УДК 621.317

[1]**О.М. Безвесільна,** д.т.н.
[2]**А.В. Коваль**
[1]**Є.В. Гура**

ДИНАМІЧНІ ПОХИБКИ НОВОГО ДВОГІРОСКОПНОГО ГРАВІМЕТРА

[1]Національний технічний університет України "КПІ"
[2]Житомирський державний технологічний університет

В статті розглянуто питання ефективності функціонування авіаційної гравіметричної системи в залежності від точності роботи її чутливого елемента – гравіметра. Досліджено динамічні похибки нового двогіроскопного гравіметра.

Постановка проблеми

Збурюючі впливи перехресних кутових швидкостей основи і кутової швидкості обертання Землі (тільки остання похибка становить 584 мГл) суттєво впливають на точнісні характеристики авіаційних гравіметрів. Відомо, що некомпенсована похибка акселерометра в 1 мГл при переміщенні за 1 год роботи дає похибку відстані 65 км.

Для високоточних вимірювань гравітаційного поля Землі, корекції інерціальних навігаційних систем по гравітаційному полю Землі та інших прецизійних задач аерокосмічної галузі наявність означених вище похибок неприпустима.

Тому проблема підвищення точності авіаційних гравіметричних вимірювань шляхом компенсації похибок від впливу перехресних кутових швидкостей основи і кутової швидкості обертання Землі (величина цих похибок значно більше 584 мГл) є актуальною.

Аналіз досліджень

Дослідженню авіаційних гравіметрів присвячено багато наукових праць [3–4]. Однак, в жодній з них не досліджено поведінку нового двогіроскопного гравіметра (ДГ) на основі гіроінтегратора лінійних прискорень (ГІЛП).

Основні переваги нового ДГ ГІЛП [1]:

1. Усунено похибки від перехресних кутових швидкостей основи і кутової швидкості обертання Землі (тільки остання становить 584мГл).

2. ДГ ГІЛП забезпечує вимірювання повного вектора прискорення сили ваги (а не одного компонента, як у разі кварцового ГАЛ–С або струнного ГС гравіметрів).

Мета роботи: дослідити динамічні похибки двогіроскопного гравіметра

Основна частина

Запишемо рівняння руху для одногіроскопного гравіметра (ОГ):

$$\begin{gathered} H\dot{\beta} + c_1'\dot{\alpha} + k_1\beta = -H(\omega_x + \omega_y\alpha) - A\dot{\omega}_z - M_{1T}sign\dot{\alpha}\,; \\ -H\dot{\alpha} + c_2'\dot{\alpha} - k_2\alpha = -mlg - mlw_z - ml(w_x\alpha - w_y)\beta - B(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y\alpha) + H\omega_z - H\omega_y\beta - M_{2T}sign\dot{\beta} \end{gathered} \tag{1}$$

Нехтуючи величинами другого порядку малості, моментами сил сухого тертя, вважаючи, що ОГ стабілізований по осях Ox, Oy, Oz, дістанемо рівняння динаміки приладу:

$$\begin{gathered} H\dot{\beta} + c_1'\dot{\alpha} + k_1\beta = -H\omega_x - H\omega_y\alpha\,; \\ -H\dot{\alpha} + c_2'\dot{\beta} - k_2\alpha = -mlg - mlw_z + mlw_y\beta - H\omega_y\beta + H\omega_z\,. \end{gathered} \tag{2}$$

Перейдемо до розгляду динамічних похибок ОГ.

Нехай основа системи піддається спільному впливу поступальних і кутових вібрацій по трьох осях з однаковою частотою ω.

Закон зміни лінійних прискорень центра мас об'єкта задамо у вигляді

$$w_z = w_a \sin\omega t\,; \quad w_y = w_b \sin(\omega t + \varepsilon_1); \quad w_z = w_c \sin(\omega t + \varepsilon_2), \tag{3}$$

де w_a, w_b, w_c – амплітуди; ε_1, ε_2 – зсув фаз проекцій поступальних вібрацій основи на осі опорної системи координат.

Задамо кути качки об'єкта: φ – никання, ψ – тангаж, θ – крен. Тоді відповідні проекції кутової швидкості качки на осі Ox, Oy, Oz

$$\omega_x = \dot\theta - \dot\varphi \sin\psi\,; \quad \omega_y = \dot\psi \cos\theta + \dot\varphi \cos\psi \sin\theta\,; \quad \omega_z = \dot\varphi \cos\psi \cos\theta + \dot\theta \sin\psi \cos\theta\,. \tag{4}$$

Оскільки кутові рухи літака стабілізуються за допомогою автопілота, то кути φ, ψ, θ малі; тому з точністю до складових першого порядку малості

$$\omega_x = \dot\theta\,; \quad \omega_y = \dot\psi\,; \quad \omega_z = \dot\varphi\,. \tag{5}$$

Закон зміни качки по відповідних осях:

$$\varphi = \varphi_0 \sin\omega t\,; \quad \psi = \psi_0 \sin(\omega t + \delta_1); \quad \theta = \theta_0 \sin(\omega t + \delta_2), \tag{6}$$

де φ_0, ψ_0, θ_0 – амплітуди; δ_1, δ_2 – зсув фаз кутових вібрацій основи.

Систему нелінійних диференціальних рівнянь (2) з періодичними коефіцієнтами розв’яжемо методом послідовних наближень (МПН).

З урахуванням виразу (2) запишемо рівняння (1) руху ОГ у першому наближенні:

$$\begin{gathered} H\dot\beta_1 + c_1'\dot\alpha_1 + k_1\beta_1 = -H\omega_x\,; \\ -H\dot\alpha_1 + c_2'\dot\beta_1 - k_2\alpha_1 = -mlw_z + H\omega_z - mlg\,. \end{gathered} \tag{7}$$

Розв'язуючи систему рівнянь (7) відносно α і β, вважаючи $H^2 >> c_1'c_2'$, дістанемо

$$\begin{gathered} H^2\ddot\alpha_1 + H(k_1+k_2)\dot\alpha_1 + k_1k_2\alpha_1 = Hm\dot w_z l + k_1 m w_z l + k_1 mgl - H^2\dot\omega_z - Hc_2'\dot\omega_x - k_1H\omega_z\,; \\ H^2\ddot\beta_1 + H(k_1+k_2)\dot\beta_1 + k_1k_2\beta_1 = -c_1' ml\dot w_z + c_1'H\dot\omega_z - H^2\dot\omega_x - H\omega_x k_2\,. \end{gathered} \tag{8}$$

Поділимо обидва рівняння цієї системи на H^2 і, підставивши в їх праві частини вирази (3), (5), (6):

$$\begin{gathered} \ddot\alpha_1 + 2n\dot\alpha_1 + \omega_0^2\alpha_1 = \omega H^{-1}(mlw_a - k_1\varphi_0)\cos\omega t + \left(H^{-2}mlk_1w_a + \omega^2\varphi_0\right)\sin\omega t + \\ + H^{-2}k_1mgl + H^{-1}c_2'\omega^2\theta_0 \sin(\omega t + \delta_2); \\ \ddot\beta_1 + 2n\dot\beta_1 + \omega_0^2\beta_1 = -H^{-2}c_1'ml\omega w_a \cos\omega t - H^{-1}c_1'\omega^2\varphi_0 \sin\omega t + \omega_0^2\theta_0 \sin(\omega t + \delta_2) - \\ - H^{-1}k_2\omega\theta_0 \cos(\omega t + \delta_2). \end{gathered} \tag{9}$$

Окремі розв’язки системи рівнянь (9) мають вигляд

$$\begin{gathered} \alpha_1 = A_0 + A_1\cos\omega t + A_2 \sin\omega t + A_3 \sin(\omega t + \delta_2) + A_4 \cos(\omega t + \delta_2); \\ \beta_1 = B_1\cos\omega t + B_2 \sin\omega t + B_3 \sin(\omega t + \delta_2) + B_4 \cos(\omega t + \delta_2). \end{gathered} \tag{10}$$

Підставивши вирази для α_1, $\dot\alpha_1$, $\ddot\alpha_1$, β_1, $\dot\beta_1$, $\ddot\beta_1$, у рівняння (10), прирівнявши коефіцієнти при однакових гармоніках, розв’язавши систему алгебраїчних рівнянь відносно A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4 дістанемо

$$\begin{gathered} A_0 = \frac{mgl}{k_2};\ A_1 = -\frac{H\omega(mlw_a + \varphi_0k_2)}{k_2^2 + H^2\omega^2};\ A_2 = \frac{mlw_ak_2 - \varphi_0H^2\omega^2}{k_2^2 + H^2\omega^2}; \\ A_3 = \frac{Hc_2'\omega^2\theta_0\left(k_1k_2 - H^2\omega^2\right)}{\left(k_1^2 + H^2\omega^2\right)\left(k_2^2 + H^2\omega^2\right)};\ A_4 = \frac{H^2(k_1+k_2)\omega^3c_2'\theta_0}{\left(k_1^2 + H^2\omega^2\right)\left(k_2^2 + H^2\omega^2\right)}; \end{gathered} \tag{11}$$

$$\begin{gathered} B_1 = \frac{-c_1'ml\omega w_a\left(k_1k_2 - H^2\omega^2\right) + c_1'\omega^3\varphi_0H^2(k_1+k_2)}{\left(k_1^2 + H^2\omega^2\right)\left(k_2^2 + H^2\omega^2\right)}; \\ B_2 = \frac{-c_1'H\omega^2\varphi_0\left(k_1k_2 - H^2\omega^2\right) - c_1'Hml\omega^2w_a(k_1+k_2)}{\left(k_1^2 + H^2\omega^2\right)\left(k_2^2 + H^2\omega^2\right)}; \\ B_3 = -\frac{k_1\omega H\theta_a}{k_1^2 + H^2\omega^2};\ B_4 = -\frac{\theta_0\omega^2H^2}{k_1^2 + H^2\omega^2}; \end{gathered} \tag{12}$$

Тоді рівняння першого наближення (10) з урахуванням виразів (11), (12) і з використанням формул складання і віднімання аргументів тригонометричних функцій

$$\begin{gathered} \alpha_1 = \frac{mgl}{k_2} + d\sin(\omega t - \sigma_1) + e\sin(\omega t + \delta_2 - \sigma_2); \\ \beta_1 = a\cos(\omega t + \sigma_3) - b\cos(\omega t + \delta_2 - \sigma_4), \end{gathered} \tag{13}$$

де $a = c_1'\omega\sqrt{\dfrac{w_a^2 m^2 l^2 + \varphi^2 H^2\omega^2}{\left(k_1^2 + H^2\omega^2\right)\left(k_2^2 + H^2\omega^2\right)}}$; $b = \dfrac{H\omega\theta_0}{\sqrt{k_1^2 + H^2\omega^2}}$; (14)

$$d = \frac{a}{c_1'\omega\sqrt{k_1^2 + H^2\omega^2}};\ e = \frac{c_2'\omega b}{\sqrt{k_1^2 + H^2\omega^2}}; \tag{15}$$

$$\sigma_1 = arctg\frac{H\omega\left(mlw_a + \varphi_0 k_2\right)}{mlw_a k_2 - \varphi_0 H^2\omega^2};\ \sigma_2 = arctg\frac{H\omega\left(k_1 + k_2\right)}{k_1 k_2 - H^2\omega^2}; \tag{16}$$

$$\sigma_3 = arctg\frac{H\omega\left[\varphi_0\left(k_1 k_2 - H^2\omega^2\right) + mlw_a\left(k_1 + k_2\right)\right]}{H^2\omega^2\varphi_0\left(k_1 + k_2\right) - mlw_a\left(k_1 k_2 - H^2\omega^2\right)};\ \sigma_4 = \frac{H\omega}{k_1}. \tag{17}$$

Запишемо рівняння другого наближення:

$$H\dot{\beta}_2 + c_1'\dot{\alpha}_2 + k_1\beta_2 = -H\omega_y\alpha_1;\quad -H\dot{\alpha}_2 + c_2'\dot{\beta}_2 - k_2\alpha_2 = mlw_y\beta_1 - H\omega_y\beta_1. \tag{18}$$

З урахуванням виразів (3), (5), (6) рівняння (18) набувають вигляду

$$\begin{gathered} H\dot{\beta}_2 + c_1'\dot{\alpha}_2 + k_1\beta_2 = -H\omega\psi_0\sin\left(\omega t + \delta_1\right)\alpha_1; \\ -H\dot{\alpha}_2 + c_2'\dot{\beta}_2 - k_2\alpha_2 = mlw_b\sin\left(\omega t + \varepsilon\right)\beta_1 - H\omega\psi_0\cos\left(\omega t + \delta_1\right)\beta_1. \end{gathered} \tag{19}$$

Підставивши у (19) вирази (13), здійснивши необхідні тригонометричні перетворення, знайдемо середні значення систематичних похибок за період коливання:

$$\left\langle\alpha_2\right\rangle = 0{,}5k_2^{-1}\left(f\left[a\cos\left(\delta_1 - \sigma_3\right) - b\cos\left(\delta_1 - \delta_2 + \sigma_4\right)\right] - h\left[a\sin\left(\varepsilon - \sigma_3\right) - b\sin\left(\varepsilon - \delta_2 + \sigma_4\right)\right]\right); \tag{20}$$

$$\left\langle\beta_2\right\rangle = 0{,}5k_1^{-1} f\left[d\sin\left(\sigma_1 + \delta_1\right) + e\sin\left(\delta_1 + \sigma_2 - \delta_2\right)\right]. \tag{21}$$

де $\langle\ \rangle$ – оператор усереднення; $f = H\omega\psi_0$; $h = mlw_b$ (22)

Скориставшись тригонометричними формулами складання і віднімання аргументів, здійснивши зведення подібних членів і застосувавши формули перетворення добутку тригонометричних функцій на суму, запишемо вирази (20), (21) у вигляді

$$\left\langle\alpha_2\right\rangle = 0{,}5k_2^{-1}\left[abfh\ \cos\left(\sigma_3 - \delta_2 + \sigma_4\right)\sin\left(\varepsilon - \delta_1\right)\right]^{0.5}\sin\left(\sigma_5 + \sigma_6\right); \tag{23}$$

$$\left\langle\beta_2\right\rangle = f\left(2k_2\right)^{-1}\left[2de\ \cos\left(\sigma_1 - \sigma_2 + \delta_2\right)\right]^{0.5}\sin\left(\delta_1 + \sigma_7\right), \tag{24}$$

де $\sigma_5 = arctg\dfrac{a\cos\sigma_3 - b\cos\left(\delta_2 - \sigma_4\right)}{a\sin\sigma_3 - b\sin\left(\delta_2 - \sigma_4\right)}$; (25)

$$\sigma_6 = arctg\frac{f\sin\delta_1 + b\cos\varepsilon}{f\cos\delta_1 - b\sin\varepsilon}; \tag{26}$$

$$\sigma_7 = arctg\frac{d\sin\sigma_1 + e\sin\left(\sigma_2 - \delta_2\right)}{d\cos\sigma_1 + e\cos\left(\sigma_2 - \delta_2\right)}. \tag{27}$$

Як випливає з формул (20), (21) або (23), (24), систематичні похибки ОГ в загальному випадку руху основи можна поділити на такі типи: внаслідок спільної дії поступальних і кутових вібрацій об'єкта; зумовлені тільки поступальними вібраціями об'єкта; внаслідок тільки кутових вібрацій об'єкта.

Розглядаючи поступальний і кутовий рухи об'єкта як незалежні, у подальшому дослідимо систематичні похибки гіроскопічного гравіметра, зумовлені лише поступальними і лише кутовими вібраціями об'єкта.

Систематичні похибки ОГ в разі поступальних вібрацій основи

Як випливає з рівняння (20) або (23) з урахуванням виразів (14) – (17), (22) – (27), систематичну похибку ОГ в разі поступальних вібрацій основи можна представити виразом

$$\left\langle\alpha\right\rangle_n = -0{,}5\left(ml\right)^2 w_a w_b c_1'\omega\frac{\sin\left(\varepsilon - \sigma_3\right)}{k_2\sqrt{\left(k_1^2 + H^2\omega^2\right)\left(k_2^2 + H^2\omega^2\right)}}, \tag{28}$$

де $\sigma_3 = arctg\left[-\dfrac{H\omega\left(k_1 + k_2\right)}{k_1 k_2 - H^2\omega^2}\right]$. (29)

Отже, стала складова ОГ в другому наближенні

$$\langle\alpha\rangle = \langle\alpha\rangle_0 + \langle\alpha\rangle_n = \frac{ml}{k_2}\left(g + w_e\right), \tag{30}$$

де $$w_e = -0{,}5mlw_a w_b c_1'\omega \frac{\sin(\varepsilon - \sigma_3)}{\sqrt{\left(k_1^2 + H^2\omega^2\right)\left(k_2^2 + H^2\omega^2\right)}} \tag{31}$$

– еквівалентне статичне вхідне прискорення, яке зумовлює відхилення гіроскопа на кут $\langle\alpha\rangle_n$.

Для оцінки можливої похибки приладу розглянемо такий приклад: $\omega = 100\ Гц$, $w_a = w_b = 3g$, $H = 2\cdot10^{-3}\ кг\cdot м\cdot с$, $m = 10^{-1}\ кг\cdot с/м$, $l = 10^{-2}\ м$, $c_1' = 5\cdot10^{-5}\ кг\cdot м\cdot с$, $k_1 = k_2 = 5\cdot10^{-3}\ кг\cdot м$.

Маємо: $\langle\alpha\rangle_0 = 0.2\ рад$, $\langle\alpha\rangle_n = 5.4\cdot10^{-6}\ рад$, $w_e = 2.7\cdot10^{-5}g$, що на два порядки менше за систематичну похибку маятникового акселерометра типу ГІЛП, обчислену для аналогічних параметрів вібрації. Відносна систематична похибка

$$\delta_{\langle\alpha\rangle_n} = \frac{\langle\alpha\rangle_n}{\langle\alpha\rangle_0}\cdot100\% = 2.7\cdot10^{-3}\ \%. \tag{32}$$

Як видно з формули (28), систематична похибка $\langle\alpha\rangle_n$ в разі поступальних вібрацій основи прямо пропорційна квадрату маятниковості приладу, амплітудам збурень по нормальній і поперечній осях об’єкта, значенню сил в’язкого тертя c_1' по осі зовнішньої рамки гіроскопа. Зі збільшенням кінетичного моменту H гіроскопа і коефіцієнтів k_1, k_2 похибка зменшується; зростання частоти вібрації ω зменшує $\langle\alpha\rangle_n$.

Систематичні похибки ОГ в разі кутових вібрацій основи

Систематичну похибку ОГ в разі тривісної синхронної регулярної качки основи можна знайти з виразу (20) або (23):

$$\langle\alpha\rangle_к = \frac{0.5H^2\omega^3\psi_0\varphi_0 c_1'}{k_2\sqrt{\left(k_1^2 + H^2\omega^2\right)\left(k_2^2 + H^2\omega^2\right)}}\cos(\delta_1 - \sigma_3) - \frac{0.5H^2\omega^2\psi_0\theta_0}{k_2\sqrt{k_1^2 + H^2\omega^2}}\cos(\delta_1 - \delta_2 + \sigma_4), \tag{33}$$

де $\sigma_3 = arctg\,\dfrac{k_1k_2 - H^2\omega^2}{H\omega(k_1 + k_2)}$; $\sigma_4 = \dfrac{H\omega}{k_1}$.

Якщо $\delta_1 = \delta_2 = 0$, то $$\langle\alpha\rangle_к = \frac{0.5H^2\omega^2\psi_0}{k_2\sqrt{k_1^2 + H^2\omega^2}}\left(\frac{\omega c_1'\varphi_0}{\sqrt{k_2^2 + H^2\omega^2}}\cos\sigma_3 - \theta_0\cos\sigma_4\right). \tag{34}$$

З формули (34) видно, що систематична похибка ОГ, зумовлена кутовими вібраціями основи, прямо пропорційна амплітудам збурень і коефіцієнту сил в’язкого тертя по осі зовнішньої рамки приладу. Зі збільшенням моментів k_1, k_2 $\langle\alpha\rangle_к$ зменшується. І, навпаки, зі зростанням частоти збурення ω, кінетичного моменту H приладу систематична похибка зростає.

Наприклад, за формулою (34) оцінимо можливу систематичну похибку ОГ, спричинену качкою основи для параметрів: $H = 2\cdot10^{-3}\ кг\cdot м\cdot с$, $\omega = 2\cdot10^{-2}\ Гц$, $c_1' = 5\cdot10^{-5}\ кг\cdot м\cdot с$, $k_1 = k_2 = 5\cdot10^{-3}\ кг\cdot м$, $\varphi_0 = 65'\left(18.9\cdot10^{-3}\ рад\right)$, $\psi_0 = 34'\left(9.9\cdot10^{-3}\ рад\right)$, $\theta_0 = 147'\left(43\cdot10^{-3}\ рад\right)$. У цьому випадку $\langle\alpha\rangle_к = 1.36\cdot10^{-8}\ рад$, $\delta_{\langle\alpha\rangle_к} = 0.68\cdot10^{-5}\ \%$, тобто дуже малі.

Дослідимо похибки двогіроскопного гравіметра

Вище було показано, що одногіроскопний гравіметр має малі систематичні похибки при поступальних $\langle\alpha\rangle_n$ і кутових $\langle\alpha\rangle_к$ вібраціях основи.

Водночас недоліком ОГ є наявність похибок, спричинених перехресними кутовими швидкостями основи і кутовою швидкістю обертання Землі. Тому було запропоновано ДГ [2], що дає змогу підвищити точність вимірювань за рахунок усунення цих похибок.

Сформуємо сигнали, пропорційні сумі кутів повороту двох гіроскопів. Для цього використаємо два однакових гіроскопи з протилежно спрямованими векторами кінетичних моментів. Сигнали двох гіроскопів мають вигляд відповідно:

$$\alpha_{1уст} = k_2^{-1}\left[-mlg_z + mlw_z - ml\left(w_x\alpha - w_y\right)\beta - B\left(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y\alpha\right) - H\omega_y\beta - H\omega_3 \sin\varphi\right],$$

$$\alpha_{2уст} = k_2^{-1}\left[-mlg_z + mlw_z - ml\left(w_x\alpha - w_y\right)\beta - B\left(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y\alpha\right) + H\omega_y\beta + H\omega_3 \sin\varphi\right];$$

$$\beta_{1уст} = k_1^{-1}\left[-mlg_x + mlw_x - H\left(w_x + w_y\alpha\right)\beta - A\dot{\omega}_z - H\omega_3 \cos\varphi\right],$$

$$\beta_{2уст} = k_1^{-1}\left[-mlg_x + mlw_x + H\left(w_x + w_y\alpha\right) - A\dot{\omega}_z + H\omega_3 \cos\varphi\right].$$

Отримаємо вихідні сигнали ДГ:

$$u_1 = \alpha_{1уст} + \alpha_{2уст} = k_2^{-1}\left[-2mlg_z + 2mlw_z - 2ml\left(w_x\alpha - w_y\right)\beta - 2B\left(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y\alpha\right)\right]; \quad (35)$$

$$u_2 = \beta_{1уст} + \beta_{2уст} = k_1^{-1}\left[-2mlg_x + 2mlw_x - 2A\dot{\omega}_z\right]. \quad (36)$$

З виразів (37) і (38) вихідних сигналів АГС видно:

- складові корисного сигналу $-2mlg_z, -2mlg_x$ подвоюються;
- двогіроскопний гравіметр АГС може вимірювати підсумковий напрямок і модуль прискорення сили ваги за формулами $\vec{g} = \vec{g}_z + \vec{g}_x$, $|g| = \sqrt{g_z^2 + g_x^2}$, що забезпечує вищу точність вимірювань і виставлення ДГ АГС. Для цього вихідні сигнали $u_1 \equiv 2g_z$ і $u_2 \equiv 2g_x$ (вирази (35) і (36)) ДГ використовують для керування двома додатковими двигунами додатково введеної платформи, на якій встановлюють основний і додатковий гіроскопи;
- деякі моменти–перешкоди внаслідок перехресних лінійних і кутових прискорень подвоюються $\left[2mlw_z - 2ml\left(w_x\alpha - w_y\right)\beta - 2B\left(\dot{\omega}_x + \dot{\omega}_y\alpha\right);\ 2mlw_x - 2A\dot{\omega}_z\right]$. Тут можна враховувати тільки вплив моментів $-2mlw_z, -2mlw_x$. Тому можна вважати, що $u_1 \cong k_2^{-1}\left(-2mlg_z + 2mlw_z\right),\ u_2 \cong k_1^{-1}\left(-2mlg_x + 2mlw_x\right)$.

Зауважимо, що вказані вище моменти–перешкоди (в сумі з моментами–перешкодами, вплив яких у ДГ виключається) впливають рівною мірою і на роботу ОГ АГС.

- усуваються похибки, спричинені гіроскопічними моментами–перешкодами від перехресних кутових швидкостей $\left[H\omega_y\beta,\ H\left(\omega_x + \omega_y\alpha\right)\right]$ і від кутової швидкості обертання Землі $\left(H\omega_3 \sin\varphi,\ H\omega_3 \cos\varphi\right)$, які можуть бути значними (а саме, останні – 584 мГл).

З урахуванням того, що вихідні сигнали ДГ складаються, то і систематичні похибки зумовлені поступальними та кутовими вібраціями основи теж будуть складатися, а отже похибки збільшаться.

Висновки

1. Застосування двогіроскопних гравіметрів порівняно з одногіроскопними гравіметрами забезпечує підвищення точності вимірювань (усунення похибок унаслідок гіроскопічних моментів-перешкод від перехресних кутових швидкостей і від кутової швидкості обертання Землі), вимірювання повного вектора прискорення сили ваги, підвищення точності виставлення, розширення функціональних можливостей приладу (поряд із складовими лінійного прискорення прилад вимірює складові кутової швидкості).
2. Систематичні похибки спричинені поступальними та кутовими вібраціями основи збільшуються.

Список літературних джерел

1. Безвесільна О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – 604с.
2. Безвесільна О.М., Коваль А.В. Авіаційна гравіметрична система для вимірювання аномалій прискорення сили ваги з двогіроскопним гравіметром. / Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир, 2009. – Вип. № 4(51).
3. Lawrence A. Modern Inertial Technology Navigation, Guidance, and Control Second Edition – New York Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. – 279p.
4. Bekir Esmat Introduction toModern Navigation Systems – Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007. – 255p.