

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

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

СТРУКТУРНА СХЕМА ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛУ ПРИСКОРЕННЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ У П'ЄЗОЕЛЕМЕНТІ

Робота присвячена ефективності роботи авіаційної гравіметричної системи, що значною мірою забезпечується вибором чутливого елемента системи – п'єзогравіметра, а саме перетворення та обробки сигналу прискорення сили тяжіння що знімається з чутливого елемента п'єзогравіметра. Розроблено структурну схему прямого перетворення сигналу із п'єзогравіметром для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння.

Ключові слова: п'єзогравіметр, п'єзоперетворювач, п'єзоелемент, прискорення сили тяжіння.

O. BEZVESILNA, Y. KYRYCHUK, N. NAZARENKO

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

STRUCTURAL SCHEMATIC OF CONVERSION OF THE GRAVITY ACCELERATION SIGNAL IN A PIEZOELECTRIC ELEMENT

The paper considers operational efficiency of the airborne gravimetric system, which is largely ensured by the choice of the sensor element of the system represented by the piezogravimeter, namely the conversion and processing of the gravity acceleration signal received from the sensor element of the piezogravimeter. The structural schematic of conversion of the gravity acceleration signal in the piezoelectric element of a new two-channel piezogravimeter is considered and described, and a method of compensating the input voltage by introducing negative feedback based on the inverse piezoelectric effect is proposed. Based on the known design of the sensor element of the piezogravimeter, a structural schematic of the conversion of the input gravity acceleration signal from the sensor element to the output voltage of the piezogravimeter was constructed. For the analysis and research of this structural schematic, the transfer function was obtained for each circuit. The paper describes the functioning and the obtained transfer functions of all structural schematic circuits, namely: the circuit responsible for converting the gravity acceleration acting on the elastic element into a mechanical stress; the circuit responsible for converting the mechanical stress into a charge emerging on the electrodes of the piezoelectric element; the circuit responsible for converting the charge on the electrodes of the piezoelectric element into voltage; the circuit corresponding to the transfer characteristic of the voltage amplifier that behaves like a first-order lag. Due to the tendency of the piezoelectric element to discharge, a negative feedback loop was added to the direct signal conversion schematic. It has been found that that the inaccuracy of the piezogravimeter, as well as of all piezoelectric converters, largely depends on the stability of the piezoelectric modulus and the electromechanical coupling factor when affected by destabilizing agents. It has been found that by reducing the harmonic voltage at the output of a closed system, negative feedback linearizes the system reducing thereby frequency deviations.

Key words: piezogravimeter, piezoelectric converter, piezoelectric element, gravity acceleration.

Точні знання аномалій гравітаційного поля Землі необхідні як у авіаційній і космічній техніці (корекція систем інерціальної навігації ракет, літаків, орбіт космічних літальних апаратів), так і в інших галузях науки і техніки – в геології, геофізиці, геодезії (розвідка корисних копалин, вивчення форми Землі тощо). Тому стає актуальним великомасштабне вивчення аномалій прискорення сили тяжіння (ПСТ).

Для визначення характеристик гравітаційного поля Землі може бути побудована авіаційна гравіметрична система (АГС), чутливим елементом якої є гравіметр. За допомогою АГС можна здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі набагато швидше та меншими витратами, ніж за допомогою наземних морських або сухопутних гравіметричних засобів. Дані про гравітаційне поле Землі, введені у пам'ять бортової цифрової обчислювальної машини (ЦОМ) АГС, суттєво сприятимуть підвищенню як точності визначення навігаційних параметрів, так і ефективності гравіметричної розвідки.

Ефективність роботи АГС значною мірою забезпечується вибором чутливого елемента системи – гравіметра. Сьогодні одними з перспективних вважають п'єзогравіметри. Побудова і дослідження АГС стало можливим завдяки розвитку і широкому застосуванню сучасних досягнень в області інерціальної навігації, прикладної теорії гіроскопів і гравіметрії.

У літературі [1–8] відсутні аналіз перетворення та обробки сигналу прискорення сили тяжіння що знімається з чутливого елемента п'єзогравіметра (ПГ). Тому метою даної роботи є надати такий аналіз та зробити необхідне дослідження.

Метою роботи є розробити структурну схему прямого перетворення сигналу із п'єзогравіметром (ПГ) для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння (ПСТ).

Будь-який засіб вимірювальної техніки, у тому числі й ПГ, прийнято розглядати як деякий перетворювач, що служить для перетворення вхідного сигналу у вихідний. У [8] розглянуто конструкцію нового ПГ, тому на її основі побудуємо структурну схему перетворення вхідного сигналу ПСТ у вихідну напругу ПГ (рис. 1). Аналіз даної схеми необхідний для визначення коефіцієнта $K_{ПГ}$ передачі ПГ [7].

У схемі, зображеній на рис. 1, ланці W_1 відповідає перетворення ПСТ g_z , що діє на ПЕ, у механічне напруження σ . Це механічне напруження чисельно рівне силі G , яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу ПЕ. Якщо напруження постійне на всій площі перерізу ПЕ S , то $\sigma = G/S$, а тому:

$$W_1 = \frac{\sigma}{G} = \frac{G}{S} \frac{1}{G} = \frac{1}{S}. \quad (1)$$

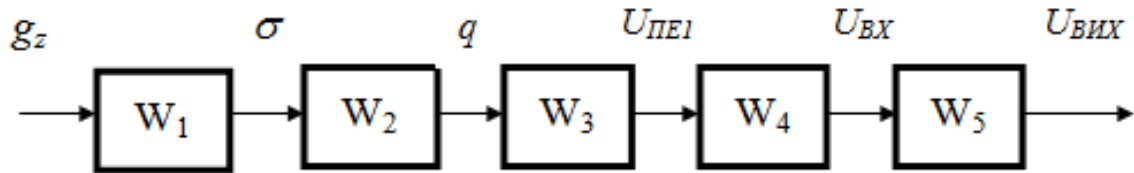


Рис. 1. Структурна схема прямого перетворення сигналу ПГ

Ланка W_2 відповідає перетворенню механічного напруження σ у заряд q на електродах п'єзоелемента (ПЕ):

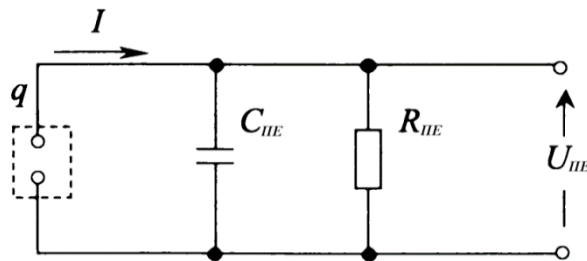
$$W_2 = \frac{q}{\sigma} = \frac{d_y \sigma S}{\sigma} = d_y S \quad (2)$$

де d_{ij} – п'єзомодуль.

Ланка W_3 відповідає перетворення заряду q у напругу на електродах ПЕ. Перетворення даного типу відображає схема на рис. 2.

У відповідності до схеми на рис. 2 для струму I можна записати:

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{U_{ПЕ}}{R_{ПЕ}} + C_{ПЕ} \frac{dU_{ПЕ}}{dt} \quad (3)$$

Рис. 2. Еквівалентна схема перетворення ланки W_3

Якщо прийняти нульові початкові умови, то розв'язок диференційного рівняння матиме вигляд:

$$U_{ПЕ} = \frac{q}{\left(1 + \frac{1}{j\omega R_{ПЕ} C_{ПЕ}}\right) C_{ПЕ}} \quad (4)$$

Звідси передатна функція буде дорівнювати:

$$W_3 = \frac{U_{ПЕ}}{q} = \frac{q}{q \cdot \left(1 + \frac{1}{j\omega R_{ПЕ} C_{ПЕ}}\right) C_{ПЕ}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{j\omega R_{ПЕ} C_{ПЕ}}\right) C_{ПЕ}} \quad (5)$$

Однак, враховуючи велике значення $R_{ПЕ}$, можна прийняти:

$$W_3 = \frac{1}{C_{ПЕ}} \quad (6)$$

Ланка структурної схеми W_4 описує процес, який проходить при появі напруги на ПЕ (передача $U_{ПЕ}$ у коло $U_{ВХ}$). Її передатна функція відповідає передатній функції видозмінюючої диференціюючої ланки, схема якої представлена на рис. 3. Тут $R_{ВХ}$ – вхідний опір підсилювача напруги. Враховуючи великий опір ПЕ, вхідна частина підсилювача представлена лише опором $R_{ВХ}$.

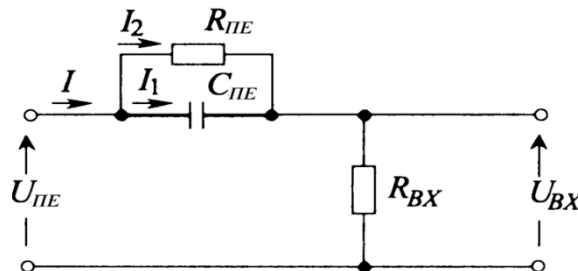


Рис. 3. Видозмінене диференціююче електричне коло

Для даної схеми можна записати:

$$U_{BX} = (I_1 + I_2) \cdot R_{BX}, \quad (7)$$

$$I_1 = C_{ПЕ} \frac{dU_{C_{ПЕ}}}{dt}, \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{U_{C_{ПЕ}}}{R_{ПЕ}}. \quad (9)$$

Після підстановки (8-9) у (7) отримаємо:

$$U_{BX} = (C_{ПЕ} \frac{dU_{C_{ПЕ}}}{dt} + \frac{U_{C_{ПЕ}}}{R_{ПЕ}}) R_{BX}. \quad (10)$$

Відповідно до закону Кірхгофа, маємо:

$$U_{C_{ПЕ}} = I_2 R_{ПЕ} = U_{ПЕ} - U_{BX}. \quad (11)$$

Підставивши (11) у (10) отримаємо:

$$U_{BX} = C_{ПЕ} R_{BX} \frac{d(U_{ПЕ} - U_{BX})}{dt} + \frac{R_{BX}}{R_{ПЕ}} (U_{ПЕ} - U_{BX}). \quad (12)$$

Для подальших розрахунків введемо коефіцієнт:

$$\varepsilon_R = \frac{R_{ПЕ} + R_{BX}}{R_{BX}} \quad (13)$$

Поділимо вираз (12) на коефіцієнт ε_R :

$$\frac{U_{BX}}{\varepsilon_R} = \frac{C_{ПЕ} R_{BX}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{ПЕ}}{dt} - \frac{C_{ПЕ} R_{BX}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} + \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{R_{BX}}{R_{ПЕ}} U_{ПЕ} - \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{R_{BX}}{R_{ПЕ}} U_{BX}. \quad (14)$$

Згрупуємо члени рівняння (13) та позбудемося знаменника $R_{ПЕ}$:

$$\frac{R_{ПЕ} U_{BX}}{\varepsilon_R} + \frac{R_{BX}}{\varepsilon_R} U_{BX} + \frac{C_{ПЕ} R_{BX} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} = \frac{C_{ПЕ} R_{BX} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{ПЕ}}{dt} + \frac{R_{BX}}{\varepsilon_R} U_{ПЕ}, \quad (15)$$

$$\frac{(R_{ПЕ} + R_{BX}) U_{BX}}{\varepsilon_R} + \frac{C_{ПЕ} R_{BX} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} = \frac{C_{ПЕ} R_{BX} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{ПЕ}}{dt} + \frac{R_{BX}}{\varepsilon_R} U_{ПЕ}, \quad (16)$$

$$R_{BX} U_{BX} + \frac{C_{ПЕ} R_{BX} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} = \frac{C_{ПЕ} R_{BX} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{ПЕ}}{dt} + \frac{R_{BX}}{\varepsilon_R} U_{ПЕ}, \quad (17)$$

$$R_{BX} (U_{BX} + \frac{C_{ПЕ} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt}) = R_{BX} (\frac{C_{ПЕ} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{ПЕ}}{dt} + \frac{1}{\varepsilon_R} U_{ПЕ}), \quad (18)$$

$$U_{BX} + \frac{C_{ПЕ} R_{ПЕ}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} = \frac{1}{\varepsilon_R} (C_{ПЕ} R_{ПЕ} \cdot \frac{dU_{ПЕ}}{dt} + U_{ПЕ}). \quad (19)$$

Позначимо постійну часу $\tau = R_{ПЕ} C_{ПЕ}$. Після підстановки постійної часу у рівняння (19) та введення оператора Лапласа, отримаємо:

$$(1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p) U_{BX} = \frac{1}{\varepsilon_R} (1 + \tau p) U_{ПЕ}. \quad (20)$$

Звідси передатна функція W_4 буде дорівнювати:

$$W_4(p) = \frac{U_{BX}}{U_{ПЕ}} = \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p}. \quad (21)$$

Ланка W_5 відповідає передатній характеристиці підсилювача напруги [7], яка поводить себе, як інерційна ланка першого порядку:

$$W_5(p) = \frac{K_{ОП}}{1 + p\tau_{ОП}}, \tag{22}$$

де $K_{ПО}$ – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача; $\tau_{ОП}$ – постійна часу.

Однак, враховуючи роботу перетворювача переважно у вузькому діапазоні частот, передатну характеристику можна приврівняти лише до коефіцієнта підсилення:

$$W_5 = K_{ОП}. \tag{23}$$

Отже, передатна функція $W_{np}(p)$ сигналу у ПЕ матиме вигляд:

$$W_{np}(p) = W_1 W_2 W_3(p) W_4(p) W_5 = d_{ij} \cdot \frac{1}{C_{ПЕ}} \cdot \frac{1}{\epsilon_R} \cdot \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\epsilon_R} p} \cdot K_{ОП}. \tag{24}$$

Однак, ПЕ має схильність розряджатись, тому до схеми прямого перетворення сигналу необхідно додати контур від’ємного зворотного зв’язку. Схема п’єзоперетворювача матиме наступний вигляд (рис. 4) і буде складатись із ПЕ та підсилювача напруги. На ПЕ нанесені три електроди 1,2 та 3. Перший електрод підключений до входу підсилювача, другий – до загального проводу схеми, а третій, додатковий електрод, – до виходу підсилювача напруги.

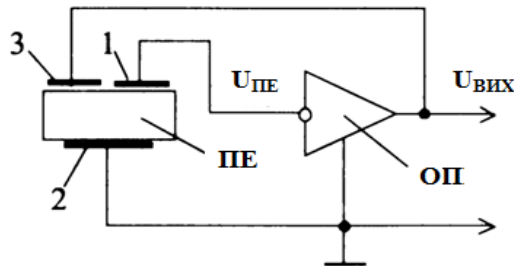


Рис. 4. ПГ зі зворотним від’ємним зв’язком: 1,2,3 – електроди; ОП – операційний підсилювач напруги; ПЕ – п’єзоелемент

Структурна схема такого п’єзоперетворювача показана на рис. 5.

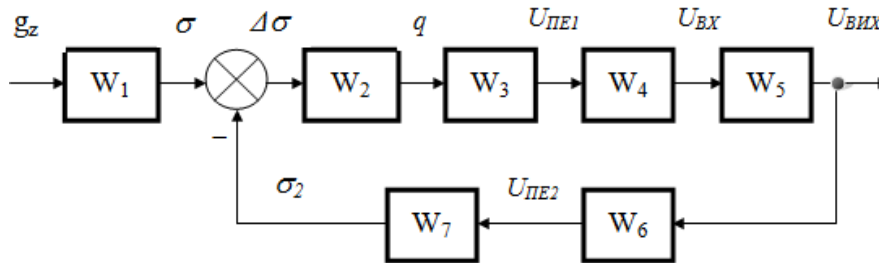


Рис. 5. Структурна схема ПГ з електромеханічним зворотним зв’язком

Ланка W_6 описує процес, який є оберненим до процесу ланки W_4 та проходить під час підведення напруги від підсилювача до додаткового електрода ПЕ. Еквівалентна схема цього процесу представлена на рис. 6. Тут $R_{ВИХ}$ – вихідний опір операційного підсилювача.

Розв’язуючи по аналогії до вирішення для ланки W_4 , отримаємо:

$$W_6(p) = \frac{U_{ПЕ2}}{U_{ВИХ}} = \gamma_R \frac{(1 + \frac{\tau}{\gamma_R} p)}{(1 + \tau p)}, \tag{25}$$

де $\gamma_R = (R_{ПЕ} + R_{ВИХ})/R_{ВИХ}$; $\tau = R_{ПЕ} C_{ПЕ}$.

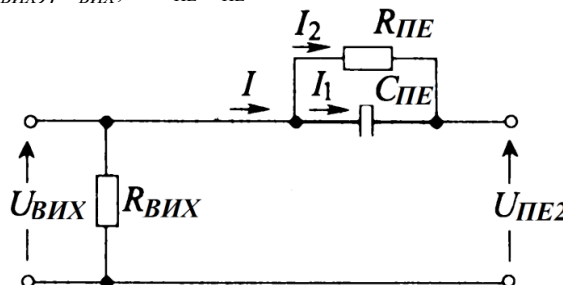


Рис. 6. Видозмінений диференціюючий ланцюг (ланка W_6)

Ланка W_7 відповідає перетворюванню напруги $U_{ПЕ2}$ у механічне напруження σ_2 . Оскільки $\sigma_2 = Yd_{ij}U_{ПЕ2} / l$, то

$$W_7(p) = \frac{\sigma_2}{U_{ПЕ2}} = \frac{Yd_{ij}U_{ПЕ2}}{U_{ПЕ2} \cdot l} = \frac{Yd_{ij}}{l}, \quad (26)$$

де Y – модуль Юнга; l – довжина ПЕ.

Отже, коефіцієнт передачі $K_{ПГ}$ ПГ дорівнюватиме:

$$K_{ПГ}(p) = \frac{W_1 W_2 W_3(p) W_4(p) W_5(p)}{1 + W_2 W_3(p) W_4(p) W_5(p) W_6(p) W_7} = W_1 \frac{W(p)}{1 + W(p) Z(p)}, \quad (37)$$

де W_1 – передатна функція, яка відповідає за перетворення сили $G \equiv m \cdot g_z$ у механічне напруження; $W(p) = W_2 W_3(p) W_4(p) W_5(p)$ – коефіцієнт передачі ланцюга прямого перетворення ПСТ, охопленого від’ємним зворотним зв’язком; $Z(p) = W_6(p) W_7$ – коефіцієнт передачі ланцюга від’ємного зворотного зв’язку.

Підставивши всі значення часткових передатних функцій ПЕ у (37), отримаємо:

$$K_{ПГ}(p) = \frac{1}{s} \left[\frac{d_{ij} S \frac{1}{C_{ПЕ}} \frac{1}{\varepsilon_{R1}} \frac{1+\tau p}{\varepsilon_R} K_{ОП}}{1 + d_{ij} S \frac{1}{C_{ПЕ}} \frac{1}{\varepsilon_{R1}} \frac{1+\tau p}{\varepsilon_R} K_{ОП} \gamma_R \frac{(1+\frac{\tau}{YR} p) Y d_{ij}}{(1+\tau p) l}} \right]. \quad (28)$$

Оскільки ланки W_4 та W_6 описують процеси, які є оберненими один до одного, то припустимо, що їх добуток буде приблизно дорівнювати одиниці, а формула (38) матиме вигляд:

$$K_{ПГ}(p) = \frac{1}{s} \left[\frac{d_{ij} S \frac{1}{C_{ПЕ}} \frac{1}{\varepsilon_{R1}} \frac{1+\tau p}{\varepsilon_R} K_{ОП}}{1 + d_{ij} S \frac{1}{C_{ПЕ}} K_{ОП} \frac{Y d_{ij}}{l}} \right]. \quad (29)$$

Похибка ПГ, як і всіх п’єзоперетворювачів значною мірою залежить від стабільності п’єзомодуля та коефіцієнта електромеханічного зв’язку під впливом дестабілізуючих факторів. Тому, як показано у [8], для її мінімізації вводять наступну умову:

$$W(p) \cdot Z(p) \approx 1. \quad (30)$$

Із умови (30) видно, що добуток коефіцієнта передачі ланцюга прямого перетворення, охопленого від’ємним зворотним зв’язком, на коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв’язку дорівнює одиниці. Це є принципіальною відмінністю нового ПГ від відомих вимірвальних систем, у яких дана умова має вигляд:

$$W(p) \cdot Z(p) \rightarrow \infty. \quad (31)$$

Однак на практиці добуток $W(p) \cdot Z(p)$ може дещо відрізнятись від одиниці, бо ці коефіцієнти залежать також від форми, розмірів та просторового розташування електродів, а також від утворених у каналах передачі п’єзоелемента додаткових електричних полів. Новий ПГ працює в області низьких частот, відповідно введений зворотний зв’язок, що є залежним від частоти. Таким чином, параметри зворотного зв’язку можуть суттєво змінювати властивості ПГ, його частотні та перехідні характеристики, при цьому як зменшуючи, так і збільшуючи його власну частоту. Оскільки власна частота ПГ повинна бути відносно низькою, рівною 0,1 рад/с, а добротність максимальною, тому підбираємо тільки параметри $R_{ВНХ}$ та $R_{ВХ}$ за відповідними критеріями.

Введення від’ємного зворотнього зв’язку суттєво впливає на нелінійні відхилення системи. Це можна показати по формулі:

$$U_{2k}^* = \frac{U_{2k}}{1 + W(p) \cdot Z(p)}, \quad (32)$$

де U_{2k}^* – напруга відповідної гармоніки на виході перетворювача; U_{2k} – напруга відповідної гармоніки на вході перетворювача із від’ємним зворотнім зв’язком.

Таким чином, зменшуючи напругу гармонік на виході замкненої системи, від’ємний зворотній зв’язок лінеалізує систему, зменшуючи тим самим частотні відхилення.

Висновки

Розглянуто та описано структурну схему перетворення сигналу ПСТ у п’єзоелементі нового ДПГ та запропоновано спосіб компенсації вхідного напруження шляхом введення від’ємного зворотного зв’язку на основі зворотного п’єзо ефекту. Визначено коефіцієнт передачі ПЕ, виготовленого із ніобату літію, який складає 1,682.

Література

1. Безвесільна О.М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів : підручник / О. М. Безвесільна, Г. С. Тимчик. – Житомир : ЖДТУ, 2012. – 812 с.
2. Янчич В.В. Пьезоелектрические датчики вибрационного и ударного ускорения : учеб. пособие / В. В. Янчич. – Ростов-на-Дону, 2008. – 77 с.
3. Безвесільна О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри : монографія / О.М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
4. Tkachuk A. H. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter / A.H. Tkachuk, E.N. Bezvesilnaya // Aviation. – 2014. – Vol. 18, Issue 3. – P. 134–140. – DOI : 10.3846/16487788.2014.9698785.
5. Безвесільна О. М. Системи керування навігаційних систем рухомих об'єктів : монографія / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, С.С. Ткаченко. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – 153 с.
6. Безвесільна О.М. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем (Технологічні вимірювання та прилади) : навчальний посібник для студентів приладобудівних спец. ВНЗ / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук ; Житомир. держ. технол. ун-т. – Житомир : ЖДТУ, 2008. – 172 с.
7. Безвесільна О.М. Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин : підручник / Безвесільна О.М., Тимчик Г.С., Подчашинський Ю.О. – Житомир : ЖДТУ, 2011. – 976 с.
8. Безвесільна О.М. Вимірювання прискорень / О. М. Безвесільна. – К. : Либідь, 2001. – 261 с.

References

1. Bezvesilna O.M. Tekhnolohichni vymiriuvannia ta prylady. Peretvoriuiuchi prystroi pryladiv : pidruchnyk / O. M. Bezvesilna, H. S. Tymchuk. Zhytomyr : ZhDTU, 2012. 812 s.
2. Yanchich V.V. Pezoelektricheskie datchiki vibracionnogo i udarnogo uskoreniya : ucheb. posobie / V. V. Yanchich. – Rostov-na-Donu, 2008. – 77 s.
3. Bezvesilna O.M. Aviatsiini hravimetrychni systemy ta hravimetry : monohrafiia / O.M. Bezvesilna. – Zhytomyr : ZhDTU, 2007. – 604 s.
4. Tkachuk A. H. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter / A.H. Tkachuk, E.N. Bezvesilnaya // Aviation. – 2014. – Vol. 18, Issue 3. – P. 134–140. – DOI : 10.3846/16487788.2014.9698785.
5. Bezvesilna O. M. Systemy keruvannia navihatsiinykh system rukhomykh ob'ektiv : monohrafiia / O.M. Bezvesilna, Yu.V. Kyrychuk, S.S. Tkachenko. – Zhytomyr : ZhDTU, 2010. – 153 s.
6. Bezvesilna O.M. Peretvoriuiuchi prystroi pryladiv ta kompiuteryzovanykh system (Tekhnolohichni vymiriuvannia ta prylady) : navchalnyi posibnyk dla studentiv pryladobudivnykh spets. VNZ / O.M. Bezvesilna, Yu.V. Kyrychuk ; Zhytomyr. derzh. tekhnol. un-t. – Zhytomyr : ZhDTU, 2008. – 172 s.
7. Bezvesilna O.M. Naukovi doslidzhennia v haluzi vymiriuvannia mekhanichnykh velychyn : pidruchnyk / Bezvesilna O.M., Tymchuk H.S., Podchashynskiy Yu.O. Zhytomyr : ZhDTU, 2011. 976 s.
8. Bezvesilna O.M. Vymiriuvannia pryskoren / O. M. Bezvesilna. – K. : Lybid, 2001. – 261 s.

Надійшла / Paper received : 20.10.2020

Надрукована/Printed : 27.11.2020