

**І.В. Коробійчук, доц.
Я.О. Пісківець, здобувач**

Житомирський державний технологічний університет

КОНСТРУКЦІЯ ДВОКІЛЬЦЕВОГО ДИНАМІЧНО НАСТРОЮВАНОВОГО ГРАВІМЕТРА

(Представлено д.т.н., проф. Безвесільною О.М.)

В роботі наведено опис конструкції та викладено принцип дії двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра. Представлено різновиди схем динамічно настроюваних гіроскопів та показано переваги обраної конструкції перед іншими гравіметрами. Зміщення центра ваги в двокільцевому динамічно настроюваному гравіметрі дозволяє відокремити корисний сигнал гравіметра від перешкод, що дає можливість підвищити точність вимірювання аномалій гравітаційного поля Землі за допомогою авіаційної гравіметричної системи до 1 мГл.

Постановка проблеми. Для вивчення характеристик гравітаційного поля Землі у важко-доступних місцях Земної кулі необхідно побудувати авіаційну гравіметричну систему (АГС), чутливим елементом якої є гравіметр. Сьогодні відомі окремі описи конструкцій і технічні характеристики деяких акселерометрів, що застосовують як гравіметри АГС. На кафедрі приладобудування Національного технічного університету України „КП” та на кафедрі автоматизації і комп’ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету України проводяться наукові дослідження характеристик нових типів найбільш перспективних авіаційних гравіметрів – динамічно настроюваних одно- та двокільцевих. Однак в літературі [1–5] також відсутні відомості щодо опису конструкції, функціональної схеми та принципу дії двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра.

Тому актуальним є дослідження конструкції двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра (ДГ), який має менші габарити, ніж гіроскопічний вимірювач прискорень (ГВП), а точність більшу, ніж у ГВП та однокільцевого динамічно настроюваного гіроскопа (ДНГ).

Аналіз досліджень. Точність вимірювання аномалій гравітаційного поля Землі за допомогою авіаційної гравіметричної системи значною мірою забезпечується вибором чутливого елемента системи – гравіметра. Сьогодні одними з найперспективніших вважаються гіроскопічні гравіметри. В роботах [1] О.М. Безвесільної досліджено можливість і доцільність використання як гравіметра АГС гіроскопічного вимірювача прискорень. Похибка вимірювання Δg АГС на базі гірогравіметра була [1] 8 мГл. В роботах О.М. Безвесільної і П.Л. Литвиненко обґрунтовано доцільність використання як гравіметра АГС однокільцевого ДНГ, похибка вимірювання Δg АГС була 5 мГл.

В роботах [1, 5] обґрунтовано, що двокільцевий ДНГ має значно більшу точність та швидкодію, ніж однокільцевий. Тому у подальшому доцільно дослідити конструкцію двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра як найбільш перспективного з відомих авіаційних гравіметрів. Але в літературі [1–5] немає ніяких відомостей щодо конструкції двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра.

Метою роботи є надати опис конструкції та викласти принцип дії нового двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра.

Основна частина. Сутність динамічного настроювання – використання так званої динамічної твердості елементів гравіметра, що обертаються. У розглядуваного ДГ [6] динамічне настроювання використовується для компенсації моменту сил пружності торсіонів підвісу гравіметра. Торсіони підвісу гравіметра створюють момент сил пружності, що протидіє відхиленню ротора гравіметра від нейтрального положення, тобто відхиленню ротора від площини, перпендикулярної до осі обертання привідного вала. Для компенсації впливу торсіонів, що протидіють відхиленню ротора, потрібно організувати ефект негативного пружного зв’язку, що створює при відхиленні ротора момент, що прагне збільшити початкове відхилення, тобто створити в конструкції негативну пружину такої ж твердості, що і твердість торсіонів, що утворюють позитивну пружину.

Найпростішою і надійною пропонується схема гравіметра з внутрішнім кардановим підвісом, що обертається, у якій момент сил пружності торсіонів компенсується динамічним моментом сил інерції карданового кільця – проміжного елемента, що пружно зв’язаний з одного боку з привідним валом, а з іншого – також пружно – з ротором.

Умова динамічного настроювання в схемі, запропонованій Хоувом, рівність сумарної твердості торсіонів і динамічного моменту сил інерції карданового кільця:

$$k_1 + k_2 - (I_{xk} + I_{yk} + I_{zk})\dot{\gamma}^2 = 0, \quad (1)$$

де K_1 – твердість торсіонів, що зв'язують привідний вал з кардановим кільцем; K_2 – твердість іншої пари торсіонів; I_{xk}, I_{yk}, I_{zk} – екваторіальні й осьові моменти інерції карданового кільця; $\dot{\gamma}^2$ – постійна кутова швидкість привідного вала.

Фізика явища компенсації твердості торсіонів динамічною "твердістю" кільця карданового підвісу полягає в наступному. Динамічна твердість від осьового моменту інерції $\frac{1}{2} I_{zk} \dot{\gamma}^2$ подібно статичній твердості торсіонів $\frac{1}{2} (K_1 + K_2)$ створює при наявності відхилення моменту, який прагне привести кільце в нейтральне положення, тобто в площину, перпендикулярну до осі привідного вала. Складові динамічної "твердості" від екваторіальних моментів інерції $-\frac{1}{2} (I_{xk} + I_{yk}) \dot{\gamma}^2$ мають протилежний знак, тобто створюють при наявності відхилень від нейтрального положення перекидаючий момент – ефект пружини з негативною твердістю.

Як відомо, сума моментів інерції тіла навколо двох осей завжди більша моменту інерції навколо третьої осі. Тому знак доданків, що в круглих дужках, від'ємний. При виконанні умови (1) досягається компенсація сумарної позитивної твердості твердістю від'ємною, що при малих кутах відхилення ротора або кільця забезпечує ефект вільного підвісу гравіметра. Як видно з (1), умова динамічного настроювання залежить тільки від механічних параметрів. Для підвищення стабільності $\dot{\gamma}$ у ДГ використовують синхронні привідні двигуни зі стабілізацією по частоті (з точністю 0,01–0,05 %) джерела живлення. Іноді для підвищення точності динамічного настроювання гравіметр регулюють не зміною твердості торсіонів чи моментів інерції карданового кільця, а підбором частоти обертання з використанням нестандартної частоти живлення гравіметра. У цьому випадку рекомендуємо застосовувати автономне джерело живлення з електростатичним перетворювачем. Для збереження стабільності значень твердості торсіонів і моментів інерції кільця забезпечуємо малу зміну робочої температури. Малі габаритні розміри гравіметра і мале тепловиділення сприяють розв'язанню цієї задачі.

Різновиди схем ДГ. Схему ДГ з одним кардановим кільцем називають однокільцевою [1]. У такій схемі крім постійних складових відхилень площини ротора містяться складові, що не враховуються, змінюються за гармонійним законом з частотою $2\dot{\gamma}$. Гармонійні складові з частотою $2\dot{\gamma}$ усуваються конструктивними засобами, що полягають у тому, що замість однокільцевої найпростішої схеми підвісу ротора застосуємо більш симетричну двокільцеву (рис. 1).

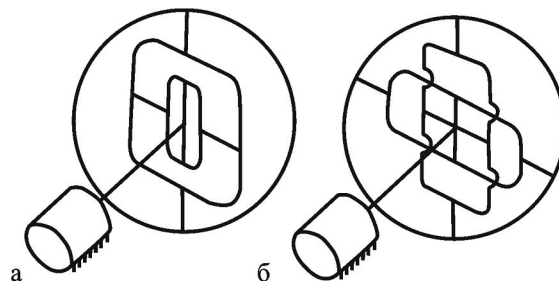


Рис. 1. Схема ДГ: а – з послідовним з'єднанням кілець; б – з паралельним з'єднанням кілець

На рис. 1 показано дві двокільцеві схеми: з послідовним і паралельним з'єднаннями кілець. В другій схемі ротор гравіметра зв'язують із привідним валом двома однаковими кільцями, поверненими відносно один одного на 90° . Кожне з кілець, як і в розглянутій однокільцевій схемі, має пари внутрішніх і пари зовнішніх торсіонів. У двох кільцях однотипні торсіони, так само як і кільця, повернені відносно один одного на 90° .

Оскільки внутрішні торсіони другого кільця зміщені просторово відносно внутрішніх торсіонів першого кільця, моменту зовнішніх сил $M_{xk}^{e.c.}$: $-M_{xk}^{e.c.} \cos(\gamma - \frac{\pi}{2}) = -M_{xk}^{e.c.} \sin \gamma$ і $-M_{xk}^{e.c.} \sin(\gamma - \frac{\pi}{2}) = M_{xk}^{e.c.} \cos \gamma$. Фізичний зміст усунення періодично моментів, що змінюються у випадку використання двокільцевого гравіметра з паралельними кільцями, наступний. До кожного члена, що періодично змінюється з частотою $2\dot{\gamma}$, додамо такий ж член із протилежним знаком. Це приведе до

взаємного усунення всіх членів, що періодично змінюються з частотою $2\dot{\gamma}$. В справедливості твердження, що зсув гармонійної функції по фазі на π приводить лише до зміни на протилежний знак функції зі збереженням числового значення функції, легко переконатися з графіків синусної і косинусної функцій.

Функціональна схема та принцип дії ДГ. Функціональну схему двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра [6], яка досліджується, зображено на рис. 2.

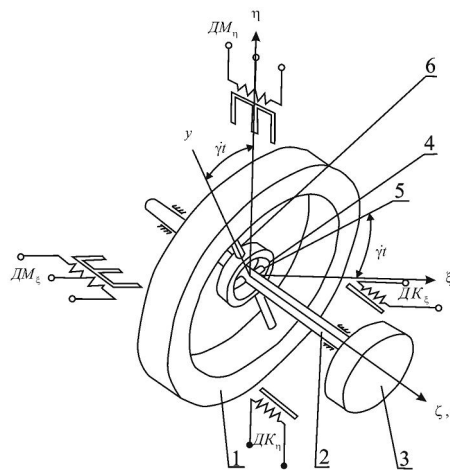


Рис. 2. Функціональна схема нового ДГ з внутрішнім кардановим підвісом

Ротор 1 привідним валом 2 через елементи внутрішнього підвісу приводиться двигуном 3 в обертання з постійною швидкістю. Внутрішній кардановий підвіс містить карданове кільце 4, два внутрішніх торсіони 5, що зв'язують карданове кільце з ротором, і два зовнішніх торсіони 6, що з'єднують карданове кільце з привідним валом. Осі внутрішніх і зовнішніх торсіонів взаємно перпендикулярні між собою і перпендикулярні до осі привідного вала. Ротор звичайно роблять симетричним. Торсіони показані на рис. 2 у вигляді стрижнів чи спиць умовно. Реально вони мають більш складну форму, щоб задовольняти наступні вимоги. Торсіони повинні мати малу твердість на скручування навколо осі їхньої симетрії і велику твердість уздовж і навколо всіх інших осей, щоб центр мас лежав на осі привідного вала в екваторіальній площині ротора при усіх впливах сили ваги і довільних складових сил інерції при прискореннях основи.

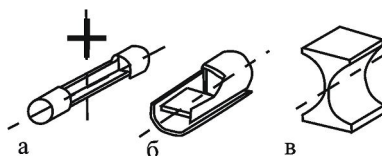


Рис. 3. Деякі різновиди пружних підвісів

На рис. 3 показано форми торсіонів хрестоподібного поперечного перерізу (рис. 3, а), з рознесеними уздовж осі торсіона двома ортогональними пластинчастими пружинами (рис. 3, б), працюючої на вигин тонкої перемички, утвореної двома циліндричними поверхнями (рис. 3, в).

На рис. 2 показано два електромагнітних датчики моменту, закріплені на корпусі приладу. Вони при подачі напруги живлення створюють момент навколо осей ξ або η , що не обертаються разом з ротором. Напруга подається між середньою та другою крайньою точками обмоток. Якщо на роторі розташувати постійні магніти, тобто застосувати поляризовану систему, то можна використати обмотку без виводу середньої точки. Зміна знака моменту в цьому випадку досягається зміною полярності струму в обмотці.

На рис. 2 зображено датчики кута $ДУ_\xi$ та $ДУ_\eta$, також закріплені на корпусі приладу. Вони перетворюють в електричні сигнали відхилення площини ротора від нейтрального положення. Наприклад, показані датчики кута, реагуючі на зміну повітряного зазору між осередком з обмоткою і торцем ротора в точках корпуса, що не обертаються навколо осей ξ та η . Для зменшення впливу лінійних переміщень ротора навколо корпуса, наприклад, на величину осьового люфту в підшипниках

привідного вала зазвичай використовують додаткові датчики кута, розташовані діаметрально протилежно і ввімкнуті по диференційній або по мостовій схемах. Датчики можуть бути різних типів: індуктивні, ємнісні, індукційні, оптичні та інші, а також параметричні і генераторні.

Можлива робота датчиків кута і датчиків моменту в системі координат XYZ, що обертається разом з ротором. В цьому випадку ці електромеханічні елементи повинні бути закріплені на привідному валу і на кардановому кільці. Але ця можливість звичайно не використовується через технічні труднощі, головні з яких – передача вихідних сигналів датчиків кута і керуючих сигналів датчиків моменту через ковзні контакти на привідному валу, що неминує викликає додаткові перешкоди і зниження надійності. На рис. 2 не показані геометричний кожух гравіметра, для забезпечення сильного зниження тиску воднево-гелієвого газового середовища для зменшення вентиляційних втрат, тепловиділення і споживаної потужності привідного двигуна, магнітного екранування гравіметра, а також елементи налаштування і регулювання гравіметра й інші допоміжні пристрої.

Можливості зменшення габаритних розмірів при використанні внутрішнього карданового підвісу замість зовнішнього наведено на рис. 4. На цьому рисунку показана площадка ДГ у кардановому підвісі з використанням внутрішнього (а) і зовнішнього (б) карданового підвісу. Для наочності переваг внутрішнього підвісу габаритні розміри самої площі на рис. 4 обрано однаковими. Для ДГ переваги внутрішнього карданового підвісу ще більш істотні. Тут при переході до внутрішнього карданового підвісу в рамках колишніх габаритних розмірів збільшується діаметр ротора; приблизно пропорційно квадрату збільшення зовнішнього діаметра ротора зростає осьовий момент інерції ротора і кінетичний момент гравіметра, отже, у скільки разів зменшується вплив перешкод, у стільки ж зменшується швидкість відходу гравіметра, обумовленого перешкодами.

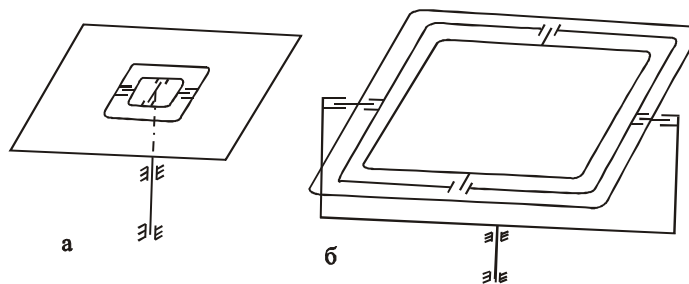


Рис. 4. Тривісний кардановий підвіс площадки: а – внутрішній; б – зовнішній

Усунення моменту сил сухого тертя при переході до пружного підвісу гравіметра – головна перевага таких гравіметрів. Це пояснює інтерес до всіх різновидів вібраційних гравіметрів. Момент сил сухого тертя має істотно нелінійний характер, що описується розривною сигнум-функцією.

Модуль моменту сил сухого тертя у шарикопідшипниках залежить від дуже великого числа факторів – нормального тиску, отже, від прискорень, характеру третьових поверхонь, змащення, температури, глибини вакууму та інш.

Нелінійний характер сил сухого тертя призводить до появи порога чутливості гравіметра: якщо основа, на якій встановлено ДГ, повертається з переносною кутовою швидкістю меншою, ніж обумовлено порогом чутливості. Нестабільність модуля моменту сил сухого тертя ускладнює врахування шкідливого впливу моменту сил сухого тертя, наприклад, методом алгоритмічної компенсації.

Заміна кулькоподібного підвісу пружним підвісом усуває недоліки, пов'язані з впливом моменту сил сухого тертя. Недосконалості пружних властивостей торсіонів (наявність зони гістерезиса, відхилення від законів Гука) приводять до зміни ефекту в'язкого опору і до розширення спектра частот власних коливань. Ці недоліки невеликі у порівнянні з проявами сухого тертя.

Для опису конструкції нового ДГ скористаємось [6]. Відомий гравіметр, побудований на основі двоступеневого ДНГ, який використовується як чутливий елемент (ЧЕ) гравіметра [5, с. 6]. Спільними суттєвими ознаками відомого гравіметра і нового гравіметра, що досліджується, є те, що вони містять триступеневий ДНГ, до якого підключений датчик моменту.

Проте, на відміну від нового гравіметра ДГ, у відомого гравіметра [5, с. 6] центр мас ротора двоступеневого ДНГ розташований на осі його обертання.

Результат вимірювань, отриманий за допомогою відомого гравіметра [5], містить на порядок більші похибки вимірювань. Ці похибки викликані тим, що цей гравіметр вимірює сукупність прискорення сили тяжіння та інерціального абсолютного прискорення. Інерціальне абсолютне прискорення зумовлене, в основному, вертикальним прискоренням літака, на якому встановлено гравіметр. Причому величина завади може бути значно більшою, ніж величина корисної складової результатів вимірювань. Поступальні і кутові вібрації літака також можуть призвести до істотних похибок результатів вимірювань.

Поставлена задача вирішується шляхом того, що центр мас ротора двоступеневого динамічно-настроюваного гіроскопа зміщений відносно осі його обертання, додатково введені датчик кута повороту, фільтр нижніх частот і пристрій обчислення вихідного сигналу гравіметра, причому вхід датчика кута повороту підключено до виходу двоступеневого динамічно-настроюваного гіроскопа, а вихід датчика кута повороту підключено до входу фільтра нижніх частот, вихід якого підключено до входу пристрою обчислення вихідного сигналу нового ДГ.

Підвищення точності вимірювань у новому досліджуваному гравіметрі забезпечується за рахунок того, що центр мас ротора двоступеневого ДНГ зміщений відносно осі його обертання і тому цей гравіметр виконує безпосереднє вимірювання прискорення сили тяжіння. Ці вимірювання виконуються за допомогою датчика кута повороту, який додатково введено до складу нового ДГ.

ДГ (рис. 5) містить триступеневий ДНГ 1 з ротором 2, до якого підключено датчик 4 моменту, датчик 3 кута повороту, фільтр 5 нижніх частот і пристрій 6 обчислення вихідного сигналу гравіметра. Вхід датчика 3 кута повороту підключено до виходу двоступеневого динамічно-настроюваного гіроскопа 1, вихід датчика 3 кута повороту підключено до входу фільтра 5 нижніх частот. Вихід фільтра 5 нижніх частот підключено до входу пристрою 6 обчислення вихідного сигналу гравіметра. Центр мас C ротора 2 зміщений відносно осі його обертання на величину l .

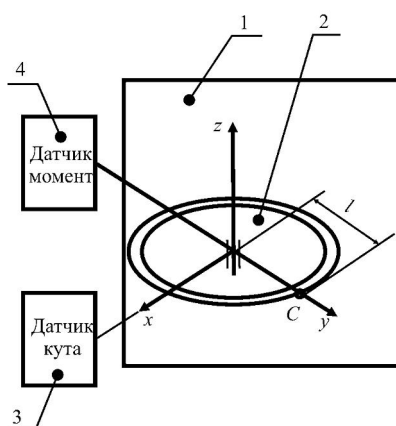


Рис. 5. Структурна схема ДГ

За допомогою привідного двигуна (на кресленні не показаний) ротор 2 обертається з постійною кутовою швидкістю γ . При відсутності зовнішніх впливів ротор 2 обертається в горизонтальній площині. При наявності прискорення сили тяжіння уздовж його осі обертання ротор 2 почне відхилятися. При описі роботи гравіметра основні початкові співвідношення запозичені з [5].

Якщо вісь Oz спрямована вертикально і, крім прискорення сили тяжіння g , інші прискорення відсутні, то виникає момент сили тяжіння M_g , який змусить ротор 2 відхилятися відносно осі Ox . Момент сили тяжіння M_g визначиться виразом:

$$M_g = mgl \cdot \cos \alpha, \tag{2}$$

де m – маса ротора 2; l – зміщення центра мас ротора 2 відносно осі його обертання; α – кут відхилення ротора 2.

Момент $M_{\ddot{h}}$ від вертикального прискорення \ddot{h} по осі чутливості приладу (рис. 5) дорівнює:

$$M_{\ddot{h}} = m\ddot{h}l \cdot \cos \alpha. \tag{3}$$

В результаті проведених випробувань визначено, що ДГ дозволяє відокремлювати сигнал прискорення сили тяжіння від завад, викликаних вертикальними прискореннями, поступальними і кутовими вібраціями літака, на якому встановлено гравіметр. Таким чином, у вихідному сигналі ДГ повністю компенсується вплив ряду похибок вимірювань. Точність вимірювань прискорення сили тяжіння за допомогою ДГ складає 1 мГл.

Висновки. Показано, що на ДГ значно менше впливають внутрішні періодичні збурювання з частотою 2γ . Виявлено головні переваги ДГ з внутрішнім кардановим підвісом і динамічним настроюванням перед ДГ з зовнішнім кардановим підвісом: більш раціональні використання обсягу гравіметра з триступеневим підвісом і усунення моменту сил сухого тертя використанням пружного підвісу.

Розроблено конструкцію двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра. Підвищення точності вимірювань в ДГ забезпечується за рахунок того, що центр мас ротора триступеневого ДНГ зміщений відносно осі його обертання і тому цей гравіметр виконує безпосереднє вимірювання прискорення сили

тяжіння. Ці вимірювання виконуються за допомогою датчика кута повороту, який додатково введено до складу ДГ. Оскільки в ДГ виконується безпосереднє вимірювання прискорення сили тяжіння, то з'являється можливість виконати фільтрацію вимірювального сигналу. Точність вимірювань прискорення сили тяжіння за допомогою ДГ складає 1 мГл.

В подальшому доцільно дослідити статичні похибки та фільтрацію вихідного сигналу двокільцевого динамічно налаштованого гравіметра.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Безвесільна О.М.* Вимірювання прискорень: Підручник. – К.: Видавництво "Либідь", 2001. – 261с.
2. *Пельпор Д.С.* Гироскопические системы: Элементы гироскопических приборов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
3. *Новиков Л.З., Райхман О.Ю., Шумова Г.М.* Блок гиротакметров, основанный на миниатюрных динамически настраиваемых гироскопах, для космических применений // Материалы III Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – С.-Пб.: Государственный научный центр Российской Федерации-ЦНИИ «Электронприбор», 1996. – 218 с.
4. *Збруцкий А.В.* Измерение параметров угловых движений динамически настраиваемым гироскопом // Изв. вузов. Приборостроение. – 1986. – № 4. – С. 55–59.
5. *Одинцов А.А.* Теория и расчет гироскопических приборов. – К.: Вища шк., 1985. – 392 с.
6. *Безвесільна О.М., Коробійчук І.В., Нечай С.О., Подчашинський Ю.О.* Гравіметр // Патент України на винахід № 78620. Заявка № а200505440 на винахід. – 2005.

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

Наукові інтереси:

– гравіметричні системи.

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

Наукові інтереси:

– гравіметричні системи.

Подано 05.05.2008

Коробійчук І.В., Пісківець Я.О. Конструкція двокільцевого динамічно настроюваного гравіметра
Коробійчук И.В., Пискивец Я.А. Конструкция двухколечного динамически настраиваемого гравиметра
Korobijchuk I.V., Piskivets Ya.A. Design double-ring dynamically adjusted gravimeter

УДК 531.383

Конструкция двухколечного динамически настраиваемого гравиметра / И.В. Коробийчук, Я.А. Пискивец

В работе приведено описание конструкции и описано принцип действия двухколечного динамически настраиваемого гравиметра.

УДК 531.383

Design double-ring dynamically adjusted gravimeter / I.V.Korobijchuk, Ya.A. Piskivets

In work the description of a design is resulted and described a principle of action double-ring dynamically adjusted gravimeter.