

О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА, Ю.В. КИРИЧУК, Н.М. НАЗАРЕНКО

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

А.Г. ТКАЧУК

Державний університет «Житомирська політехніка»

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ДВОКАНАЛЬНИЙ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГРАВИМЕТР АГС

Стаття посвячена отриманню основного робочого рівняння руху двоканального п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи. Описано принцип дії нового двоканального п'єзогравіметра, зображено його структурну схему. Показано, що реальним є досягнення більшої точності п'єзогравіметра АГС (0,5 мГал) шляхом компенсації похибок від впливу вертикального прискорення (у 10^3 раз перевищує корисний сигнал) та інструментальних похибок та похибок від залишкової неідентичності двох каналів.

Ключові слова: п'єзоперетворювач, математична модель, двоканальний п'єзогравіметр.

OLENA BEZVESILNA, YURIY KYRYCHUK, NATALIA NAZARENKO

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ANDREW TKACHUK

Zhytomyr Polytechnic State University

AUTOMATED TWO-CHANNEL PIEZOELECTRIC GRAVIMETER AGS

The purpose of the article is to obtain the basic working equation of motion of a dual-channel piezoelectric gravimeter of the aviation gravimetric system; to prove that a new dual-channel piezoelectric gravimeter has greater accuracy than the known ones.

Today, piezoelectric transducers are used to determine the internal defects of solids with the help of ultrasonic waves, to measure the speed of ultrasound, as well as in medicine, mechanical engineering, geophysics, etc. Intensive development of new types of piezoelectric transducers is also carried out in Ukraine.

The scientific works of Ukrainian scientists consider the use of piezoelectric transducers only as accelerometers but do not indicate the possibility of their use as dual-channel aviation gravimeters for measuring the acceleration of gravity. From the above review of prominent scientific works, it is clear that there is no information as to the use of the physical phenomenon of the direct piezoelectric effect to create a dual-channel gravity AGS more accurate than a known one.

Improving the measurement accuracy in the automated dual-channel piezogravimeter is provided by the fact that the second measurement channel is created. To do this, the sensing element is made with two channels. The output electrical signals of the piezoelectric plates of both channels are summed in the adder. The output signal from the adder is fed to the device for calculating the output signal of the gravimeter (on-board computer), where it is calculated for a certain time interval. As a result, we get the output that contains a double signal of gravity acceleration. It is completely free of such measurement errors, which are caused by the influence of vertical acceleration, instrumental errors and errors from the non-identity of the two channels.

The principle of operation of the new dual-channel piezogravimeter is described, its structural scheme is shown. It is shown that it is realistic to achieve greater accuracy of the piezogravimeter AGS (0.5 mGal) by compensating for errors from the influence of vertical acceleration (10^3 times the useful signal) and instrumental errors and errors from the residual non-identity of the two channels.

Keywords: piezoelectric transducer, mathematical model, dual-channel piezogravimeter

У літературі [1–17 та ін.] немає опису основного робочого рівняння руху нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра (ДПГ) авіаційної гравіметричної системи (АГС). Тому мета даної статті – отримати математичну модель ДПГ.

Мета статті: отримати основне робоче рівняння руху ДПГ АГС; показати, що новий ДПГ має більшу точність від відомих.

Огляд наукових праць, присвячених п'єзоперетворювачам

Сьогодні п'єзоперетворювачі використовують для визначення внутрішніх дефектів твердих тіл за допомогою ультразвукових хвиль, для вимірювання швидкості ультразвуку, а також у медицині, машинобудуванні, геофізиці та ін. Інтенсивні розробки нових типів п'єзоперетворювачів проводяться і в Україні. Сьогодні відомі наступні наукові праці українських учених.

У підручниках Шарапова В.М. [5, 6] та у статтях [7–9] наведено інформацію про п'єзоелектричні перетворювачі для вимірювання різних фізичних величин. Особливу увагу приділено п'єзоелектричним акселерометрам. Однак, відсутня інформація про можливість використання п'єзоелектричних акселерометрів у ролі авіаційних гравіметрів для вимірювань прискорення сили тяжіння (ПСТ).

У роботі Кошового М.Д. [10] розглянуто способи розташування електродів між шарами п'єзоелементів, які утворюють п'єзоелектричну активну ділянку, працюючу на прямому та зворотному повздовжньому п'єзо ефекті. Але немає відомостей щодо побудови двоканальних п'єзогравіметрів АГС.

У монографії Петренка С.Ф. [11] описано нові типи п'єзоелектричних двигунів, принцип їх роботи та особливості конструкції. Але не обґрунтовано доцільність використання п'єзо ефекту у конструкціях двоканальних датчиків для вимірювань ПСТ.

У підручнику Володарського Є.Т. та Кухарчука В.В. [12] розглянуто використання п'єзоелектричних перетворювачів лише у якості акселерометрів, але не вказано на можливості їх використання у якості двоканальних авіаційних гравіметрів для вимірювань прискорення ПСТ.

У статті Рибіцького І.В. [13] проведено аналіз проблем, які виникають при розробці

безконтактних ультразвукових п'єзоперетворювачів. Проте, не вказано на можливості їх використання в якості двоканальних авіаційних гравіметрів для вимірювань прискорення ПСТ.

У роботах Ткачука А.Г., Безвесільної О.М. [14, 15] надано відомості щодо одноканального п'єзогравіметра АГС. Однак, точність його (1 мГал) бажано було б підвищити. Це актуально для сучасних вимірювань.

Використання датчиків на основі прямого та зворотного п'єзоефектів у різних галузях науки і техніки описано також і у роботах закордонних учених.

У довіднику Дж. Фрайдена [16] для вимірювання прискорення рекомендовано використовувати п'єзоакселерометри. Вказано їх переваги над іншими типами акселерометрів. Але не розглянуто можливість використання п'єзоакселерометрів для вимірювань низькочастотних вібраційних прискорень. Не вказано на можливість застосування п'єзоакселерометрів у якості двоканальних гравіметрів АГС.

Із наведеного огляду відомих наукових праць видно, що відсутня будь-яка інформація про використання фізичного явища прямого п'єзоефекту для побудови двоканального гравіметра АГС більшої точності від відомих.

Основне робоче рівняння руху ДПГ

Новий автоматизований двоканальний п'єзогравіметр, містить пристрій обчислення вихідного сигналу гравіметра та чутливий елемент, що містить п'єзопластини (рис. 1). Чутливий елемент виконано з двома каналами, в кожному з яких встановлено по одному п'єзоелементу, що є ідентичними і виконані у вигляді п'єзопластин та інерційної маси, що закріплені одне на одному, причому п'єзоелемент одного каналу розташовано п'єзопластинами вниз, а п'єзоелемент іншого каналу розташовано п'єзопластинами вгору, причому виходи п'єзопластин обох каналів з'єднані з входами суматора, вихід якого з'єднаний із входом пристрою обчислення вихідного сигналу гравіметра, щоб забезпечити підвищення точності вимірювань гравітаційного прискорення.

Підвищення точності вимірювання в автоматизованому двоканальному п'єзогравіметрі забезпечується за рахунок того, що створено другий канал вимірювання. Для цього чутливий елемент виконано з двома каналами. П'єзоелемент одного каналу, що встановлений інерційною масою на п'єзопластинах, працює на стиснення. Ідентичний йому п'єзоелемент іншого каналу, що встановлений інерційною масою під п'єзопластинами, працює на розтяг. Вихідні електричні сигнали п'єзопластин обох каналів сумуються у суматорі. Результуючий корисний електричний сигнал буде пропорційним подвоєному сигналу гравітаційного прискорення. Отже, завдяки використанню додатково введеного другого каналу вимірювання, забезпечується відсутність у вихідному сигналі нового двоканального п'єзогравіметра сигналів похибок від впливу вертикального прискорення, від залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин та мас, від інструментальних похибок (впливи зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища), які можуть бути значними.

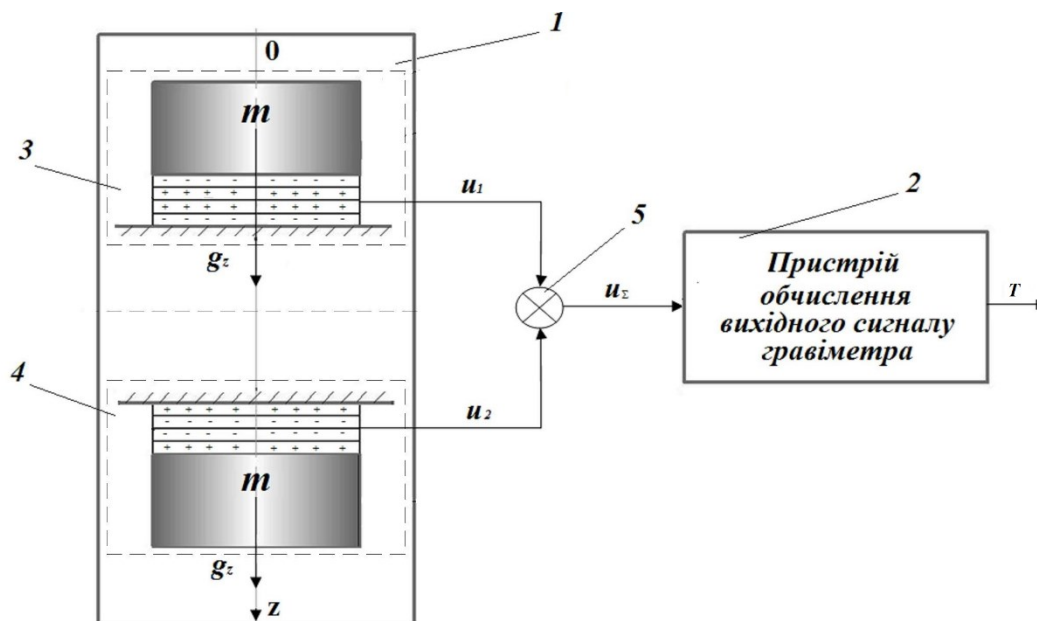


Рис. 1. Автоматизований двоканальний п'єзоелектричний гравіметр [14]

Таким чином, запропонований двоканальний п'єзогравіметр забезпечує суттєве підвищення точності вимірювання гравітаційного прискорення.

Принцип дії нового гравіметра пояснюється на рис. 1, де зображено структурну схему нового автоматизованого двоканального п'єзогравіметра.

У двоканальному п'єзогравіметрі чутливий елемент 1 виконано з двома каналами, в кожному з яких встановлено по одному п'єзоелементу. П'єзоелементи обох каналів є ідентичними і виконані у вигляді

п'єзопластин та інерційної маси, що закріплені одне на одному. П'єзоелемент 3 одного каналу розташовано п'єзопластинами вниз, а п'єзоелемент 4 іншого каналу розташовано п'єзопластинами вгору. Виходи п'єзопластин обох каналів з'єднані з входами суматора 5, вихід якого з'єднаний із входом пристрою 2 обчислення вихідного сигналу гравіметра.

Двоканальний п'єзогравіметр працює наступним чином.

На п'єзоелементи обох каналів діє гравітаційне прискорення g_z , вертикальне прискорення $\Delta \ddot{z}$ літака та інструментальні похибки Δi від впливу залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин та мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища. Якщо спроектувати всі ці впливи на вимірювальну вісь Oz гравіметра та врахувати те, що п'єзоелемент 3 одного каналу працює на стиснення, а п'єзоелемент 4 іншого каналу – на розтяг, то отримаємо [17]:

$$\begin{aligned} u_1 &= k(mg_z + m\Delta \ddot{z} + \Delta i); \\ u_2 &= k(mg_z - m\Delta \ddot{z} - \Delta i), \end{aligned} \quad (1)$$

де u_1 – вихідний електричний сигнал п'єзопластин одного каналу;

u_2 – вихідний електричний сигнал п'єзопластин іншого каналу;

m – вага інерційної маси у кожному каналі;

k – п'єзоелектрична стала.

Вихідні електричні сигнали u_1 та u_2 п'єзопластин обох каналів сумуються у суматорі 5:

$$u_{\Sigma} = u_1 + u_2 = 2kmg_z, \quad (2)$$

де u_{Σ} – вихідний сигнал суматора 5.

Вихідний сигнал u_{Σ} суматора 5 подається у пристрій 2 обчислення вихідного сигналу гравіметра (бортовий комп'ютер), де він обчислюється за певний інтервал часу. У кінцевому результаті отримуємо вихідний сигнал Т пристрою 2 обчислення вихідного сигналу гравіметра, який містить подвоєний сигнал ПСТ. У ньому повністю відсутні такі похибки вимірювань, які спричинені впливом вертикального прискорення $\Delta \ddot{z}$, інструментальних похибок та похибок від неідентичності двох каналів Δi . Отже, точність автоматизованого двоканального п'єзогравіметра буде значно вищою.

Висновки

Для суттєвого покращення точності АГС запропоновано новий автоматизований двоканальний п'єзогравіметр. Показано, що реальним є досягнення більшої точності п'єзогравіметра АГС (0,5 мГал) шляхом компенсації похибок від впливу вертикального прискорення (у 103 раз перевищує корисний сигнал) та інструментальних похибок та похибок від залишкової неідентичності двох каналів.

Література

1. Безвесільна О. М. Вимірювання гравітаційних прискорень / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖІТІ, 2002. – 264 с.
2. Безвесільна О. М. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи : монографія / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук. – Житомир : ЖДГУ, 2013. – 240 с.
3. Bezvesilnaya E. N. Gravimeter of aviation gravimetric system / E.N. Bezvesilnaya, A. G. Tkachuk, K. S. Kozko // The advanced science journal (USA). – 2013. – № 4. – Р. 41–46.
4. Безвесільна О. М. Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння / О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук // Вісник ЖДГУ // Технічні науки. – 2012. – № 4 (63). – С. 61–65.
5. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики / Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. – Москва : Техносфера, 2006. – 632 с.
6. Датчики : справочное пособие / [Шарапов В. М., Полищук Е. С., Кошевой Н. Д. и др.] ; под ред. В.М. Шарапова, Е. С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
7. Пьезокерамические трансформаторы и датчики / В. М. Шарапов, И. Г. Минаев, Ж. В. Сотула, К.В. Базило, Л. Г. Куницкая / под ред. В. М. Шарапова. – Черкассы : Вертикаль, 2010. – 278 с.
8. Шарапов В. М. Технологии синтеза пьезокерамических датчиков / В.М. Шарапов // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2010. – № 3. – С. 90–96.
9. Шарапов В. М. Пьезокерамические преобразователи. Новые технологии проектирования / В.М. Шарапов, Ж. В. Сотула // Электроника НТБ. – 2012. – № 5. – С. 96–102.
10. Пат. 54009 Україна, МПК F02M 51/00. П'єзопривід / Кошовий М. Д., Стрілець О. О. – №u201004629 ; заяв. 19.04.2010 ; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.
11. Петренко С.Ф. П'єзоелектричний двигун в приладобудуванні : монографія / С. Ф. Петренко. – К. : Корнійчук, 2002. – 96 с.
12. Кухарчук В. В. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, Є.Т. Володарський, В. Ю. Кучерук, В. В. Грабко. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 522 с.
13. Рибіцький І. В. Математична модель узгоджуючого шару п'єзоперетворювача та розрахунок втрат енергії акустичних коливань при безконтактному способі вимірювання товщини / І.В. Рибіцький //

Методи та прилади контролю якості. – 2007. – № 18. – С. 46–51.

14. Безвесільна О. М. Чутливий елемент п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи / О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2012. – № 3-4. – С. 283–289.

15. Безвесільна О. М. Фізичні принципи роботи п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи / О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук // Вісник Інженерної академії України. – 2013. – № 2. – С. 18–21.

16. Фрайден, Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.

17. Безвесільна О.М. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи : монографія / О. М. Безвесільна, А.Г. Ткачук. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.

References

1. Bezvesilna O. M. Measurement of gravitational accelerations / O. M. Bezvesilna. – Zhytomyr: ZhITI, 2002. – 264 p.
2. Bezvesilna O. M. Piezoelectric gravimeter of aviation gravimetric system: monograph / O. M. Bezvesilna, A. G. Tkachuk. – Zhytomyr: ZhSTU, 2013. – 240 p.
3. Bezvesilnaya E. N. Gravimeter of aviation gravimetric system / E.N. Bezvesilnaya, A. G. Tkachuk, K. S. Kozko // The advanced science journal (USA). – 2013. – №4. – P. 41–46.
4. Bezvesilna O. M. Aviation gravimetric system for measuring anomalies of gravity acceleration / O. M. Bezvesilna, A. G. Tkachuk // Bulletin of ZhSTU / Technical sciences. – 2012. – №4 (63). – P. 61–65.
5. Sharapov V. M. Piezoelectric sensors / Sharapov V. M., Musienko M. P., Sharapova E. V. – Moscow: Technosphaera, 2006. – 632 p.
6. Sensors: Reference manual / [Sharapov V. M., Polishchuk E. S., Koshevoy N. D., etc.]; ed. V. M. Sharapova, E. S. Polishchuk. – Moscow: Technosphaera, 2012. – 624 p.
7. Piezoceramic transformers and sensors / V. M. Sharapov, I. G. Minaev, Zh. V. Sotula, K. V. Bazilo, L. G. Kunitskaya / ed. V. M. Sharapova. – Cherkasy: Vertical, 2010. – 278 p.
8. Sharapov V. M. Technologies for the synthesis of piezoceramic sensors / V. M. Sharapov // Bulletin of Cherkasy State Technological University. – 2010. – №3. – P. 90–96.
9. Sharapov V. M. Piezoceramic transducers. New design technologies / V. M. Sharapov, Zh. V. Sotula // NTB Electronics. – 2012. – №5. – P. 96–102.
10. Pat. 54009 Ukraine, IPC F02M 51/00. Piezo drive / Koshovy M. D., Sagittarius O. O. – №u201004629; application. 19.04.2010; publ. 25.10.2010, Bull. № 20.
11. Petrenko S. F. Piezoelectric engine in instrument making: monograph / S. F. Petrenko. – K.: Kornijchuk, 2002. – 96 p.
12. Kukharchuk V. V. Fundamentals of metrology and electrical measurements: tutorial / V. V. Kukharchuk, Ye. T. Volodarsky, V. Yu. Kucheruk, V. V. Grabko. – Vinnytsia: VNTU, 2012. – 522 p.
13. Rybitskyj I. V. Mathematical model of the matching layer of a piezoelectric transducer and calculation of energy losses of acoustic oscillations in the contactless method of thickness measurement / I. V. Rybitskyj // Methods and devices of quality control. – 2007. – №18. – P. 46–51.
14. Bezvesilna O. M. Sensitive element of the piezoelectric gravimeter of the aviation gravimetric system / O. M. Bezvesilna, A. G. Tkachuk // Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. – 2012. – №3-4. – P. 283–289.
15. Bezvesilna O. M. Physical principles of operation of the piezoelectric gravimeter of the aviation gravimetric system / O. M. Bezvesilna, AG Tkachuk // Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine. – 2013. – №2. – P. 18–21.
16. Freiden J. Modern sensors: Handbook / J. Freiden. – M.: Technosphaera, 2005. – 592 p.
17. Bezvesilna O. M. Piezoelectric gravimeter of aviation gravimetric system: monograph / O. M. Bezvesilna, A. G. Tkachuk. – Zhytomyr: ZhSTU, 2007. – 604 p.

БЕЗВЕСІЛЬНА О.М.
КИРИЧУК Ю.В.
ТКАЧУК А.Г.
НАЗАРЕНКО Н.М.

ORCID: 0000-0002-6951-1242
ORCID: 0000-0001-8638-6060
ORCID:0000-0003-2466-6299

o.bezvesilna@gmail.com
kirichuky@gmail.com
andru_tkachuk@ukr.net
N_Nazarenko@kpi.ua

Надійшла/Paper received : 13.04.2021 р. Надрукована/Printed : 02.06.2021 р.