числі періодів кута  $\alpha$ , за які відбувається зняття сигналу гірографіметра. Подальше зниження похибки досягається шляхом варіації конструктивних параметрів гірографіметра ( $H, K_k, \bar{\alpha}$ ). Похибку гірографіметра можливо знижувати таким методом, але гірографіметр 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 гірографіметра.

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

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  |
|--|--|---|
| <i>Складові похибки гірографіметра від літакових збурень</i> |  |   |
| $\bar{W}_\xi$  | $6,2 \cdot 10^3$   | вимірювання $\bar{W}_\xi$ навігаційною системою та введення поправки в $\bar{g}_{\xi, \text{вим}}$                                  |
| $\bar{W}_\eta, \bar{W}_\zeta$                                | $24 \cdot \sin(\bar{\alpha} \cdot t + \Phi)$   | прийняття сигналу гірографіметра за цілу кількість періодів кута $\alpha$ ; збільшення $K_k$  |
| $\bar{\omega}_\xi$   | $3,4 \cdot 10^2$   | вимірювання $\bar{\omega}_\xi$ навігаційною системою та введення поправки в $\bar{g}_{\xi, \text{вим}}$ ; збільшення $\bar{\alpha}$ |
| $\bar{\omega}_\eta, \bar{\omega}_\zeta$                      | $0,3 \cdot \sin(\bar{\alpha} \cdot t + \Phi)$<br>$0,3 \cdot \sin(\bar{\alpha} \cdot t + \Phi)$ | прийняття сигналу гірографіметра за цілу кількість періодів кута $\alpha$ ; збільшення $\bar{\alpha}, K_k$                          |

|   |   |  |
|---|---|--|
| $\overline{W}_\eta, \overline{W}_\xi, \overline{\omega}_\eta, \overline{\omega}_\xi$  | $0,04 \cdot \sin(2\overline{\alpha} \cdot t + \Phi)$                    |  |
| $\overline{W}_\eta, \overline{W}_\xi, \overline{\omega}_\eta, \overline{\omega}_\xi$  | 0,1   | зменшення $H$ ; підвищення $K_k$   |
| $W_\eta, W_\xi$   | $1,8 \cdot 10^{-3}$   |  |
| $W_\xi$   | $0,6 \cdot \sin(\omega_W \cdot t + \Phi)$                               | зменшення $H$  |
| $W_\xi, W_\eta, W_\zeta$  | $3,4 \cdot \sin(\overline{\alpha} \cdot t + \Phi)$                      | прийняття сигналу гірогравіметра за цілу кількість періодів кута $\alpha$  |
| $\omega_\xi$  | 1,6   | збільшення $\overline{\alpha}$   |
| <i>Інструментальні похибки гірогравіметра</i>   |   |  |
| $\overline{\omega}_{\eta, пл.дрф}, \overline{\omega}_{\xi, пл.дрф}$   | 0,5   | зменшення тривалості польоту $t_{пол}$ до 3,5 годин  |
| $\Delta\dot{\gamma}$  | 10;<br>$(\Delta\dot{\gamma} / \dot{\gamma} = 10^{-5})$                  | вибір якісного генератора часових імпульсів; визначення поточного $\dot{\gamma}$ на інтервалі зі стабільною $\dot{\gamma}$ |
| $\Delta[t_k - t_n]$   | 10;<br>$\left( \frac{\Delta[t_k - t_n]}{(t_k - t_n)} = 10^{-5} \right)$ | вибір якісного генератора часових імпульсів; побудова швидкодіючої системи прийому сигналу гірогравіметра                  |
| $\Delta L$ при зміні температури  | 1;<br>$(\Delta L / L = 10^{-6})$  | розміщення гірогравіметра в термостаті   |
| $\Delta[\Delta\alpha]$  | 2,4   | підвищення точності вимірювання $\Delta\alpha$ ; збільшення $\overline{\alpha}$  |
| <p><i>Примітки:</i> 1. <math>\Delta\alpha = \alpha(t_k) - \alpha(t_n)</math>; <math>\Delta[\Delta\alpha]</math> – неточність вимірювання <math>\Delta\alpha</math>, (<math>\Delta[\Delta\alpha] = 4,8 \cdot 10^{-6}</math> мГал); 2. <math>\Delta\dot{\gamma}</math> - відхилення встановленої частоти обертання ротора гідромотора; 3. <math>\Delta[t_k - t_n]</math> – неточність визначення <math>(t_k - t_n)</math>; 4. <math>\Delta[\overline{\omega}_{\xi, вим}]</math>, <math>\Delta[\overline{W}_{\xi, вим}]</math> – залишкові похибки навігаційної системи після введення поправок за <math>\overline{\omega}_\xi</math> та <math>\overline{W}_\xi</math></p> |   |  |

Таблиця 2

Найсуттєвіші систематичні похибки гірографіметра

| Причина виникнення похибки   | Кількісна початкова оцінка похибки, мГал                             | Кінцева оцінка похибки після корекції:   |   |
|--|--|--|---|
|  |  | Символьна  | кількісна, мГал   |
| <i>Складові похибки гірографіметра від літакових збурень</i>                             |  |  |   |
| $\overline{W}_\xi$   | $6,2 \cdot 10^3$   | $\Delta[\overline{W}_{\xi, \text{сум}}]$   | 1   |
| $\overline{W}_\eta, \overline{W}_\zeta$  | $24 \cdot \sin(\overline{\alpha} \cdot t + \Phi)$                    | $\sqrt{\overline{W}_\eta^2 + \overline{W}_\zeta^2} \cdot f_2 \cdot \Delta[\Delta\alpha] / ((t_k - t_n) \cdot K_k)$   | $1,2 \cdot 10^{-4}$   |
| $\overline{\omega}_\xi$  | $3,4 \cdot 10^2$   | $\Delta[\overline{\omega}_{\xi, \text{сум}}] \cdot \overline{g}_\xi / \overline{\alpha}$   | $4,4 \cdot 10^{-3}$   |
| $\overline{\omega}_\eta, \overline{\omega}_\zeta$  | $0,3 \cdot \sin(\overline{\alpha} \cdot t + \Phi)$                   | $\sqrt{\overline{\omega}_\eta^2 + \overline{\omega}_\zeta^2} \cdot f_2 \cdot \Delta[\Delta\alpha] / ((t_k - t_n) \cdot K_k \cdot \overline{\alpha})$   | $7,2 \cdot 10^{-8}$   |
|  | $0,3 \cdot \sin(\overline{\alpha} \cdot t + \Phi)$                   | $\frac{\sqrt{\overline{\omega}_\eta^2 + \overline{\omega}_\zeta^2} \cdot \sqrt{B^2 \cdot \overline{\alpha}^2 + f_1^2} \cdot \overline{g}_\xi \cdot \Delta[\Delta\alpha]}{\left( \sqrt{K_k^2 + H^2} \cdot \overline{\alpha}^2 \cdot (t_k - t_n) \cdot \overline{\alpha} \right)}$         | $3,3 \cdot 10^{-7}$   |
| $\overline{W}_\eta, \overline{W}_\zeta, \overline{\omega}_\eta, \overline{\omega}_\zeta$ | $0,04 \cdot \sin(2\overline{\alpha} \cdot t + \Phi)$                 | $\frac{\sqrt{\overline{\omega}_\eta^2 + \overline{\omega}_\zeta^2} \cdot \sqrt{\overline{W}_\eta^2 + \overline{W}_\zeta^2} \cdot H \cdot \Delta[\Delta\alpha]}{\left( 4 \cdot \sqrt{K_k^2 + H^2} \cdot (2 \cdot \overline{\alpha}^2) \cdot (t_k - t_n) \cdot \overline{\alpha} \right)}$ | $3,8 \cdot 10^{-9}$   |
| $\overline{W}_\eta, \overline{W}_\zeta, \overline{\omega}_\eta, \overline{\omega}_\zeta$ | 0,1  | $\frac{\sqrt{\overline{\omega}_\eta^2 + \overline{\omega}_\zeta^2} \cdot \sqrt{\overline{W}_\eta^2 + \overline{W}_\zeta^2} \cdot H}{\left( 2 \cdot \sqrt{K_k^2 + H^2} \cdot (\overline{\alpha}^2) \cdot (t_k - t_n) \cdot \overline{\alpha} \right)}$                                    | $3,2 \cdot 10^{-2}$   |
| $W_\eta, W_\zeta$  | $1,8 \cdot 10^{-3}$  | $\sqrt{W_\eta^2 + W_\zeta^2} \cdot f_2 \cdot \overline{\alpha} \cdot H^2 / ((t_k - t_n) \cdot K_k \cdot A \cdot B \cdot \omega_W^3)$   | $2,3 \cdot 10^{-3}$   |
| $W_\xi$  | $0,6 \cdot \sin(\omega_W \cdot t + \Phi)$                            | $W_\xi \cdot H^2 / ((t_k - t_n) \cdot A \cdot B \cdot \omega_W^3)$   | 0,1   |
| $W_\xi, W_\eta, W_\zeta$   | $3,4 \cdot \sin(\overline{\alpha} \cdot t + \Phi)$                   | $\frac{W_\xi \cdot \sqrt{W_\eta^2 + W_\zeta^2} \cdot \sqrt{2} \cdot H \cdot \Delta[\Delta\alpha]}{\left( 4 \cdot B \cdot \omega_W^2 \cdot \overline{g}_\xi \cdot (t_k - t_n) \right)}$   | $8,1 \cdot 10^{-6}$   |
| $\omega_\xi$   | 1,6  | $\omega_\xi \cdot \overline{g}_\xi / \overline{\alpha}$  | $1,4 \cdot 10^{-1}$   |
| <i>Інструментальні похибки гірографіметра</i>  |  |  |   |
| $\overline{\omega}_{\eta, \text{пл.дрф}}, \overline{\omega}_{\zeta, \text{пл.дрф}}$      | 0,5  | $\left\{ \sqrt{\overline{\omega}_{\eta, \text{пл.дрф}}^2 + \overline{\omega}_{\zeta, \text{пл.дрф}}^2} \cdot t_{\text{пол}} \right\}^2 \cdot \overline{g}_\xi / 2$   | $2,5 \cdot 10^{-1}$   |
| $\Delta\dot{\gamma}$   | $10; (\Delta\dot{\gamma} / \dot{\gamma} = 10^{-5})$                  | $\Delta\dot{\gamma} \cdot \overline{g}_\xi / \dot{\gamma}$   | $0,1; (\Delta\dot{\gamma} / \dot{\gamma} = 10^{-7})$                  |
| $\Delta[t_k - t_n]$  | $10; \left( \frac{\Delta[t_k - t_n]}{(t_k - t_n)} = 10^{-5} \right)$ | $\Delta[t_k - t_n] \cdot \overline{g}_\xi / (t_k - t_n)$   | $0,1; \left( \frac{\Delta[t_k - t_n]}{(t_k - t_n)} = 10^{-7} \right)$ |
| $\Delta L$ при зміні температури   | $1; \left( \frac{\Delta L}{L} = 10^{-6} \right)$                     | $\Delta L \cdot \overline{g}_\xi / L$  | $0,1; \left( \frac{\Delta L}{L} = 10^{-7} \right)$                    |
| $\Delta[\Delta\alpha]$   | 2,4  | $\Delta[\Delta\alpha] \cdot \overline{g}_\xi / ((t_k - t_n) \cdot \overline{\alpha})$  | $2,5 \cdot 10^{-1}$   |
| <i>Сума значень складових похибки:</i>   |  |  | 1,9 мГал  |
| <i>Корінь суми квадратів складових похибки:</i>  |  |  | 1,2 мГал  |

**6. Результати проведених експериментальних лабораторних досліджень роботи гірогравіметра.** Експериментували з гірогравіметром на основі лабораторного варіанта гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень. У ході експериментів різні значення маятниковостей задавались налаштуванням елементів гірогравіметра мікрометричним механізмом; значення частоти обертання ротора гіромотора змінювали перепрограмуванням блока керування гіромотором; зміну амплітуди і частоти вібраційних збурень забезпечували уставками 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 роботи гірогравіметра.

*Статичний режим.* Середньоквадратична похибка гірогравіметра утримувалась на рівні 0,12 мГал і не перевищувала 0,14 мГал (тут відсутня залишкова похибка навігаційної системи через відсутність потреби введення поправки за постійну складову вектора лінійного прискорення літака). Величина середньоквадратичної похибки гірогравіметра підтверджує те, що конструктивні параметри гірогравіметра обрані коректно і дозволяють досягти бажаної точності гірогравіметра в статичному режимі його роботи. У ході 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: "1,5·10<sup>-5</sup>".

*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. Підтверджено і те, що зменшенням кінетичного моменту гіромотора можливо 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: "1,5·10<sup>-4</sup>".

**7. 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.

*Представлено нові наукові результати:*

- розроблено 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 центра мас літака та врахуванням кутових вібрацій літака 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, в якій застосовано новий принцип одночасного доступу до елементів пам'яті системи.

*Практичне значення отриманих результатів:*

- розроблено принцип дії та алгоритм роботи АГС нового типу, в якій застосовано гірогравіметр з цифровою обробкою інформації;
- розроблено функціональну схему, принцип дії та алгоритм роботи системи автоматичного зняття та передачі сигналів гірогравіметра у БЦОМ;
- розроблено ефективні методи та рекомендації щодо зниження похибок гірогравіметра АГС;
- запропоновано уточнену методику аналітичного опису однороторних гіросистем з перехресними осями підвісу та зміщеним центром мас гіромотора, яка дозволяє врахувати динамічну зміну моментів інерції елементів гіросистеми в процесі її роботи;
- розроблено методики досліджень гірогравіметра за допомогою ЕОМ та лабораторних досліджень гірогравіметра;
- визначено основні метрологічні характеристики роботи гірогравіметра як наземного гравіметра та гравіметра АГС (відносна та приведена похибки, межа чутливості, діапазон перетворення, швидкодія, розрядність вихідного сигналу, клас точності).

Прикладне значення отриманих результатів у тому, що нова АГС з гірогравіметром, окрім фундаментальних досліджень в 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 похибки гірогравіметра від параметрів літакових збурень та конструктивних параметрів гірогравіметра та здійсненою числовою оцінкою зазначених аналітичних залежностей, яка склала 1,2...1,9 мГал, що в 1,5...3 разів нижче похибок існуючих гравіметрів АГС (3...6 мГал).

Достовірність отриманих теоретично результатів дослідження точності гірогравіметра підтверджена в ході моделювання на ЕОМ динаміки гірогравіметра 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 експериментального зразка гірогравіметра, під час яких похибка гірогравіметра утримувалась на рівні 0,23 мГал (тут відсутня складова приблизно в 1 мГал від неточності поправки за вертикальне прискорення).

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Безвесільна О.М.* Вимірювання гравітаційних прискорень: Підручник. – Ж.: ЖІТІ, 2002. – 264 с.
2. *Wei M., Schwarz K.P.* (1998). Flight test results from a strapdown airborne gravity system. *Journal of Geodesy*. – Vol. 72. – 323–332.
3. *Hannah J.*, (2001). Airborne gravimetry: a status report. Department of Surveying, University of Otago.
4. *Павловський М.А., Путята Т.В.* Теоретическая механика: Учебное пособие. – К.: Выща школа, 1985. – 328 с.
5. *Струтинський В.Б.* Тензорні математичні моделі процесів та систем: Підручник. – Житомир: ЖДТУ, 2005. – 635 с.
6. *Коваленко І.О., Коваль А.М.* Метрологія та вимірювальна техніка: Навчальний посібник. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 652 с.

**БЕЗВЕСІЛЬНА** Олена Миколаївна – Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор кафедри приладобудування Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– гравіметрія.

**ДОБРЖАНСЬКИЙ** Олександр Олексійович – аспірант кафедри автоматизації і комп’ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– гравіметричні прилади та системи.

Тел.: 8(0412)229195.

Подано 12.05.2008



**Безвесильная Е.Н., Добржанский А.А.** Исследование возможности применения гироскопического гравиметра в авиационной гравиметрической системе

**Безвесильная О.М., Добржанский О.О.** Дослідження можливості застосування гіроскопічного гравіметра в авіаційній гравіметричній системі

**Bezvesilna O.M., Dobrzhansky O.O.** Possibilities of Gyrogravimeter in Application to Airborne Gravimetric System

УДК 531.383

**Исследование возможности применения гироскопического гравиметра в авиационной гравиметрической системе / Е.Н. Безвесильная, А.А. Добржанский**

В статье представлены обобщенные результаты исследований эффективности функционирования нового типа гравиметра авиационной гравиметрической системы (АГС): гироскопического гравиметра на основе гироскопического интегратора линейных ускорений. Автором дано обоснование возможности применения гироскопического гравиметра в АГС, представлена математическая модель динамики функционирования гироскопического гравиметра в условиях присутствия возмущений, приведены аналитические оценки и оценки количественных значений погрешностей гироскопического гравиметра и методы их уменьшения, исследована проблема автоматического считывания и обработки сигналов гироскопического гравиметра, дано описание основных методов и результатов экспериментальных исследований эффективности функционирования гироскопического гравиметра.

УДК 531.383

**Possibilities of Gyrogravimeter in Application to Airborne Gravimetric System / O.M. Bezvesilna, O.O. Dobrzhansky**

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 reduction, the problem of gyrogravimeter automatic data reading and signal treatment, description of main experimental methods and results of gyrogravimeter functional effectiveness investigations.