

І.В. Коробійчук, к.т.н., доц.
Я.О. Пісківець, здобувач

Житомирський державний технологічний університет

ДИНАМІЧНИЙ МОДЕЛЮЮЧИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ДВОКІЛЬЦЕВОГО ДИНАМІЧНО НАСТРОЮВАНОГО ГРАВІМЕТРА

В роботі розроблено та надано опис динамічних моделюючих стендів, які працюють у складі динамічного моделюючого комплексу та викладено принцип дії такого комплексу. Розроблено та описано методику випробувань динамічних настроюваних гравіметрів на динамічному моделюючому комплексі, що дає можливість оцінити похибки та точність двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра.

Постановка проблеми. Авіаційна гравіметрична система (АГС) дозволяє здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі набагато швидше та з меншими витратами, ніж за допомогою наземних або морських засобів. Чутливим елементом АГС є гравіметр, тому точність вимірювання аномалій гравітаційного поля за допомогою АГС залежить від точності гравіметра. Для визначення точнісних характеристик гравіметра необхідно провести випробування гравіметра за умов, близьких до натуральних. Для моделювання збурюючих впливів на основі зазвичай застосовується дослідний стенд типу "Скорсбі", що являє собою просторовий механізм із привідним двигуном постійної швидкості [1]. Однак стенд "Скорсбі" має ряд характерних недоліків, що не дозволяють використати його для якісних експериментальних досліджень динамічної точності й відходів двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра (ДГ) на рухомій основі. Ці недоліки зводяться до таких:

- відсутність слідкуючих привода, для керування віссю, що передає вплив на площадку з ДГ;
- відтворення хитавиці, близької до гармонійної, лише у вузькому діапазоні частот й амплітуд;
- наявність паразитної постійної складової кутової швидкості, що досягає великих значень;
- виникнення ударів і вібрацій, що супроводжують передачу моментів до площадки із ДГ від привода постійної швидкості через наявність люфтів у кулісному механізмі, що спотворюють досліджувані процеси.

Тому актуальним є розробка динамічного моделюючого комплексу, в складі якого працюють динамічні моделюючі стенди, в яких відсутні згадані вище недоліки. Це дозволить проводити випробування двокільцевих динамічно настроюваних гравіметрів та визначати його точнісні характеристики.

Аналіз досліджень. В роботах [2] Безвесільної О.М. досліджено можливість і доцільність використання як гравіметра АГС гіроскопічного вимірювача прискорень. Похибка вимірювання Δg АГС на базі гірогравіметра була 8 мГл [2]. В роботах Безвесільної О.М. і Литвиненко П.Л. обґрунтовано доцільність використання як гравіметра АГС однокільцевого динамічно настроюваного гіроскопа (ДНГ), похибка вимірювання Δg АГС була 5 мГл.

Що ж стосується випробувань двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра на динамічному моделюючому комплексі, то у відомій автору літературі [2–6 та ін.] таких завдань не вирішувалось.

Метою роботи є розробка динамічного моделюючого комплексу для випробувань двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра та методики випробувань.

Основна частина. Найбільш характерними при випробуванні ДГ є впливи, що збурюють: 1) довільні детерміновані й випадкові впливи, у тому числі вібрації, що мають місце в приладовому відсіку рухомого об'єкта; 2) гармонійна хитавиця основи в широкому діапазоні частот й амплітуд; 3) збурювання, що викликають малі кутові швидкості, які мають порядок кутової швидкості обертання Землі $\omega_{\min} \leq 10^{-1}$ рад/с.

Використані у роботі динамічні моделюючі стенди (ДМС) ДМС I, ДМС II не мають зазначених недоліків та забезпечують якісне відтворення необхідних впливів, що збурюють, ДСМ I являє собою платформу в кардановому підвісі з горизонтальною зовнішньою віссю. Кінематичну схему ДМС I наведено на рис. 1.

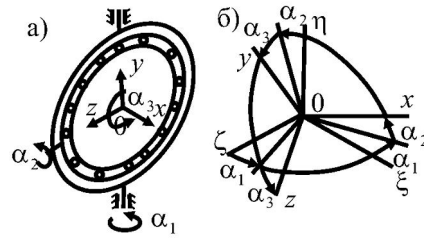


Рис. 1. Кінематична схема

Триступеневий ДМС у деяких випадках може бути замінений стендом ДМС II. Розглянемо кінематичну схему цього стенда (рис. 2, а). ДМС II має одну вісь А, керовану силовим приводом, що стежить, і три осі Б, В, Г фіксованих розворотів площадки ДМС, проектується складові вектора кутової швидкості осі А. При відповідних фіксованих розворотах навколо осей Б, В, Г ДМС забезпечує відтворення одного, двох або трьох координатних кутових рухів площадки із ДГ.

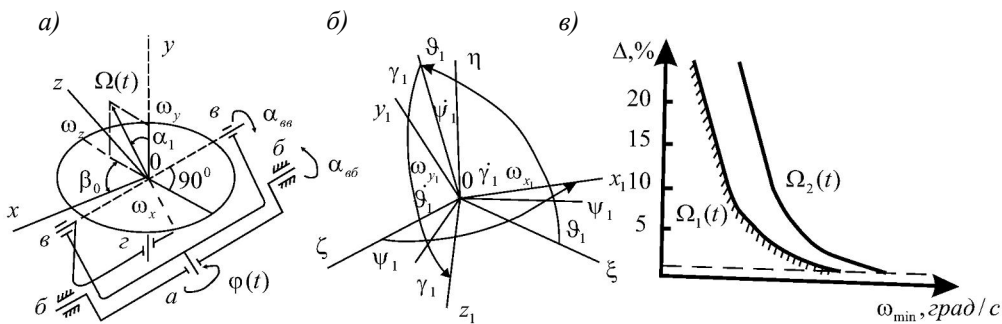


Рис. 2. Кінематична схема і похибки ДМС II

Важливою перевагою ДМС II є можливість відтворення малих швидкостей, які менше кутової швидкості обертання Землі. Слідкуючий привід розвертає динамічну частину ДМС навколо осі А на $\varphi(t)$ кут. Попередньо динамічна частина встановлюється у фіксоване положення шляхом ручного розвороту навколо осі Б на кут α_{BB} , відрахований від осі А. Вісь Г перпендикулярна до площини площадки, що розвертається навколо цієї осі на фіксований кут β_0 . Осі А, В, Г перетинаються в точці 0, що збігається із центром підвісу платформи.

Виконаємо фіксовані розвороти: динамічної частини ДМС – на кут a_{OB} платформи із ДГ на кут a_{BB} . При цьому напрямок осей Ox_1, y_1, z_1 , пов'язаних із платформою, виберемо в такий спосіб: вісь Oy_1 перпендикулярна площині платформи; вісь Ox_1 лежить у площині платформи й становить кут β_0 з прямою ОР; вісь Oz_1 становить із осями Oy_1 й Ox_1 праву ортогональну систему координат.

Подамо на вхід привода, що стежить, вплив таким чином, щоб рух керованої осі А стенда відбувався за необхідним законом $f(t)$:

$$\dot{\varphi}(t) = \Omega(t) = Sf(t),$$

де S – коефіцієнт передачі.

Тоді на осі Ox_1, Oy_1, Oz_1 , пов'язані з платформою, будуть проектуватися кутові швидкості $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)$, рівні складовим вектора кутової швидкості $\Omega(t)$ керованої осі А:

$$\begin{aligned} \omega_{x_1}(t) &= \Omega \sin a_{BB} \cos \beta_0; \omega_{y_1}(t) = \Omega(t) \cos a_{BB}; \\ \omega_{z_1}(t) &= \Omega(t) \sin a_{BB} \sin \beta_0. \end{aligned} \tag{1}$$

Для визначення значень кутів a_{BB}, β_0 і закону зміни $\Omega(t)$ необхідно задати кутові швидкості в системі координат основи ДГ OXYZ.

$$\omega_x(t) = K_1 f(t); \omega_y(t) = K_2 f(t); \omega_z(t) = K_3 f(t), \tag{2}$$

де K_1, K_2, K_3 – коефіцієнти передачі.

Тоді, припустивши, що

$$\omega_x(t) = \omega_{x_1}(t); \omega_y(t) = \omega_{y_1}(t); \omega_z(t) = \omega_{z_1}(t) \quad (3)$$

і підставивши у вираз (3) відповідні значення кутових швидкостей з виражень (1), (2), одержимо:

$$\beta_0 = \arctg \frac{K_3}{K_1}; a_{BB} = \arctg - \frac{K_3}{K_2 \sin \beta_0}; \Omega(t) = \frac{K_2}{\cos a_{BB}} f(t); \frac{K_2}{\cos a_{BB}} = S_0. \quad (4)$$

Для відтворення кутових швидкостей $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)$, зміщених по фазі відносно один одного на кут 180° , потрібно мати такі діапазони зміни кутів a_{BB}, β_0 :

$$0^\circ \leq a_{BB(об)} \leq 90^\circ; 0^\circ \leq \beta_0, 360^\circ.$$

Як видно із співвідношень (3) і (4), ДМС II дозволяє здійснити моделювання кутових рухів основи ДГ, синфазних або зміщених по фазі на кут 180° , одночасно щодо трьох осей, або будь-яких двох осей, або будь-якої однієї осі системи координат Ox_1, Y_1Z_1 , пов'язаної із площадкою ДМС. Кутові рухи ДМС II щодо двох осей й однієї осі виходять із (1) як окремі випадки при виставці відповідних значень кутів a_{BB} і β_0 , певних ПФ формула VB (4).

Розглянемо випадок, коли кутовий рух основи ДГ задано в системі координат $O\xi\eta\zeta$, причому кутові швидкості $\psi_1(t), \vartheta_1(t), \gamma_1(t)$ змінюються за загальним законом $f(t)$.

Кінематичні залежності між кутовими швидкостями $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)$, заданими в системі координат основи ДГ, і кутовими швидкостями $\psi_1(t), \vartheta_1(t), \gamma_1(t)$ визначаються ПФ відомим рівнянням:

$$\omega_{x_1} = \dot{\gamma}_1 - \vartheta_1 \sin \psi; \omega_{y_1} = \dot{\psi}_1 \cos \gamma_1 + \vartheta_1 \cos \psi \sin \gamma; \omega_{z_1} = \dot{\vartheta}_1 \cos \gamma - \dot{\psi}_1. \quad (5)$$

При малих значеннях кутів ψ_1 і γ_1 з рівнянь (5) одержуємо:

$$\omega_{x_1} = \dot{\gamma}_1; \omega_{y_1} = \dot{\psi}_1; \omega_{z_1} = \dot{\vartheta}_1. \quad (6)$$

З урахуванням співвідношень (3) і (6) для кутових швидкостей платформи ДМС II маємо:

$$\omega_{x_1} \approx \dot{\gamma}; \omega_{y_1} \approx \dot{\psi}; \omega_{z_1} \approx \dot{\vartheta}. \quad (7)$$

Вирази (6) і (7) правдиві для будь-якої зміни кута ϑ .

При змінній послідовності поворотів по ϑ_1 і γ_1 співвідношення (5) зміняться на такі:

$$\begin{aligned} \omega_x^* &= \dot{\gamma}_1 + \dot{\psi}_1^* \sin \vartheta_1^*; \omega_y^* = \dot{\psi}_1^* \cos \vartheta_1^* + \dot{\gamma}_1^* + \\ &+ \dot{\vartheta}_1^* \sin \gamma_1^*; \omega_z^* = \dot{\vartheta}_1^* \cos \gamma_1^* - \dot{\psi}_1^* \cos \vartheta_1^* \sin \gamma_1^*. \end{aligned} \quad (8)$$

При малих значеннях кутів ϑ і γ^* зі співвідношень (8) і (4) одержуємо:

$$\omega_{x_1} \approx \dot{\gamma}_1^*; \omega_{y_1} \approx \dot{\psi}_1^*; \omega_{z_1} \approx \dot{\vartheta}_1^*. \quad (9)$$

Ці вирази правдиві для будь-якої зміни кута ψ_1^* .

Оцінимо можливість використання ДМС для відтворення малих кутових швидкостей.

Оскільки мінімальна стала кутова швидкість привода, що стежить, керованої осі $\Omega_{\min}(t)$ ДМС є обмеженою, то, як видно з виразу (5), завдяки відповідній виставці кутів a_{BB} і β_0 по зазначених осях ДМС можуть бути отримані стійкі малі швидкості, які на кілька порядків менше, ніж $\Omega_{\min}(t)$. При цьому по одній з осей буде діяти кутова швидкість, близька $\Omega_{\min}(t)$, а по двох інших осях або по одній осі (в цьому випадку швидкість третьої осі дорівнює нулю) – малі кутові швидкості, нижня межа яких залежить від можливості виставки кутів a_{BB} й β_0 . Так, при $a_{BB} = \beta_0 = 6$ кут. хв. одержимо:

$$\omega_{x_1 \min}(t) \approx 1.7 \cdot 10^{-3} \Omega_{\min}(t); \omega_{y_1 \min}(t) \approx \Omega_{\min}(t); \omega_{z_1 \min}(t) \approx 2.9 \cdot 10^{-6} \Omega_{\min}(t). \quad (10)$$

Зі схеми на рис. 2, а видно, що точність відтворення малих кутових швидкостей конкретних ДМС буде залежати від таких основних інструментальних похибок: 1) неперпендикулярності осей ДМС – відповідно А и В, Г и В; 2) непаралельності осей Г и А у вихідному положенні ДМС; 3) неточності відтворення кутової швидкості $\Omega(t)$; 4) похибки установки кутів a_{BB} і β_0 .

Із співвідношень (2) і (5) знайдемо абсолютну й відносну похибки відтворення, наприклад кутової швидкості $\omega_z(t)$:

$$\Delta\omega_z(t) = \frac{\partial\omega_z(t)}{\partial\Omega(t)}\Delta\Omega(t) + \frac{\partial\omega_z(t)}{\partial a_{BB}}\Delta a_{BB} + \frac{\partial\omega_z(t)}{\partial\beta_0}\Delta\beta_0;$$

$$\delta\omega_z(t) = \frac{|\partial\omega_z(t)|}{|\omega_z(t)|} \cdot 100\%.$$
(11)

Для розробленої конструкції ДМС складові похибки параметрів, що входять в формулу (5), будуть

$$\Delta a_{BB} \approx 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ рад}; \Delta\beta_0 \approx 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ рад}; \Delta\Omega(t) \approx 0,01\Omega(t).$$

За розрахованим значенням $\delta\omega_z$ і $\omega_z(t)$ на рис. 2, в побудована частина графіка $\delta\omega_z(t) = f[\omega_z(t)]$, що відповідає кутовим швидкостям $\Omega(t)$:

$$\Omega_1(t) = 0,12 \text{ рад/с}; \Omega_2(t) = 1,2 \text{ рад/с}.$$

Як видно з рис. 2, в, залежності $\delta\omega_z(t) = f[\omega_z(t)]$ для діапазону кутових швидкостей $\Omega(t) > \Omega_1$ лежать праворуч від заштрихованої області та зі збільшенням значень $\omega_z(t)\delta\omega_z$ асимптотично прагнуть до нуля.

Крім основної переваги ДМС II як задатчика малих кутових швидкостей, є й інші його переваги порівняно з ДМС I: 1) менший момент обертової осі; 2) наявність одного привода, що стежить, при цьому потужність, габаритні розміри й маси виконавчого пристрою привода, що стежить, не обмежуються, тому що він установлюється на нерухому в динаміці частину ДМС II.

До обмеження ДМС II ставиться відтворення кутових рухів, що змінюються тільки за однаковими законами й, крім того, синфазних або зрушених по фазі на 180° .

Методика випробувань ДГ на динамічному моделюючому комплексі (ДМК). Випробування ДГ виконувалось методом напівнатурного моделювання на ДМК, при цьому розглядається визначення динамічних і статистичних характеристик ДГ при відтворенні на ДМК тільки кутового руху основи за заданими детермінованими і випадковими законами.

На рис. 3 зображено структурну схему пристроїв ДМК, застосовуваних при випробуваннях ДГ. Опишемо цю схему. Корпус 1 тріступеневого ДМС, тобто ДМС I, встановлюється на горизонтальну опорну плиту 13 таким чином, щоб горизонтальна вісь 2 зовнішнього кільця 11 ДМС була перпендикулярна до площини меридіана. Вихідне положення зовнішнього кільця 11 вибирається таким, щоб вісь 7 проміжного кільця 10 ДМС розташувати горизонтально, а положенням проміжного кільця 10 забезпечити горизонтальність внутрішнього кільця 9. Вісь обертання 5 внутрішнього кільця 9 при цьому орієнтується вертикально. На внутрішньому кільці 9 за допомогою перехідного пристрою 12 встановлюється випробуваний ДГ 4. Взаємне розташування осей ДГ стосовно осей ДМС вибирається залежно від кінематичної схеми ДГ.

Сигнали з командних датчиків випробуваного ДГ по кожній його осі надходять в УСО, а саме на кінець перетворювачів сигналів 27, які з'єднуються із входами операційних підсилювачів 20. Підсилювачі 20 передають сигнали на блоки 15, 22, 23, які здійснюють фільтрацію й додавання сигналів, що надходять із ДГ і задатчика збурювань $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$, що формує на входах слідкуючих приводів, 3 ДМС збурючі впливи від об'єкта. Останні відтворюються за допомогою математичного моделювання на АЦК. Виходи підсилювачів 13 з'єднуються з перетворювачами 11, 14, через які інформація надходить на АЦП і ДГ для обробки, запам'ятовування й виготовлення проектних документів.

Процес випробування ДГ на ДМК зводиться до наступного. На входи підсилювачів 20 з ІВС задаються збурючі впливи, моделюючий кутовий рух незалежно по кожній осі $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$. Сигнали з виходів підсилювача 22 подаються на входи відповідних слідкуючих приводів 3 ДМС. Слідкуючі приводи 3 надають рух кардановому кільцю 11, 10, 9, по осях 2, 7, 5, незалежно по кожній. Виникає "механічне збурення" ДГ від ДМС через звичайні зв'язки ДГ із зовнішнім середовищем, тертя в карданових підвісах платформи ДГ. Сигнали, що знімаються з ДГ і ДМС, оброблюються і аналізуються ІВС.

Для реалізації алгоритмів комбінації складових кутової швидкості Землі в ІВС ДМК використовують операційні підсилювачі 24, 26, 25 блоки добутку (БП) 27, 18, 16 і синусно-косинусні перетворювачі 6 і 8.

У загальному випадку формуючі пристрої 22, крім підсумовування сигналів, роблять також і перетворення координат. Для прийнятої кінематичної схеми ДГ перетворення координат не потрібно, тому пристрої 22 виконують тільки роль підсумовуючих підсилювачів. Сигнал, пропорційний відходам ДГ, можна одержати з фільтрів 23.

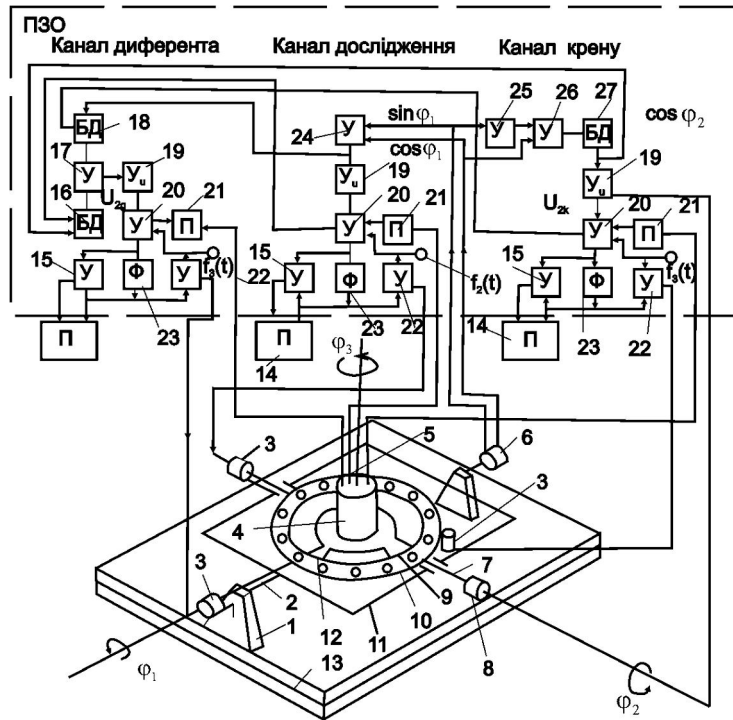


Рис. 3. Структурна схема динамічного моделюючого комплексу:
 1 – корпус; 2 – горизонтальна вісь; 3 – слідуючий привід; 4 – ДГ; 5 – вісь;
 6, 8 – синусно-осинусні перетворювачі; 7 – вісь проміжного кільця; 9 – внутрішнє кільце;
 10 – проміжне кільце; 11 – зовнішнє кільце; 12 – перехідний пристрій; 13 – опорна плита;
 14 – перетворювач; 15, 19, 22 – підсилювачі; 16, 18, 27 – блоки добутки;
 17, 20, 24, 25, 26 – операційні підсилювачі; 21 – перетворювач сигналів; 23 – фільтр сигналу

Сигнал, пропорційний сумарній динамічній помилці ДГ, отримуємо на виходах підсилювачів 15.

У результаті випробувань ДГ за описаною методикою визначалися такі його характеристики: амплітудні й фазові частотні характеристики ДГ як датчики кутового положення об'єкта, відходи ДГ на основі, що рухається, що обурюють і стабілізують моменти ДГ тощо.

На рис. 4 наведено якісні оцінки кутів як функцій часу, знятих з датчика кута зовнішньої осі ДГ $\varphi_{ДГ}$ при впливі гармонійної й випадкової хитавиці по зовнішній осі ДМС φ_c .

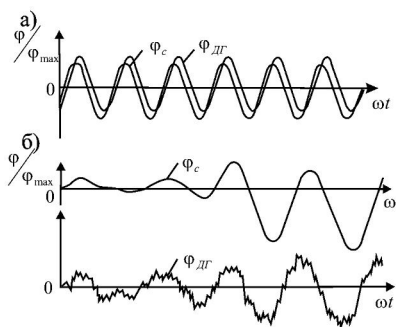


Рис. 4. Реалізації процесів при випробуваннях ДГ

Збурюючі впливи задавалися у вигляді гармонійної хитавиці $\varphi_{BX} = \varphi_{BX0} \sin 2\pi ft$ з частотами $f = 0,01 - 1$ Гц постійних кутових швидкостей і прискорень $\Omega_{BX}(t) = \pm 6,4$ град./с; $e_{BX}(t) = \pm 4$; град./с² з, а також у вигляді випадкової хитавиці з автокореляційної функції виду:

$$R_{c_{BX}} = \sigma_{BX}^2 e^{-\alpha|\tau|} (\cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau|),$$

де $\sigma_{BX} = 0,5$ град.; $\omega_0 = 6,28$ рад./с; $\alpha = 1$ рад./с.

Інформація, одержувана при випробуваннях ДГ, оброблялась за допомогою ЦОМ.

Висновки: Розроблений динамічний малюючий комплекс усуває такі недоліки, які були у розроблених раніше динамічних моделюючих стендах, як: відсутність слідкуючих привода, для керування віссю, що передає вплив на площадку з двокільцевим динамічно настроюваним гравіметром; відтворення хитамиці, близької до гармонійної, лише у вузькому діапазоні частот й амплітуд; наявність паразитної постійної складової кутової швидкості, що досягає великих значень; виникнення ударів і вібрацій, що супроводжують передачу моментів до площадки із ДГ від привода постійної швидкості через наявність люфтів у колісному механізмі, що спотворюють досліджувані процеси.

Розроблена методика випробувань двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра за допомогою динамічного моделюючого комплексу дозволяє відтворювати умови роботи близькі до натуральних, досліджувати вплив збурень на точність роботи двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра.

В подальшому доцільно дослідити точнісні характеристики двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра за допомогою динамічного моделюючого комплексу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Пельпор Д.С.* Гироскопические системы: Теория гироскопов и гироскопических стабилизаторов. – М.: Высш. шк., 1986. – 388 с.
2. *Безвесільна О.М.* Вимірювання прискорень: Підручник. – Київ: Либідь, 2001. – 264.
3. *Лозинская А.М.* Измерение силы тяжести на борту самолета. – М.: ВИЗМС, 1978. – 70 с.
4. *Попов Е.И.* Определение силы тяжести на подвижном основании. – М.: Наука, 1987. – 218 с.
5. *Одинцов А.А.* Динамически настраиваемые гироскопы. – К.: НМК ВО, 1992. – 68 с.
6. *Павловский М.А.* Теория гироскопов. – К.: Выща шк., 1986. – 303 с.

КОРОБІЙЧУК Ігор Вацлавович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації і комп'ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гравіметрія;
- гравіметричні системи.

ПІСКІВЕЦЬ Яна Олександрівна – здобувач кафедри автоматизації і комп'ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гравіметричні системи.

Подано 25.06.2008

Коробійчук І.В., Пісківець Я.О. Динамічний моделюючий комплекс для випробувань двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра.

Коробійчук И.В., Пискивец Я.О. Динамический моделюющий комплекс для испытаний двухколечного динамически настраиваемого гравиметра

Korobijchuk I.V., Piskivets Y.O. Dynamic design complex for the tests of double-ring the dinamically adjusted gravimeter

УДК 531.383

Динамический моделюющий комплекс для испытаний двухколечного динамически настраиваемого гравиметра / И.В. Коробийчук, Я.О. Пискивец

В работе разработано динамический моделируемый комплекс, который позволяет выполнять испытания двухколечного динамически настраиваемого гравиметра, а также разработано методику испытаний двухколечного динамически настраиваемого гравиметра.

УДК 531.383

Dynamic design complex for the tests of double-ring the dinamically adjusted gravimeter / I.V. Korobijchuk, Y.O. Piskivets

The dynamic designed complex which allows to execute the tests of double-ring the dinamically adjusted gravimeter is in-process developed, and also the method of tests of double-ring the dinamically adjusted gravimeter is developed.