УДК 004.93

Д.В. МОСЬПАН, О.О. ЮРКО
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

# КОРИГУВАННЯ ПОХИБОК ОСЬОВОГО ЗМІЩЕННЯ ЦИФРОВОГО МАГНІТОМЕТРА ЗАСОБАМИ LABVIEW

*За використання триосьового MEMS (мікроелектромеханічої системи) цифрового магнітометра в робочому електромагнітному оточенні постає необхідність калібрування даного приладу. У нашій роботі використовується модуль GY-273 на мікросхемі QMC5883L. Для цього можна використати декілька програм, що дозволяють розрахувати поправочні коефіцієнти, що враховують два основні види завад – hard-iron і soft-iron distortions. Найбільш поширений спосіб калібрування магнітометра ellipsoid fitting – обертання датчика в усіх напрямках для отримання належної кількості даних, які вкладаються на поверхню сфероїда. Поправочні коефіцієнти дозволяють перетворити сфероїд на правильну сферу із центром у початку координат. Але використання даних методів калібрування, наприклад за допомогою програми "Magneto", не завжди дає бажаний результат. Похибка вимірювання може залишитися досить суттєвою і потребує додаткового корегування. Під час проведення калібрувальних вимірювань в умовах зовнішніх магнітних впливів трапляються ситуації, коли у просторі вимірювальних даних координатні осі не є взаємно перпендикулярними й не мають загальної точки перетинання. Виміряні значення компонентів, що надходять із датчика, є окремими векторами, які мають власні відхилення від осей, як щодо початку координат, так і щодо кутів нахилу. У роботі запропоновані залежності для розрахунку корегувальних матриць, що враховують особливості розташування вимірювальних осей у просторі. На відміну від наявних методів корекції, ураховуються зсуви центрів відрізків кожної з осей за кожною координатою, тобто матриця зсуву має розмірність 3 × 3. Це дозволяє впливати на похибку вимірювання. Також розроблено комплекс віртуальних приладів для візуалізації процесу калібрування, отримання корегувальних матриць на основі отриманих аналітичних залежностей і обробку даних магнітометра в реальному часі за запропонованим алгоритмом. Розроблений комплекс може бути використаний в навчальному процесі для лабораторного практикуму для калібрування триосьових сенсорів і візуалізації тривимірного вимірювального простору.*

***Ключові слова:*** *магнітометр, зміщення осей, коригувальні матриці, віртуальний прилад, LabVIEW.*

D.V. MOSPAN, O.O. YURKO
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

# CORRECTION OF AXIAL DISPLACEMENT ERRORS OF A DIGITAL MAGNETOMETER USING LABVIEW

*When using a three-axis MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems), digital magnetometer, in a working electromagnetic environment, it is necessary to calibrate this device. In our case, the GY-273 module on the QMC5883L chip is used. For this, you can use several programs that allow you to calculate correction factors that take into account two main types of interference – hard-iron and soft-iron distortions. The most common method of calibrating a magnetometer is ellipsoid fitting – rotating the sensor in all directions to obtain a sufficient amount of data that is placed on the surface of the spheroid. Correction factors allow you to transform the spheroid into a regular sphere with the center at the origin. But using these calibration methods, for example, using the Magneto program, does not always give the desired result. The measurement error can remain quite significant and requires additional correction. When performing calibration measurements under conditions of external magnetic influences, situations arise when the coordinate axes in the space of measurement data are not mutually perpendicular and do not have a common intersection point. At the same time, the measured values of the components coming from the sensor are separate vectors that have their own deviations from the axes, both relative to the origin of coordinates and relative to the angles of inclination. In this work, dependencies are proposed for calculating correction matrices that take into account the features of the location of the measuring axes in space. Unlike existing correction methods, the shifts of the centers of the segments of each axis along each coordinate are taken into account, i.e. the shift matrix has a dimension of 3 × 3. This allows you to influence the measurement error. A set of virtual devices has also been developed for visualizing the calibration process, obtaining correction matrices based on the obtained analytical dependencies and processing magnetometer data in real time according to the proposed algorithm. The developed complex can be used in the educational process for laboratory practice for calibrating three-axis sensors and visualizing the three-dimensional measuring space.*

***Key words:*** *magnetometer, axis offset, correction matrices, virtual device, LabVIEW.*

## Постановка проблеми

У наш час цифрові MEMS (мікроелектромеханічні системи) магнітометри широко використовуються в разі необхідності визначення положення рухомих об'єктів у просторі. Дані прилади є дуже чутливими, наявність зовнішніх магнітних полів суттєво впливає на точність

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-12

вимірювань, що зумовлює обов'язкову процедуру калібрування датчика. Під час проведення калібрувальних вимірювань в умовах зовнішніх магнітних впливів трапляються ситуації, коли у просторі вимірювальних даних координатні осі не є взаємно перпендикулярними й не мають загальної точки перетинання. Виміряні значення компонентів, що надходять із датчика, є окремими векторами, які мають власні відхилення від осей, як щодо початку координат, так і щодо кутів нахилу. У такій ситуації виникає додаткова похибка вимірювань, що потребує корекції.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Під час використання триосьового MEMS цифрового магнітометра [1] в робочому електромагнітному оточенні постає необхідність калібрування даного приладу. У нашому випадку використовується модуль GY-273 на мікросхемі QMC5883L [2]. Для цього можна використати декілька програм, що дозволяють розрахувати поправочні коефіцієнти, що враховують два основні види завад – hard-iron і soft-iron distortions. Найбільш поширений спосіб калібрування магнітометра ellipsoid fitting [3] – обертання датчика в усіх напрямках для отримання належної кількості даних, які вкладаються на поверхню сфероїда. Поправочні коефіцієнти дозволяють перетворити сфероїд на правильну сферу із центром у початку координат. Але використання даних методів калібрування, наприклад за допомогою програми "Magneto", не завжди дає бажаний результат. Похибка вимірювання може залишитися досить суттєвою і потребує додаткового корегування.

## Мета дослідження

Метою роботи є розроблення методики розрахунку корегувальних матриць, що враховують особливості розташування вимірювальних осей у просторі. На відміну від існуючих методів корекції, ураховуються зсуви центрів відрізків кожної з осей за кожною з координат, що дозволяє зменшити похибку вимірювання.

## Виклад основного матеріалу дослідження

Створимо стенд для вимірювання та збереження даних [4–7] за обертання магнітометра у трьох площинах за двох положень датчика в кожному з них: XYup (вісь Z спрямована вгору), XYdown (вісь Z спрямована вниз), ZYup (вісь X спрямована вгору), ZYdown (вісь X спрямована вниз), XZup (вісь Y спрямована вгору), XZdown (вісь Y спрямована вниз).

Датчик магнітометра разом із модулем акселерометра було підключено до плати WVACAT, яка використовується лише для передавання даних від датчиків до порту USB комп'ютера. Було створено віртуальний прилад у середовищі "Labview" [8–10] для візуалізації та збереження матриці координат даних у текстовому форматі в окремий файл. Лицьова панель створеного віртуального приладу (далі – ВП) зображена на рис. 1.

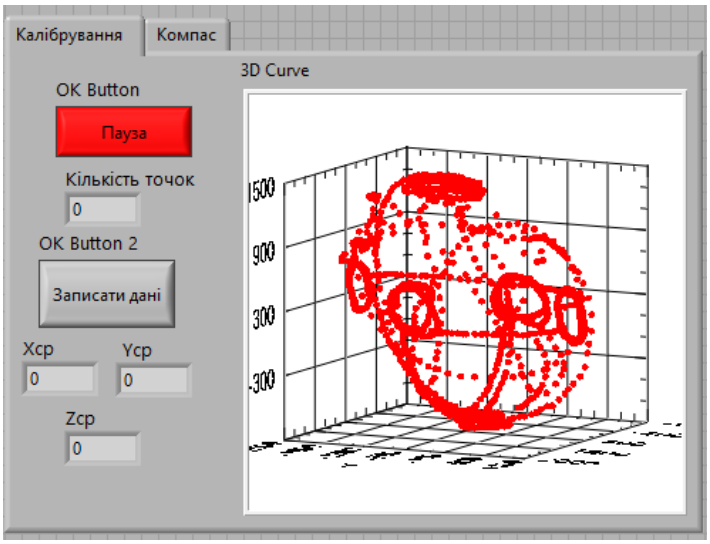


**Рис. 1. Лицьова панель ВП для візуалізації та збереження даних**

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-12

Розглянемо масиви даних, отриманих під час обертання датчика у площині ZY. Масиви точок утворюють кола в діаметрально протилежних площинах щодо центру сфероїда. Центри утворених кіл визначаємо так:

– визначаємо максимальні та мінімальні значення з масивів за окремими координатами: $X_{max}$, $X_{min}$; $Y_{max}$, $Y_{min}$; $Z_{max}$, $Z_{min}$;

– розраховуємо середні значення, які й будуть координатами центра кола $O_1$, що розташоване у площині датчика зі спрямуванням осі X вгору:

$$x_1 = \frac{X_{max} + X_{min}}{2}, \; y_1 = \frac{Y_{max} + Y_{min}}{2}, \; z_1 = \frac{Z_{max} + Z_{min}}{2};$$

– відповідні позначення координат центра кола $O_2$, що розташоване у площині датчика зі спрямуванням осі X униз: $x_2$, $y_2$, $z_2$.

Якщо з'єднати центри кіл ($x_1$, $y_1$, $z_1$) та ($x_2$, $y_2$, $z_2$), то отримаємо вісь X вимірювальної системи, дана вісь не паралельна відповідній осі, що прив'язана до системи координат магнітометра (рис. 2).

Центр даного відрізка $O_1O_2$ буде початком координат вимірювальної осі X:

$$x_0 = \frac{x_1 + x_2}{2}, \; y_0 = \frac{y_1 + y_2}{2}, \; z_0 = \frac{z_1 + z_2}{2}.$$

Косинуси нахилу відрізка $O_1O_2$ розраховуються за формулами:

$$\cos\alpha_x = \frac{x_2 - x_1}{L}, \; \cos\beta_x = \frac{y_2 - y_1}{L}, \; \cos\gamma_x = \frac{z_2 - z_1}{L},$$

де $L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$ – довжина вектора $O_1O_2$.

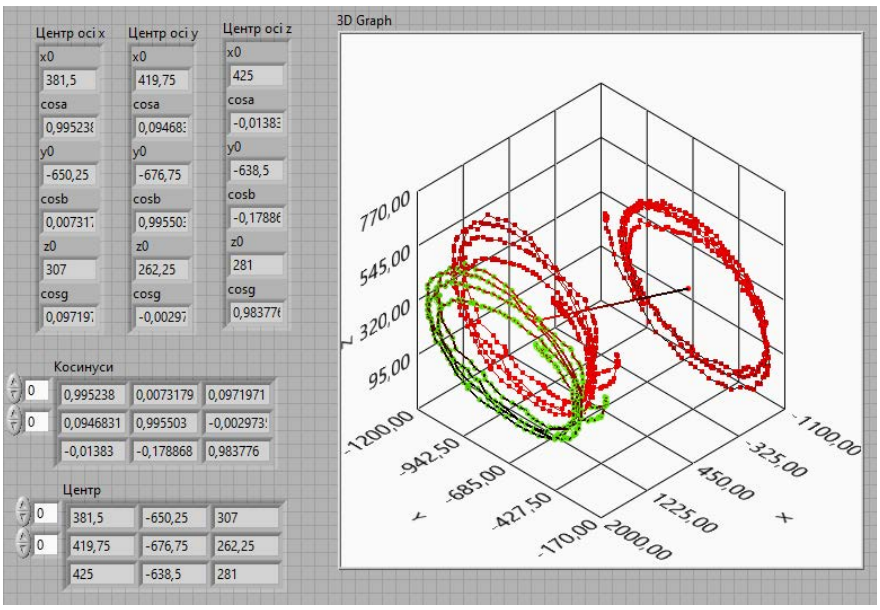


**Рис. 2. Лицьова панель ВП для визначення розташування осей вимірювання у просторі**

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-12

Наведені розрахунки оформлені окремим віртуальним приладом і проводяться в середині вузла Formula Node. Вхідними даними є масиви координат за вимірювання у протилежних площинах up і down, а вихідними даними є координати центра відрізка вимірювальної осі, косинусів кутів нахилу, центрів масивів виміряних даних.

Аналогічні результати дає обробка даних із площин ZX і XY. З'єднання центрів кіл дають відповідні осі Y та Z. У результаті маємо довільно розташовані, не взаємно перпендикулярні лінії, що не перетинаються у просторі, як показано на рис. 3.

У такому разі виміряні значення проєкцій вектора магнітного поля розташовані довільно у просторі, тому кожна проєкція буде розкладатися за осями координат на свої підпроєкції. Отже, результуючий вектор магнітного поля буде складатися з векторної суми виміряних проєкцій і визначається сумами підпроєкцій за осями координат.

Розрахунки, проведені для осі X, необхідно провести і для інших осей. У результаті будуть відомі матриці косинусів нахилу осей і відповідні центри відрізків, які можуть бути об'єднані в матриці:

$$\begin{pmatrix} \cos\alpha_x & \cos\beta_x & \cos\gamma_x \\ \cos\alpha_y & \cos\beta_y & \cos\gamma_y \\ \cos\alpha_z & \cos\beta_z & \cos\gamma_z \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_{0x} & y_{0x} & z_{0x} \\ x_{0y} & y_{0y} & z_{0y} \\ x_{0z} & y_{0z} & z_{0z} \end{pmatrix}.$$

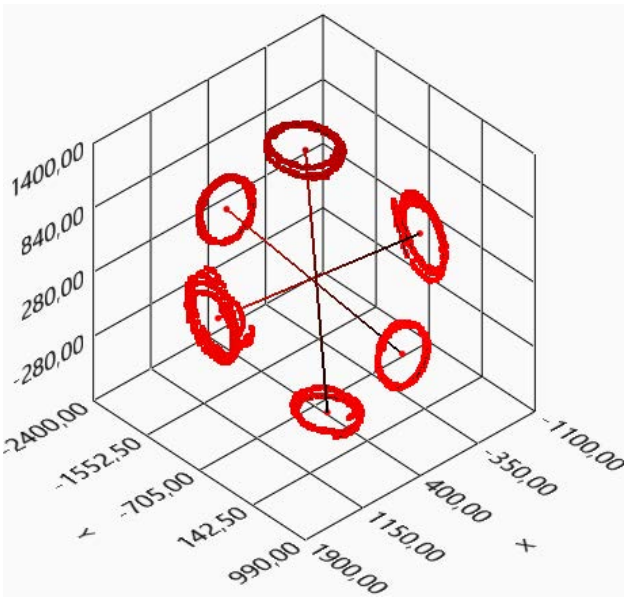


**Рис. 3. Розташування у просторі вимірювальних осей**

Тоді коригування координат (x', y', z') довільної точки (x, y, z) із простору вимірювальних даних можна представити так:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x\cdot\cos\alpha_x & x\cdot\cos\beta_x & x\cdot\cos\gamma_x \\ y\cdot\cos\alpha_y & y\cdot\cos\beta_y & y\cdot\cos\gamma_y \\ z\cdot\cos\alpha_z & z\cdot\cos\beta_z & z\cdot\cos\gamma_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{0x} & y_{0x} & z_{0x} \\ x_{0y} & y_{0y} & z_{0y} \\ x_{0z} & y_{0z} & z_{0z} \end{pmatrix}.$$

Для візуалізації вхідних даних отриманих у результаті обертання в різних площинах, відображення розрахованих відрізків осей, розрахунку корегувальних матриць і корекції довільних координат магнітного вектора було створено віртуальний прилад, блок-схема якого наведена на рис. 4.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-12

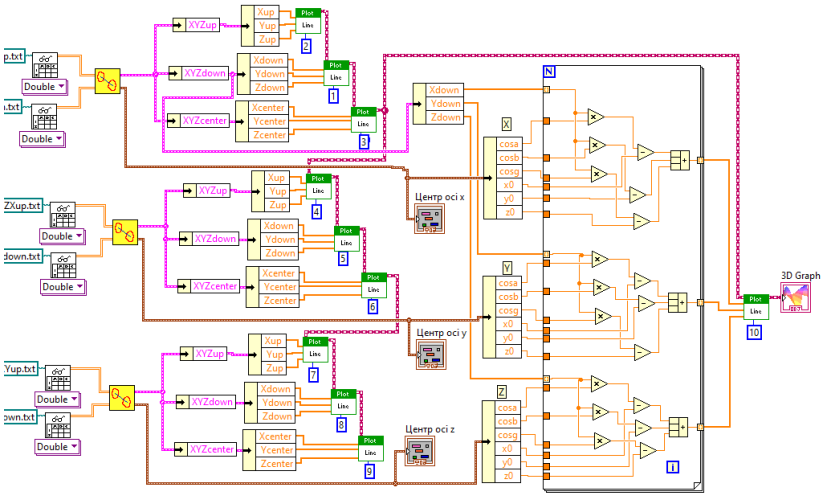


**Рис. 4. Блок-схема для розрахунку корегувальних матриць осей і корекції довільних координат магнітного вектора**

Результати роботи даного ВП наведені на рис. 2 та 3. На рис. 2 показані розраховані корегувальні матриці косинусів і центрів відрізків осей. На 3D-графіку зеленим кольором показано перерахунок і відповідне зміщення точок координат площини ZYup.

Віртуальний прилад, наведений на рис. 5, корегує дані вимірювань магнітометра на основі отриманих матриць у режимі реального часу.

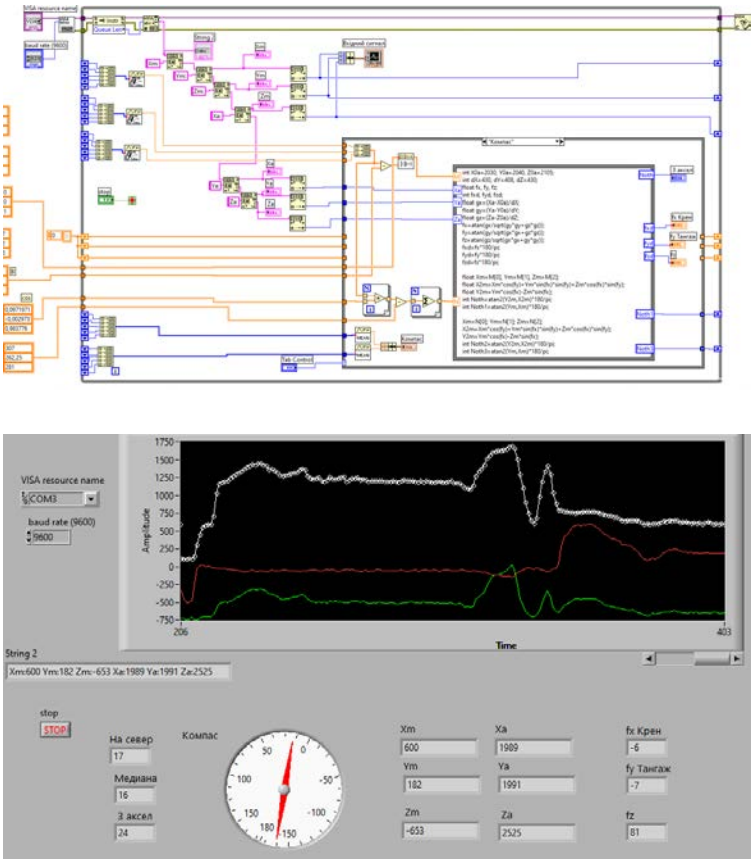


**Рис. 5. Фрагмент блок-схеми віртуального приладу та його лицева панель для обробки та корекції даних магнітометра**

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-12

## Висновки

У результаті проведеної роботи встановлено таке:

1. Під час проведення калібрувальних вимірювань в умовах зовнішніх магнітних впливів трапляються ситуації, коли у просторі вимірювальних даних координатні осі не є взаємно перпендикулярними й не мають загальної точки перетинання. Водночас виміряні значення компонентів, що надходять із датчика, є окремими векторами, які мають власні відхилення від осей, як щодо початку координат, так і щодо кутів нахилу.

2. Запропоновані залежності для розрахунку корегувальних матриць, що враховують особливості розташування вимірювальних осей у просторі. На відміну від наявних методів корекції, ураховуються зсуви центрів відрізків кожної з осей за кожною координатою, тобто матриця зсуву має розмірність 3 × 3. Це дозволяє зменшити похибку вимірювання.

3. Розроблено комплекс віртуальних приладів для візуалізації процесу калібрування, отримання корегувальних матриць на основі отриманих аналітичних залежностей і оброблення даних магнітометра в реальному часі за запропонованим алгоритмом.

## Список використаної літератури

1. Теслюк В.М. Моделі та інформаційні технології синтезу мікроелектромеханічних систем: монографія. Львів : Видавництво ПП «Вежа і Ко», 2008. 192 с.
2. 3-Axis Magnetic Sensor QMC5883L. URL: https://www.tinytronics.nl/image/data/Producten/Sensoren/Magnetisch%20veld/Datasheet-QMC5883L-1.0%20.pdf (дата звернення: 09.12.2024).
3. Cheng Chi, Jun-Wei Lv., Dan Wan A. Calibration Method of Three-axis Magnetic Sensor Based on Ellipsoid Fitting. *Journal of Information and Computational Science*. 2013. № 10(6). P. 1551–1558. DOI: 10.12733/jics20101833.
4. Чорний О.П., Родькін Д.Й., Євстіфєєв В.О., Перекрест А.Л. Віртуальні лабораторні комплекси для навчального процесу і наукових досліджень. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2008. Вип. 3 (50). С. 28–42.
5. Мосьпан Д.В., Юрко О.О., Перекрест А.Л., Кухаренко Д.В., Вадурін К.О., Повниця С. Візуальна фіксація руху об’єкта засобами Labview при проведенні фізичного експерименту. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2023. Вип. 4 (141). С. 29–35. DOI: 10.32782/1995-0519.2023.4.12.
6. Юрко О.О., Мосьпан Д.В., Перекрест А.Л. Бінарізація зображення для виявлення об’єкта в умовах неоднорідного фону засобами Labview. *Прикладні питання математичного моделювання :* науковий журнал. 2023. Том 6. № 2. С. 95–113. DOI: 10.32782/mathematical-modelling/2023-6-2-13c.
7. Мосьпан Д.В., Юрко О.О., Перекрест А.Л., Кухаренко Д.В., Вадурін К.О. Комп’ютеризований практикум з моделювання фізичних процесів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2022. Вип. 6 (137). С. 29–35. DOI: 10.32782/1995-0519.2022.6.3.
8. National Instruments: офіційний сайт. URL: http://www.ni.com/ (дата звернення: 09.12.2024).
9. LabVIEW Programming Reference Manual: офіційний сайт. URL: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/menus/default/root-mnu.html (дата звернення: 09.12.2024).
10. LabVIEW User Manual. URL: https://download.ni.com/support/manuals/ 320999b.pdf (дата звернення: 09.12.2024).

## References

1. Tesliuk, V.M. (2008). Modeli ta informatsiini tekhnolohii syntezu mikroelektromekhanichnykh system: monohrafiia [Models and information technologies for microelectromechanical system synthesis]. Lviv : Vydavnytstvo PP «Vezha i Ko». 192 s. [in Ukrainian].

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-12

2. 3-Axis Magnetic Sensor QMC5883L. Retrieved from: https://www.tinytronics.nl/image/data/Producten/Sensoren/Magnetisch%20veld/Datasheet-QMC5883L-1.0%20.pdf [in English].
3. Cheng, Chi, Jun-Wei, Lv., & Dan Wan, A. (2013). Calibration Method of Three-axis Magnetic Sensor Based on Ellipsoid Fitting. *Journal of Information and Computational Science*, 10 (6), 1551–1558 DOI: 10.12733/jics20101833 [in English].
4. Chorny, O.P., Rodkin, D.Y., Evstifeev, V.O., & Perekrest, A.L. (2008). Virtual'ni laboratorni kompleksy dlya navchal'noho protsesu i naukovykh doslidzhen' [Virtual laboratory complexes for the educational process and scientific research]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhayla Ostrohradskoho*, 3 (50), 28–42 [in Ukrainian].
5. Mospan, D., Yurko, O., Perekrest, A., Kukharenko, D., Vadurin, K., & Povnytsia, S. (2023). Vizual'na fiksatsiya rukhu ob'yekta zasobamy Labview pry provedenni fizychnoho eksperymentu [Visual fixation of object movement using Labview tools during a physical experiment]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhayla Ostrohradskoho*. 4 (141), 29–35. DOI: 10.32782/1995-0519.2023.4.12 [in Ukrainian].
6. Yurko, O.O., Mospan, D.V., & Perekrest, A.L. (2023). Binarizatsiia zobrazhennia dlia vyiavlennia obiekta v umovakh neodnoridnoho fonu zasobamy Labview [Image binarization to find an object in conditions of an inhomogeneous background using Labview]. *Naukovyi zhurnal "Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia"*, 6, 2, 95–113. DOI: 10.32782/mathematical-modelling/2023-6-2-13s [in Ukrainian].
7. Mospan, D.V., Yurko, O.O., Perekrest, A.L., Kukharenko, D.V., & Vadurin, K.O. (2022). Komp'yuteryzovanyy praktykum z modelyuvannya fizychnykh protsesiv [Computerized workshop on simulation of physical processes]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhayla Ostrohradskoho*, 6 (137), 29–35. DOI: 10.32782/1995-0519.2022.6.3 [in Ukrainian].
8. National Instruments (2024). Ofitsiinyi sait [Official site]. Retrieved from: http://www.ni.com/ [in English].
9. LabVIEW Programming Reference Manual. Ofitsiinyi sait [Official site]. Retrieved from: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/menus/default/ root-mnu.html [in English].
10. LabVIEW User Manual. Retrieved from https://download.ni.com/support/manuals/ 320999b.pdf [in English].

Мосьпан Денис Владиславович – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. E-mail: denis.mospan@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5473-7874.

Юрко Олексій Олексійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. E-mail: yurkoalexe@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8244-2376.

Mospan Denis Vladyslavovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Engineering and Electronics, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. E-mail: denis.mospan@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5473-7874.

Yurko Oleksiy Oleksiiovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Engineering and Electronics, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. E-mail: yurkoalexe@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8244-2376.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-12