

UDC 528.563

Bezvesilna O., DThSc., Prof. *
Tkachuk A., Ph.D. in Engineering, **
Chepyuk L. **
Khylchenko T. **

*National Technical University of Ukraine
«Kyiv Polytechnic Institute»
**Zhytomyr State Technological University / Ukraine

AVIATION GRAVIMETRIC SYSTEM WITH THE VIBRATING LOW FREQUENCY GRAVIMETER

АВІАЦІЙНА ГРАВІМЕТРИЧНА СИСТЕМА ІЗ ВІБРАЦІЙНИМ НИЗЬКОЧАСТОТНИМ ГРАВІМЕТРОМ

Abstract: The expediency of using aviation gravimetric systems (AGS) with the new vibrating string gravimeter for gravimetric measurements and Earth's gravitational field information gathering was grounded. Advantages and disadvantages of today's existing AGS gravimeters were defined. It was shown that AGS with the new vibrating string gravimeter accelerates the significant measurement accuracy of acceleration of earth gravity by compensating the influence of vertical acceleration and instrumental device errors.

Keywords: vibrating string gravimeter, acceleration of earth gravity, sensor.

INTRODUCTION

The information about the gravity g and its anomalies Δg is needed in aviation and space technique (correction of the systems of inertial navigation of rockets, planes), for realization of aims of engineering geology, archaeology, prognosis of earthquakes. To determine the characteristics of the Earth's gravity field the most useful is aviation gravimetric system (AGS) [1 - 3].

By means of the AGS it is possible to obtain the gravimetric information in the awkward-to-reach zones of the globe much faster and at lower costs than doing this by means of ground-mounted, sea-going and land-based gravimetric units.

Gravimeter is a sensitive element of AGS that measures the gravity and the accuracy of which, basically, determines the accuracy of all AGS [4].

Therefore, to improve the accuracy of existing and creation of new gravimeters is a very topical issue as of today

PROBLEM STATEMENT

Today there are many kinds of AGS gravimeters, the operating principle of which is based on different physical phenomena. They have both pros and cons. The main types of avionic gravimeters, principle of their operation, basic parameters, pros and cons are described in [4—7]. Some publications [4-11] provide the prospects and feasibility of avionic string gravimeter usage. The patent [2] shows the

Анотація: Обґрунтовано доцільність використання авіаційних гравіметричних систем (АГС) з новим струнним гравіметром для проведення гравіметричних вимірювань та отримання інформації про гравітаційне поле Землі. Визначено переваги та недоліки існуючих сьогодні гравіметрів АГС. Показано, що АГС із новим струнним гравіметром забезпечує суттєве підвищення точності вимірювань прискорення сили тяжіння шляхом компенсації впливу вертикального прискорення та інструментальних похибок приладу.

Ключові слова: струнний гравіметр, прискорення сили тяжіння, чутливий елемент.

ВСТУП

Інформація про гравітаційне поле Землі g та його аномалій Δg необхідне у авіаційній і космічній техніці (корекція систем інерціальної навігації ракет, літаків), для реалізації задач інженерної геології, археології, прогнозу землетрусів. Для визначення характеристик гравітаційного поля Землі найзручніше використовувати авіаційні гравіметричні системи (АГС) [1 - 3].

За допомогою АГК можна здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі набагато швидше та з меншими витратами, ніж за допомогою наземних, морських або сухопутних гравіметричних засобів.

Гравіметр – це чутливий елемент АГС, який вимірює прискорення сили тяжіння і від точності якого, в цілому, залежить точність всієї АГС [4].

Тому підвищення точності існуючих та створення нових гравіметрів АГС є актуальними.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сьогодні існує багато видів гравіметрів АГС, принцип роботи яких оснований на різних фізичних явищах. Вони мають як свої переваги, так і недоліки. Основні різновиди авіаційних гравіметрів, принцип їх дії, основні параметри, переваги та недоліки викладено в [4-7]. У ряді публікацій [4-11] обґрунтовано перспективність та доцільність використання авіаційного струнного гравіметра. У патенті [2] показано функціональну схему та принцип дії АГС із

functional scheme and the AGS operation principle with the new vibrating string gravimeter (VSG).

A significant contribution to the gravimetric measurement methods and means were done by scientific schools formed in the NASU S.I Subbotin Institute of Geophysics led by academician Starostenko V.I.; in NASU Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth led by the NASU academician Lyalko V.I., in the NASU Institute of Geological Sciences led by the academician Hozhyk P.F., in NNC 'Institute of Metrology' under the guidance of Ph.D Dudolad O.S., in Kiev Polytechnic University under the guidance of Honored Ukrainian Scientist, Ph.D, professor Bezvesilna O.M. The known literature [1-11] does not contain the functional scheme description with the new vibrating string gravimeter [2] and its operational principle is not stated.

Article objective is to describe the functional scheme with the new vibrating string gravimeter [2] and to state its operational principle.

MAIN ARTICLE

All known AGS gravimeters are inherent to both advantages and significant disadvantages, for which the main ones are the following [1]:

- 1) Low measurement accuracy (2-10 mGal);
- 2) The mandatory need to use the filtration procedure for AGS gravimeter output signal;
- 3) AGS gravimeter static gear coefficient volatility caused by changes in the properties of structural elements;
- 4) Low performance speed, the lack of operational data processing and others.

The articles [5, 7-9] show that the vibrating string gravimeters own the highest precision of 2 mGal. Hence, they should be preferred.

Vibrating string gravimeters have high vibration and impact durability, reliability, frequency-modulated input signal, high-power output signal, small size and weight. They allow to do fast and accurate digital registration of g-force acceleration. The benefits also include the small time constant, which is vital for aircraft measurements and nearly unlimited input measurement range without reconfiguring the device.

Picture 1 presents the functional scheme of vibrating string gravimeter in the AGS system. Avionic gravimetric system for measuring g-force acceleration anomalies (fig.1.) contains system (1) of navigation parameters identification, the height meter (2) and vibrating string gravimeter mounted on girostabilized platform (3), the outputs of which are connected to OBC inputs (4).

The sensitive gravimeter element (3) (fig.1.) placed in the sealed vessel (8) and is designed as two identical vertical strings (6) and (7). They

новим струнним гравіметром (СГ).

Значний вклад у розвиток методів та засобів гравіметричних вимірювань внесли наукові школи, сформовані в Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАНУ під керівництвом академіка НАНУ Старостенка В.І., у Науковому Центрі аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАНУ під керівництвом академіка НАНУ Лялько В.І., в Інституті геологічних наук НАНУ під керівництвом академіка НАНУ Гожика П.Ф., у ННЦ "Інститут метрології" під керівництвом к.е.н. Дудолода О.С., в НТУУ "КПІ" під керівництвом Заслуженого діяча науки і техніки України, д.т.н., професора Безвесільної О.М. У відомій літературі [1-11] немає опису функціональної схеми із новим струнним гравіметром [2] та викладення її принципу дії.

Метою статті є опис функціональної схеми із новим струнним гравіметром [2] та викладення її принципу дії.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Всім відомим гравіметрам АГС притаманні як переваги, так і суттєві недоліки, серед яких основними є наступні [1]:

- 1) низька точність вимірювання (2-10 мГал);
- 2) обов'язкова необхідність застосування процедури фільтрації вихідного сигналу гравіметра АГС;
- 3) нестабільність статичного передатного коефіцієнта гравіметра АГС, спричинена змінами властивостей конструктивних елементів;
- 4) невисока швидкодія, відсутність можливості оперативної обробки інформації та інші.

У [5, 7-9] показано, що найбільшу точність 2 мГал мають струнні гравіметри. Їм слід надати перевагу.

Струнні гравіметри мають високу вібраційну та ударну міцність, надійність, частотно-модульований вихідний сигнал, високу потужність вихідного сигналу, а також малі габарити та вагу. Вони дозволяють виконувати швидко і точну цифрову реєстрацію прискорення сили тяжіння g . До переваг також слід віднести малість сталої часу, що важливо при вимірюваннях на літаку, і майже необмежений діапазон вимірювання вхідних величин без перенастроювання приладу.

На рис. 1. зображено використання струнного гравіметра у складі системи АГС.

Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння (рис. 1.) містить систему 1 визначення навігаційних параметрів, вимірювач 2 висоти і встановлений на гіростабілізованій платформі гравіметр 3, виходи яких підключені до входів БЦОМ 4.

Чутливий елемент гравіметра 3 (рис. 1), розміщений у герметичному корпусі 8 і виконаний у вигляді двох ідентичних вертикальних струн 6, 7. Вони

are attached to the top and bottom of the inertial mass (IM) (5) by one end, which is attached to the opposite wall sides of the sealed vessel (8) by the elastic element (12). The free ends of the vertical strings 6 and 7 are connected with string generators (10) and (11), which outputs are connected to the inputs of the adder (9).

прикріплені одним кінцем до верху і низу інерційної маси (IM) 5, що прикріплена до протилежних бічних сторін герметичного корпусу 8 пружним елементом 12. Вільні кінці вертикальних струн 6, 7 з'єднані зі струнними генераторами 10, 11, виходи яких з'єднані з входами суматора 9.

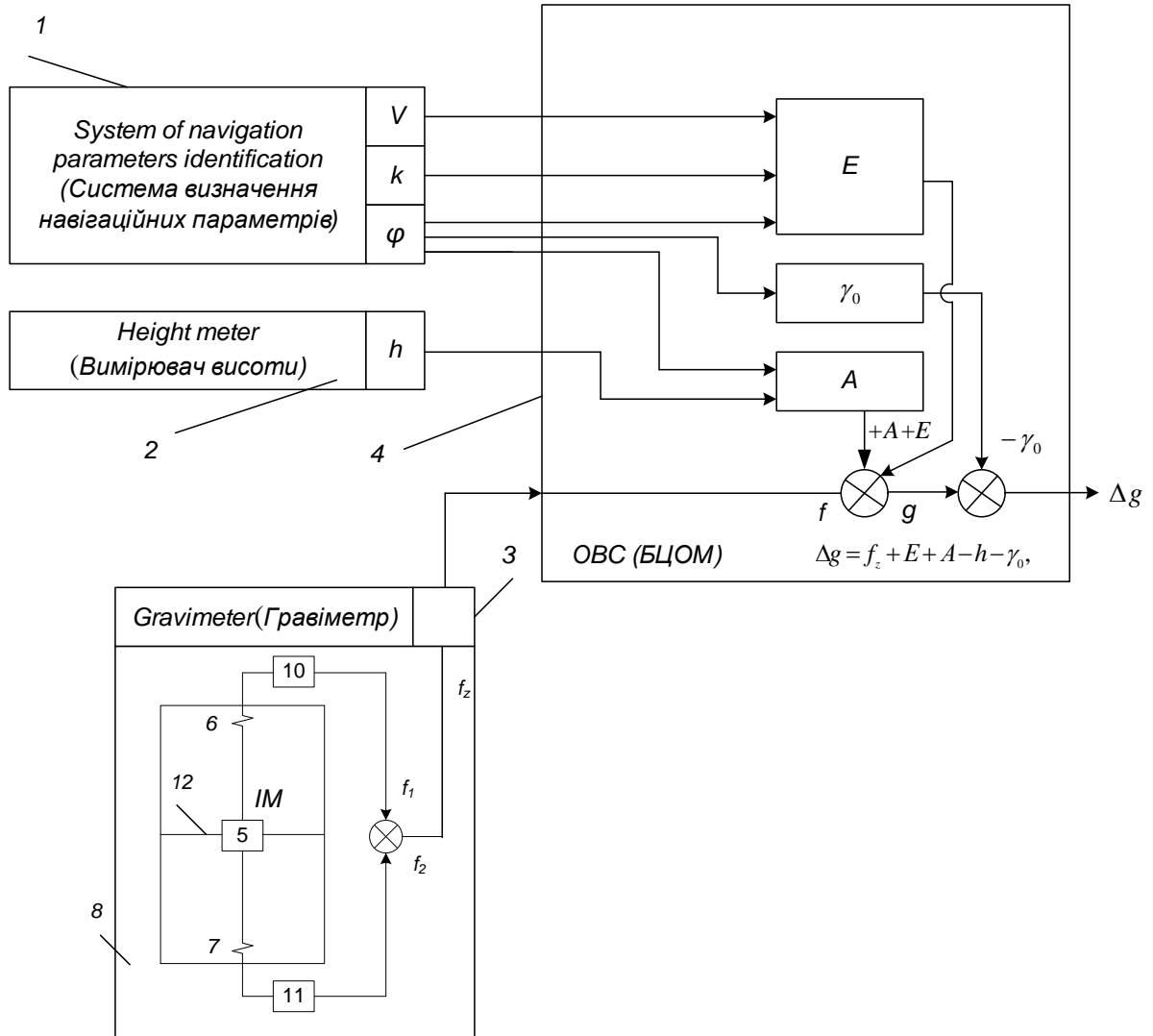


Fig. 1 – A block diagram of AGS: / Структурна схема АГС:

1 – system of navigation parameters identification / система визначення поточних навігаційних параметрів; 2 – height meter / вимірювач висоти; 3 – gravimeter / гравіметр; 4 – onboard digital computer / БЦОМ; 5 - inertial mass / інерційна маса; 6, 7 – вертикальні струни / vertical strings; 8 – корпус / vessel; 9 – суматор / adder; 10, 11 – струнні генератори / string generators

Avionic Gravimetric System for measuring g-force acceleration anomalies work in such a way.

The g-force acceleration g , aircraft vertical acceleration \ddot{h} and the total instrumental errors Δ_i from the influence of residual non-identity of identical string structures, from the temperature, humidity and ambient pressure impacts the inertial mass (5) (fig.2.).

The force equation along the Oz axis for gravimeter sensitivity, directed along the vertical strings will look like:

Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння працює наступним чином.

На інерційну масу 5 діє прискорення сили тяжіння g , вертикальне прискорення \ddot{h} літака та сумарні інструментальні похибки Δ_i від впливу залишкової неідентичності конструкцій однакових струн, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища (рис. 2).

Рівняння сил уздовж осі Oz чутливості гравіметра, спрямованої уздовж вертикальних струн, буде мати вигляд:

$$f_z = f_1 + f_2 = mg + m\Delta\ddot{h} + \Delta i + mg - m\Delta\ddot{h} - \Delta i = 2mg,$$

where f_1 – output signal from string generator 10;
 f_2 – output signal from string generator 11;
 f_z – output signal from adder 9;
 m – inertial mass

де f_1 – вихідний сигнал зі струнного генератора 10;
 f_2 – вихідний сигнал зі струнного генератора 11;
 f_z – вихідний сигнал з суматора 9;
 m – вага інерційної маси.

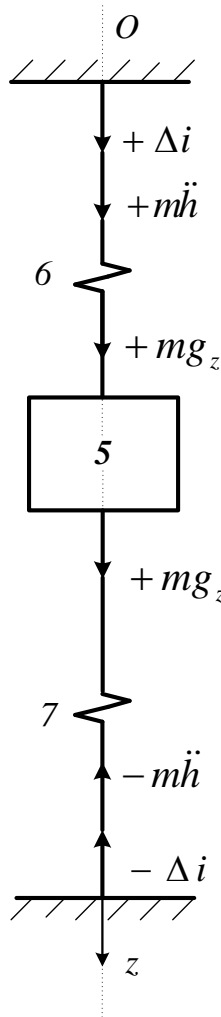


Fig. 2. Operation principle of AGS vibrating string gravimeter / Принцип дії нового СГ АГС

Equation (1) shows that output signal from 9 adder contains the doubled value of useful g-force acceleration signal and does not contain the vertical acceleration \ddot{h} and the total instrumental errors Δi

The output signals from the system 1 of navigation parameters definition and altitude measuring unit are set to the output of the onboard digital computer 4, where the output signal of gravimeter 3 is also set at the same time. Taking into account the received data, the onboard digital computer 4 calculates the anomalies Δg of the acceleration of earth gravity in the following way [3]:

З рівняння (1) видно, що вихідний сигнал з суматора 9 містить подвоєне значення корисного сигналу прискорення сили тяжіння та не містить вертикального прискорення \ddot{h} літака та сумарних інструментальних похибок Δi .

На вхід БЦОМ 4, куди подається вихідний сигнал гравіметра 3, також подаються вихідні сигнали від системи 1 визначення навігаційних параметрів та вимірювача 2 висоти. БЦОМ 4 на основі отриманих даних обчислює аномалії Δg прискорення сили тяжіння за формулою [3]:

$$\Delta g = f_z + E + A - \gamma_0,$$

where
 f_z – output signal of the gravimeter AGS;

де
 f_z – вихідний сигнал СГ АГС;

$$E = \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} +$$

$$+ 2\omega_3 v \sin k \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi$$

Eotvos correction;

$$A = 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \text{adjustment for}$$

altitude;

$$\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi)$$

– informative acceleration of gravity;

$$\gamma_{0e} = 9,78049 \text{ м/с}^2 - \text{informative equatorial}$$

acceleration magnitude of gravity;

v – plane speed;

r – plane location radius;

e – ellipsoid compression;

φ – geographical latitude;

k – plane flight track;

ω_3 – Earth angular velocity;

h – plane altitude over the ellipsoid;

\dot{h} – plane vertical speed;

γ_0 – informative acceleration of gravity.

CONCLUSIONS

The expediency of using AGS with the new vibrating string gravimeter [2] for gravimetric measurements and information gathering about Earth's gravitational field was proved.

By using a new string gravimeter is provided cancellation effect on its output signal error from the effects of vertical acceleration and instrumental errors.

REFERENCES

- [1]. Bezvesilna O.M (2007) - Aviation gravimetric systems and gravimeters: monograph / O.M Bezvesilna. - Zhytomyr: ZSTU. - 604 p.
- [2]. Bezvesilna O.M., Tkachuk A.H., Chepyuk L.O. (2015) - Aviation gravimetric system for measuring the gravity anomalies. Patent for invention of Ukraine 109746, MPK G01V 7/00; Appl. 18.07.14; Publish. 25.09.15, Bul. № 18.
- [3]. Bezvesilna O.M Tkachuk A.H. (2013) - Piezoelectric gravimeter of aviation gravimetric systems: monograph. – Zhytomyr: ZSTU. – 240p.
- [4]. Bezvesilnaya E.N., Tkachuk A.H. (2014) - Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter // Aviation. - № 18, p. 134-140, DOI:10.3846/16487788.2014.969878
- [5]. Bezvesilnaya E.N. (1995) - Automatic compensation for the errors of a gyroscopic linear integrating accelerometer // International Applied Mechanics. - № 4 (31), p. 317-322, DOI:10.1007/BF00846782

$$E = \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + \text{поправка}$$

$$+ 2\omega_3 v \sin k \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi$$

Етвеша;

$$A = 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \text{поправка за висоту;}$$

$$\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi)$$

– довідкове значення прискорення сили тяжіння;

$\gamma_{0e} = 9,78049 \text{ м/с}^2$ – довідкове екваторіальне

значення прискорення сили тяжіння;

v – швидкість літака;

r – радіус місцезнаходження літака;

e – стиск еліпсоїда;

φ – географічна широта;

k – курс ЛА літака;

ω_3 – кутова швидкість обертання Землі;

h – висота літака над еліпсоїдом;

\dot{h} – вертикальна швидкість літака;

γ_0 – довідкове прискорення сили тяжіння

ВИСНОВКИ

Обґрунтовано доцільність використання АГС із новим струнним гравіметром [2] для проведення гравіметричних вимірювань та отримання інформації про гравітаційне поле Землі.

Шляхом використання нового струнного гравіметра забезпечується скасування впливу на його вихідний сигнал похибок від впливу вертикального прискорення та інструментальних похибок.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

- [1]. Безвесільна О.М. (2007) - Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: монографія. – Житомир : ЖДТУ. – 604 с.
- [2]. Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Чепюк Л.О. (2015) - Авіаційна гравіметрична система для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння. Патент на винахід №109746 Україна. МПК G01V 7/00; заявл. 18.07.14; опубл. 25.09.15, Бюл. №18.
- [3]. Безвесільна О.М. Ткачук А.Г. (2013) - П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи: монографія. – Житомир: ЖДТУ. – 240 с.
- [4]. Bezvesilnaya E.N., Tkachuk A.H. (2014) - Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter // Aviation. - № 18, p. 134-140, DOI:10.3846/16487788.2014.969878
- [5]. Bezvesilnaya E.N. (1995) - Automatic compensation for the errors of a gyroscopic linear integrating accelerometer // International Applied Mechanics. - № 4 (31), p. 317-322, DOI:10.1007/BF00846782

- [6]. Bezvesilnaya E.N. (1990) - Investigation of the errors of a mechanical information-measuring system // Soviet Applied Mechanics. - № 26 (4), p. 418-423, DOI:10.1007/BF00887139
- [7]. Bezvesilnaya E.N. (1989) - Increase of the accuracy of a gyroscopic meter of navigation parameters // Soviet Applied Mechanics. - №25 (6), p. 622-627, DOI:10.1007/BF00887069
- [8]. Bezvesilnaya E.N. (1990) - Errors of a gyroscopic linear-acceleration sensor // Soviet Applied Mechanics. - №26 (3), p. 304-309, DOI:10.1007/BF00937221
- [9]. Bezvesilnaya E.N. (1995) - Increasing the precision of measurements of free-fall acceleration // International Applied Mechanics. - № 2 (31), p. 160-163, DOI:10.1007/BF00846769
- [10]. Bezvesilnaya E.N. (1982) - Device for Measuring the Geographic Latitude of an Object's Location with the Aid of a Gyropendulum // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. - № 4 (26), p. 295-298.
- [11]. Bezvesilnaya E.N. (1982) - Determination of the Stability of a Linear Acceleration Measuring Device // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. - №4 (26), p. 289-294.
- [6]. Bezvesilnaya E.N. (1990) - Investigation of the errors of a mechanical information-measuring system // Soviet Applied Mechanics. - № 26 (4), p. 418-423, DOI:10.1007/BF00887139
- [7]. Bezvesilnaya E.N. (1989) - Increase of the accuracy of a gyroscopic meter of navigation parameters // Soviet Applied Mechanics. - №25 (6), p. 622-627, DOI:10.1007/BF00887069
- [8]. Bezvesilnaya E.N. (1990) - Errors of a gyroscopic linear-acceleration sensor // Soviet Applied Mechanics. - №26 (3), p. 304-309, DOI:10.1007/BF00937221
- [9]. Bezvesilnaya E.N. (1995) - Increasing the precision of measurements of free-fall acceleration // International Applied Mechanics. - № 2 (31), p. 160-163, DOI:10.1007/BF00846769
- [10]. Безвесильная Е.Н. (1982) - Прибор для измерения географической широты местоположения объекта с помощью гиromаятника // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. - № 4 (26), p. 295-298.
- [11]. Безвесильная Е.Н. (1982) - Об определении устойчивости измерителя линейных ускорений // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. - №4 (26), p. 289-294.