

БОЙКО Юлій

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0003-0603-7827](https://orcid.org/0000-0003-0603-7827)e-mail: boiko_julius@ukr.net

СВАЧІЙ Олег

Хмельницький національний університет

e-mail: oleg.svachiy.ninety-nine19@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНЕРЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ВІДХИЛЕННЯ ВАНТАЖУ БПЛА ВІД НУЛЬОВОЇ ТОЧКИ

В статті наведено результати калібрування та досліджень можливостей інерційної системи відслідковування відхилення від нульової точки на базі використання акселерометричного датчика MPU6050, для подальшої стабілізації вільно падаючого вантажу, як покращення використання БПЛА.

Ключові слова: інерційна навігаційна система, MPU6050, БПЛА, стабілізація, вантаж, акселерометр, гіроскоп, датчик.

BOIKO Juliy, SVACHII Oleh
Khmelnitskyi National University

RESEARCH OF THE INERTIAL DEVIATION MEASUREMENT SYSTEM UAV CARGO FROM ZERO POINT

Inertial measurement units (IMUs) can consist of one or more sensors that collect data designed to measure inertial motions in a specific frame of reference. Acceleration, rotational speed are examples of data that can be obtained from the sensors contained in the IMU. IMUs can be found in a variety of smart devices, medical rehabilitation, general robotics, UAV control and navigation enhancement systems, sports devices, and virtual reality systems. Some engineering solutions and displacement sensors have a number of limitations, such as systems that do not have a clear initial reference point. In such systems, it is difficult to track deviations from the starting point. However, the acceleration of a moving object is usually easy to measure, so the given deflection of the object can easily be obtained using the integral of the acceleration. To solve such problems, a distance measurement system based on a microelectromechanical system (MEMS) accelerometer has been developed. The hardware structure of the system includes a data measurement module and integrated data collection and data processing modules. Due to the physical properties of the sensor, such a system can be used in a small space, with large overloads and other adverse conditions. This article describes a system calibration method and proposes a deviation tracking algorithm based on acceleration integration. Fixed output error caused by sensor mounting position is analyzed. The analysis shows that if this factor is not taken into account, the error will lead to a serious error. The experiment of measurement of the deviation from the zero point is carried out on a horizontal, flat surface, and the calculation results show that the average accuracy of the deviation measurement of this system can reach 99.05%. The results of the experiment indicate the feasibility of the system in the conditions of short-term free fall and the validity of the data processing algorithm. The accuracy of the distance measurement system can meet most engineering needs.

Keywords: inertial navigation system, MPU6050, UAV, stabilization, cargo, accelerometer, gyroscope, sensor.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Застосування додаткових модулів є одним з методів покращення керування вантажних БПЛА, адже вони можуть зменшити час реагування, або збільшити зручність роботи з дроном, що значно збільшує час руху безпілотної. На сьогоднішній день не має автоматичних стабілізаторів вільно падаючого вантажу. Є системи спуску вантажу, але вони є повільними, що є мінусом адже є типи корисного вантажу які потребують швидкого та точного приземлення. Даний стабілізатор має відслідковувати відхилення вантажу від нульової точки, тому що на вільно падаючий об'єкт діє сила вітру, що може змінювати його траєкторію польоту. В даній статті описано один з методів вимірювання відхилення вантажу за допомогою акселерометричного датчика.

Сьогодні мікроконтролерні акселерометри широко використовуються в авіаційній навігації, побутовій електроніці, машинобудуванні, медичній, військових і цивільних галузях.

На рис. 1 графічно зображено вплив бокового вітру на відхилення від точки падіння на прикладі математичних параметрів коробки (20смх20см) з корисним вантажем масою 1 кг [1].

З графіку, що було отримано у результаті симуляції вільного падіння вантажу скинутого з БПЛА, враховуючи вплив бокового вітру швидкістю 5 м/с, було визначено, що при скиданні з висоти 200 метрів, вплив вітру на тіло з урахуванням його фізичних параметрів відхиляється приблизно на 12 метрів, що є суттєвою похибкою.

Тому в даній статті запропоновано метод, який враховує відхилення за допомогою мікроконтролерного (MEMS) акселерометра.

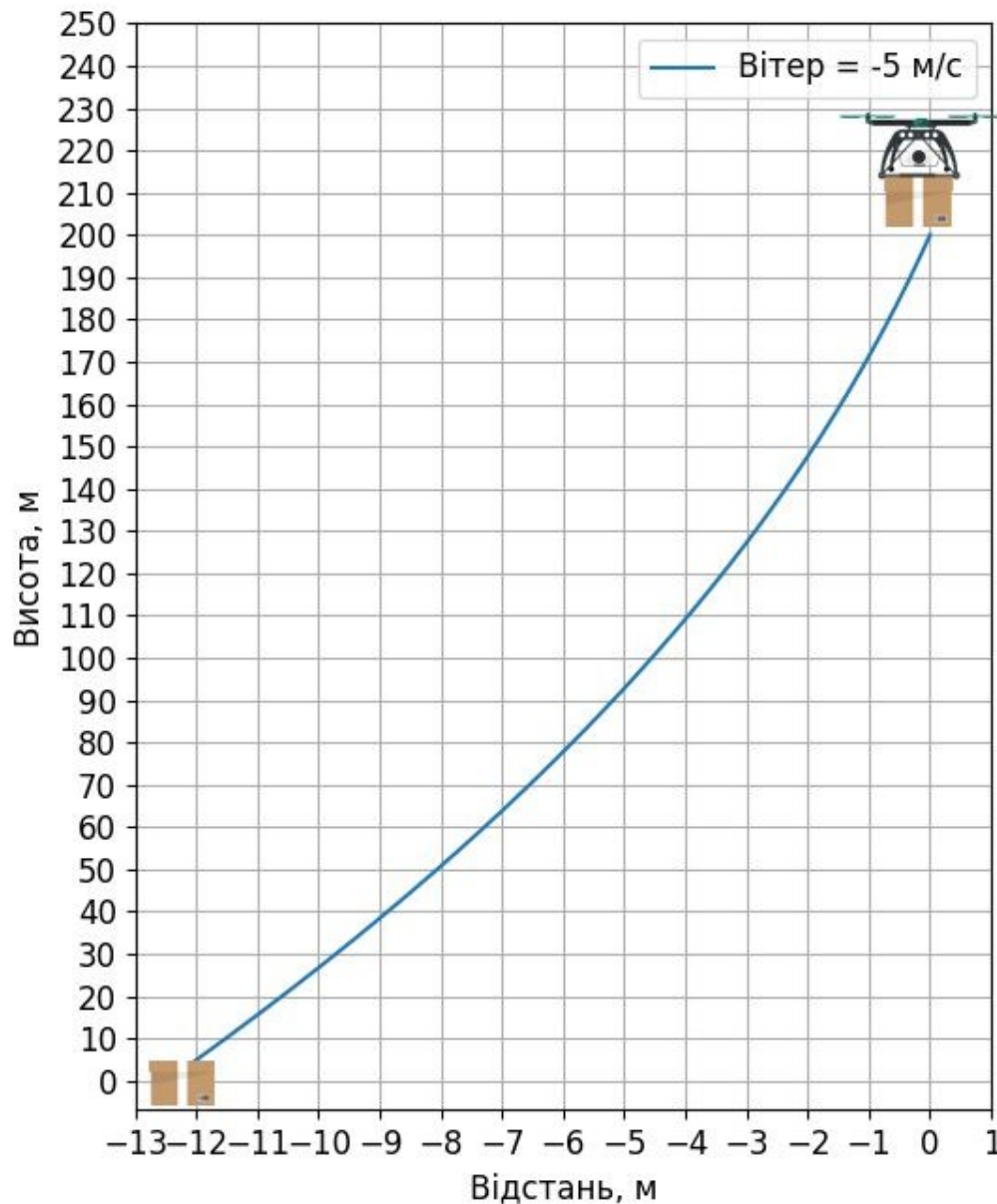


Рис. 1. Графічне зображення впливу бокового вітру на відхилення від точки падіння

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: створення інерційної системи відслідковування відхилення від нульової точки, для її подальшого використання у розробці методу покращення керування вантажним безпілотним літальним апаратом шляхом створення автоматичного стабілізатора вантажу у вільному падінні.

У даній роботі буде розглядатись можливість відслідковування переміщення тіла використовуючи інерційну систему створену на базі датчика акселерометра MPU6050. В статті запропоновано методи калібрування датчика та знайдено похибку вимірювання відхилення.

Аналіз досліджень та публікацій

З розвитком технологій мікроконтролерні акселерометри проникають у все більшу і більшу кількість галузей життя, таких як аеронавігація, виявлення землетрусів, вимірювання сили тяжіння та інші [2, 3]. Завдяки різноманітним новим принципам вимірювання та впровадженню технології, акселерометри MEMS мають такі покращені характеристики:

- малий розмір;
- легка вага;
- ударна стійкість;
- роздільна здатність вихідного сигналу.

У розвитку наукової теорії та практичних інженерних застосувань були спроби точно виміряти швидкість і переміщення. Розроблено багато методів вимірювання, і було досягнуто хороших результатів у вимірюванні відстані, наприклад, лазерний далекомір. Шляхом модуляції та демодуляції оптичного сигналу він впізнає перешкоди на основі відбитого сигналу і розраховує положення перешкоди. Іншим прикладом є

вимірювач на основі ефекту Доплера [4], який випромінює електромагнітні хвилі в сторону цілі і приймає сигнал відлуння. Однак ці методи вимірювання відстані мають значні обмеження [5, 6]. Вони занадто сильно залежать від сигналу відбиття і потребують взаємодії з іншим тілом для здійснення вимірювання відстані. Однак у реальному середовищі застосування на передану хвилю впливатиме не лише середовище розповсюдження, але й електромагнітні перешкоди, погода та інші фактори [7].

Постійні інновації та розвиток даної технології призвели до того, що такий тип акселерометрів поступово витісняють традиційні датчики механічної структури.

Виклад основного матеріалу

Технологія вимірювання відстані на основі прискорення має довгу історію. Її широко використовували для виявлення стану будівель, вимірювання мікропереміщень доріг і мостів, інерціальної навігації тощо. Ще в 1960-х роках Берг припустив, що існує дуже проста залежність перетворення між сигналами прискорення, швидкості та переміщення в кожній точці процесу руху об'єкта. Після отримання сигналу прискорення за допомогою інтегрування можна отримати сигнали швидкості або переміщення [8].

Система вимірювання складається з акселерометра MEMS, мікропроцесора AVR, модуля живлення та периферійної схеми. Загальна структура системи показана на рис. 2, вона включає в себе такі модулі:

- модуль керування системою;
- модуль вимірювання даних;
- модуль живлення.

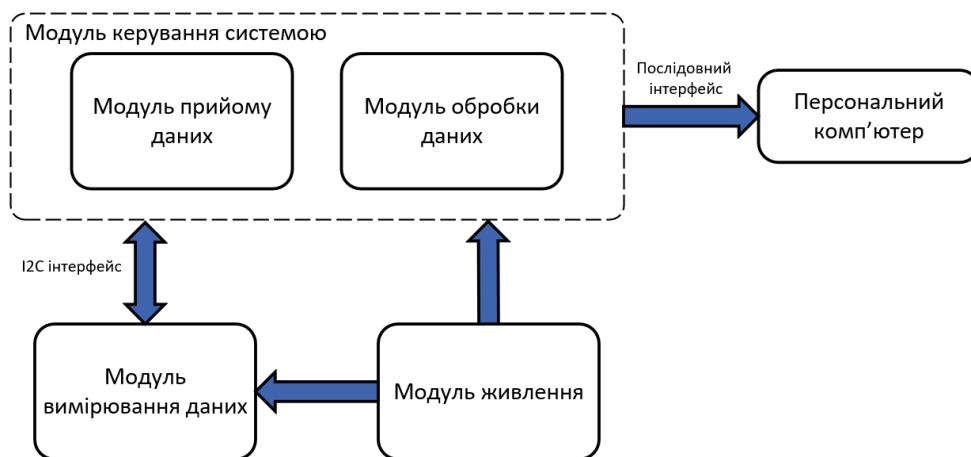


Рис. 2. Структура системи вимірювання відхилення вантажу від нульової точки

Модуль керування використовує мікропроцесор AVR. Він включає в себе модуль збору даних та модуль обробки даних (рис. 2). Основною роботою мікропроцесора є отримання, обчислення та передавання даних акселерометра на персональний комп'ютер. Мікропроцесор AVR має можливість здійснення операцій з плаваючою комо, що є необхідним у даному випадку. Прийом даних відбувається по інтерфейсу I2C, завдяки чому відбувається відділення процесу зняття показів датчика та їх обробки.

Акселерометр MEMS може вимірювати прискорення рухомого об'єкта в реальному часі. Зв'язок з модулем прийому даних забезпечує шина I2C, яка включає тактову лінію SCL (Serial Clock) і лінію даних SDA (Serial Data). Контакти VCC і GND є виводами джерела живлення акселерометра. Схема з'єднань [9] та опис виводів акселерометра MPU6050 показані на рис. 3. Для покращення роботи акселерометра та гіроскопа можна під'єднати додатковий датчик магнітометр згідно з схемою з'єднання.

Модуль призначений для визначення розташування та переміщення об'єкта в просторі за допомогою 3-осьового гіроскопа та 3-осьового акселерометра. Також на борту модуля є датчик температури. Гіроскоп модуля вимірює кутове прискорення тіла по 3 осях (X, Y, Z), а акселерометр обчислює прискорення тіла також враховуючі вісь прискорення. Для визначення прискорення акселерометр використовує п'єзоелектричний ефект. У стані спокою модуль постійно проводить калібрування датчика. Також датчик може визначати і реєструвати динамічні параметри під час руху.

MPU6050 — це інерціальний вимірювальний пристрій (IMU), який містить комбінований датчик акселерометра та гіроскопа. Як зчитувати дані з акселерометра або гіроскопа можна найкраще зрозуміти, дослідивши офіційну технічну документацію [9], на рис. 4 зображено систему координат датчика. Система координат акселерометра використовує традиційну декартову систему координат [10-12]. Подібним чином гіроскоп використовує обертання проти годинникової стрілки як позитивний напрям обертання.

Врахування системи координати є важливим для розуміння даних, які зчитує MPU6050, і розробки методів калібрування IMU.

Діапазони датчиків:

- Акселерометр - калібрується в діапазоні 0g-2g;
- Гіроскоп – калібрується в діапазоні 0– 250°/s.

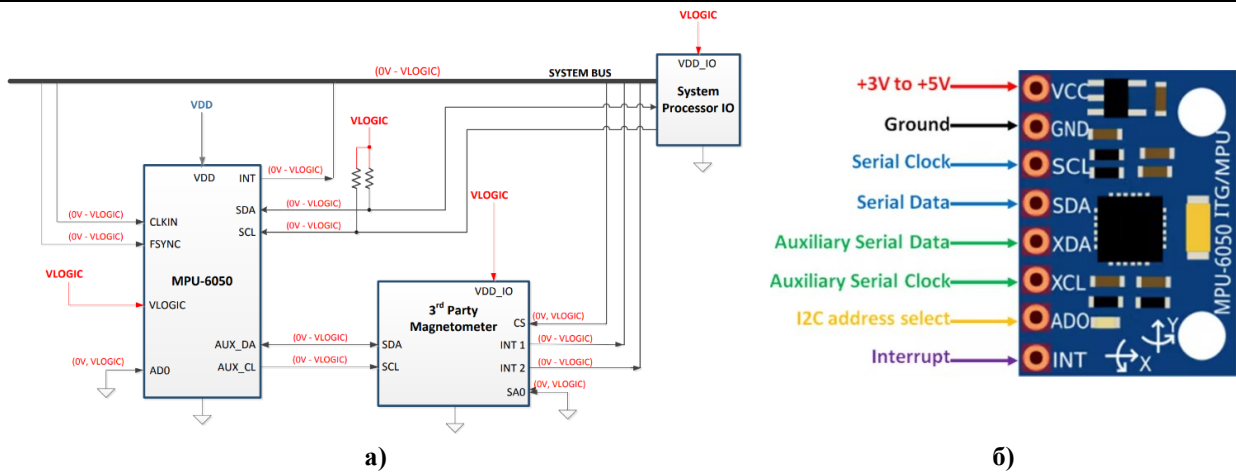


Рис. 3. Датчик MPU6050: а) – схема з'єднання; б) – опис виводів

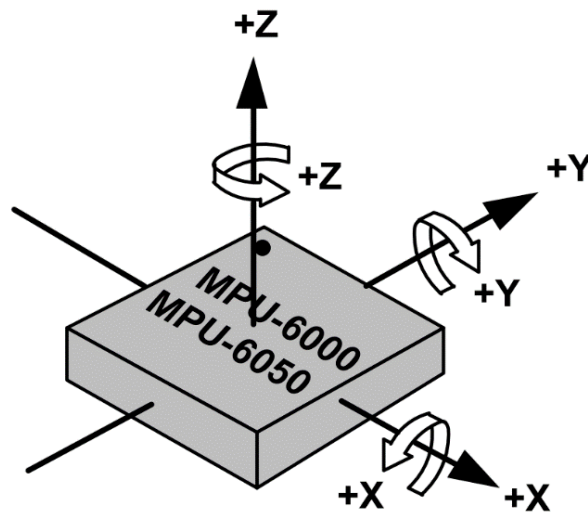


Рис. 4. Зображення системи координат датчика MPU6050

MPU6050 прикріплено до калібрувального кубу, який забезпечує стабільність положення у вздовж кожної осі, цим полегшує калібрування та узгодження з силою тяжіння (акселерометр) і обертання навколо кожної осі (гіроскоп). Калібрувальний куб було створено у програмному середовищі SOLIDWORKS та надруковано на 3D-принтері, 3D-модель та готовий виріб зображено на рис.5.

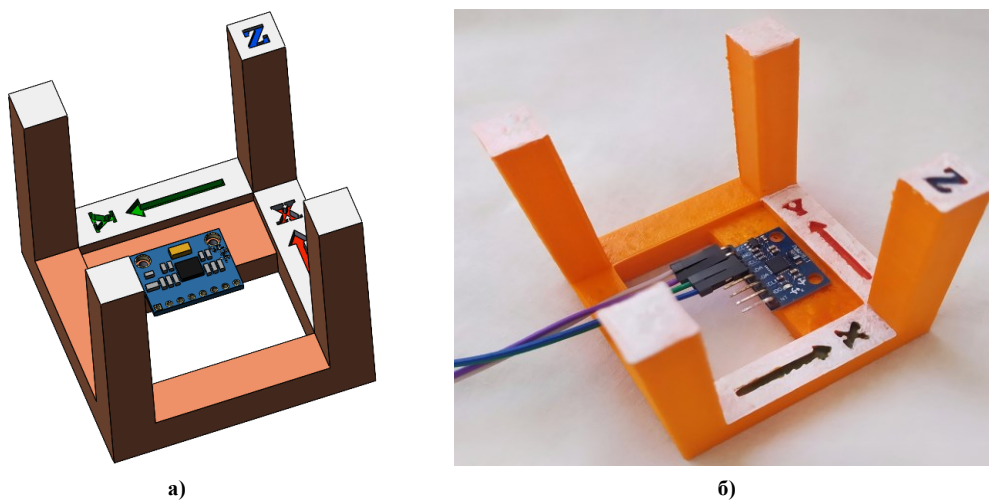


Рис. 5. Калібрувальний куб: а) 3D-модель; б) – готовий виріб

Калібрування гіроскопа полягає у обчисленні зсуву для кожної осі. Гіроскоп має найпростіший спосіб калібрування, тому що легко передбачити показники датчика, які виводяться у стані спокою. Кожна з трьох осей гіроскопа має показувати 0 градусів за секунду ($^{\circ}/s$), коли датчик не рухається. Зміщення можна виміряти, отримавши покази датчика у нерухомому положенні, а потім використовувати ці значення як «зміщення» під час зчитування значень гіроскопа в майбутньому. Це найпростіший метод калібрування

датчика, якого достатньо для більшості випадків його використання.

На рис. 6 наведено графіки значень гіроскопа до та після калібрування. При калібруванні гіроскопа немає потреби калібрувати його використовуючи куб калібрування.

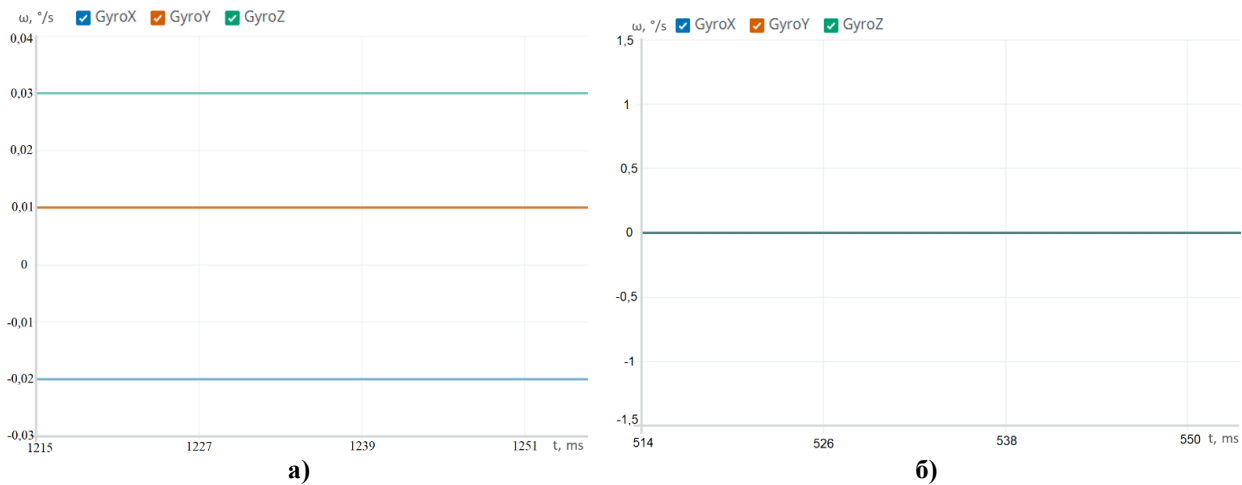


Рис. 6. Зображення графіків значень гіроскопа: а) до калібрування; б) – після калібрування

Нижче описано спосіб перевірки калібрування гіроскопа, інтегруючи масив значень кутової швидкості в часі за відомого куту обертання. Для прикладу в таблиці 1 перевірено даний метод на значеннях -180° , 90° та -90° , щоб переконатися, що гіроскоп функціонує належним чином.

Інтегруючи кутову швидкість гіроскопа, можна зробити наближення кутового зміщення (1):

$$\int_{t_1}^{t_2} \omega_i dt = \theta_i, \quad (1)$$

Для дискретних точок використовується спосіб чисельного інтегрування, в статті використовується чисельне інтегрування за правилом трапеції (2):

$$\theta_i = \int_{t_1}^{t_2} \omega_i dt \approx \sum_{j=N}^N \left(\frac{f_i(t_{j-1}) + f_i(t_j)}{2} \Delta t_j \right), \quad (2)$$

Таблиця 1

Результати калібрування датчика гіроскопа

Кут нахилу	Отриманий результат	Похибка
-90°	$-90,14^\circ$	$-0,14^\circ$
90°	$89,87^\circ$	$-0,13^\circ$
180°	$179,82^\circ$	$-0,18^\circ$

Після калібрування гіроскопу відбувається калібрування датчика акселерометра. Воно має схожий спосіб, але потребує калібрування у трьох положеннях відносно напрямку сили тяжіння для кожної осі (рис. 7).

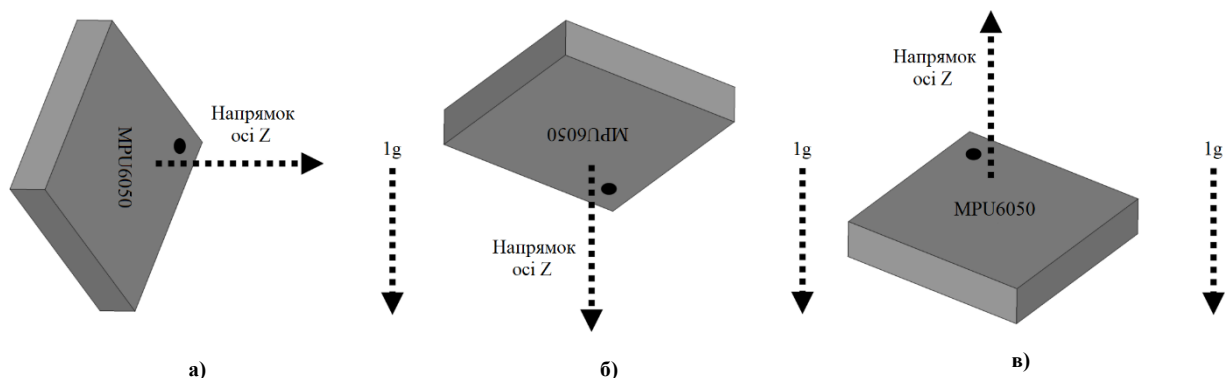


Рис. 7. Зображення положення датчику: а) перпендикулярно до сили тяжіння ($0g$); б) – у напрямку сили тяжіння ($-1g$); в) – проти напрямку сили тяжіння ($1g$)

Нижче вказані та прокоментовані стрічки коду, що відповідають за отримання даних для визначення похибки.

```

#include <Adafruit_MPU6050.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Wire.h>
// підключення бібліотек
Adafruit_MPU6050 mpu; // задання назви датчику
sensors_event_t a, g, temp;
float ax, ay, az;
// створення змінних
void setup(void) {
  Serial.begin(115200); // ініціалізація та задання швидкості передачі послідовного порту
  mpu.begin(); // ініціалізація датчика
  mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_2_G);
  mpu.setGyroRange(MPU6050_RANGE_250_DEG);
  mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_94_HZ);
  // налаштування режимів роботи датчика MPU6050
  delay(100); // реалізація затримки для проведення датчиком налаштування режимів
}
void loop() { // основний цикл програми
  ax, ay, az = 0;
  // скидання даних для подальшого використання в циклі отримання похибки
  for (int i = 1; i < 101; i++) // цикл отримання середньої похибки у вибірці зі 100 значень
  {
    mpu.getEvent(&a, &g, &temp); // команда отримання значень з датчика
    ax += a.acceleration.x;
    ay += a.acceleration.y;
    az += a.acceleration.z;
    // присвоєння та сумування даних
    delay(10);
  }
  Serial.print("DelAccelX:");
  Serial.print(ax/100);
  Serial.print(",");
  Serial.print("DelAccelY:");
  Serial.print(ay/100);
  Serial.print(",");
  Serial.print("DelAccelZ:");
  Serial.print(az/100-9.81);
  Serial.println("");
  // виведення похибки у послідовний порт
}

```

В даній статті на рис. 8 зображено результати калібрування датчика акселерометра для випадку коли вісь Y є перпендикулярною до сили тяжіння. У результаті виконання програмного коду, для описаного вище випадку було виявлено такі похибки:

- DelAccelX = 0.40;
- DelAccelY = -0.09;
- DelAccelZ = 2.55.

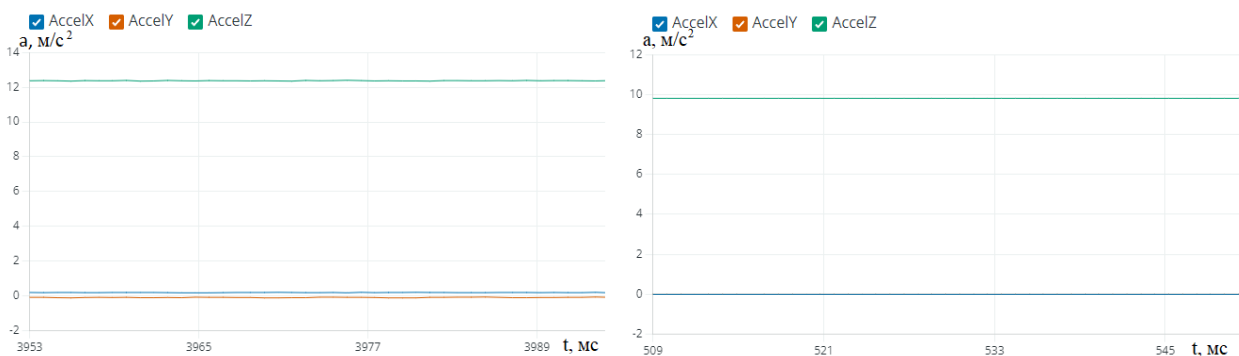


Рис. 8. Зображення графіків значень акселерометра: а) до калібрування;
б) – після калібрування

Кінцевим результатом написання статті є перевірка калібрування акселерометра. Перевірка включає

в себе відслідковування похибки при зміщенні з нульової точки. Різниця між інтегруванням даних гіроскопа та акселерометра полягає в тому, що значення прискорення будуть інтегровані двічі для виведення переміщення (3).

$$a_i = \frac{d^2 x}{dt^2} \rightarrow \frac{dx_i}{dt} = \int a_i dt \rightarrow x_i = \int \left(\int a_i dt \right) dt \quad (3)$$

Наведену вище послідовність потрібно поділити на два кроки. Спочатку необхідно інтегрувати прискорення до швидкості (4).

$$v_i = \sum_{j=1}^N \left(\frac{a(t_{j-1}) + a(t_j)}{2} \right) \Delta t, \quad (4)$$

На наступному кроці потрібно інтегрувати масив швидкостей, щоб визначити переміщення (5).

$$x_i = \sum_{j=1}^N \left(\frac{v(t_{j-1}) + v(t_j)}{2} \right) \Delta t, \quad (5)$$

Після виконання кроків вище, можна отримати значення відхилення від нульової точки. На рис. 9 зображено графік одного з вимірювань, що включає в себе прискорення, швидкість та переміщення при зміщенні на 0,25 м.

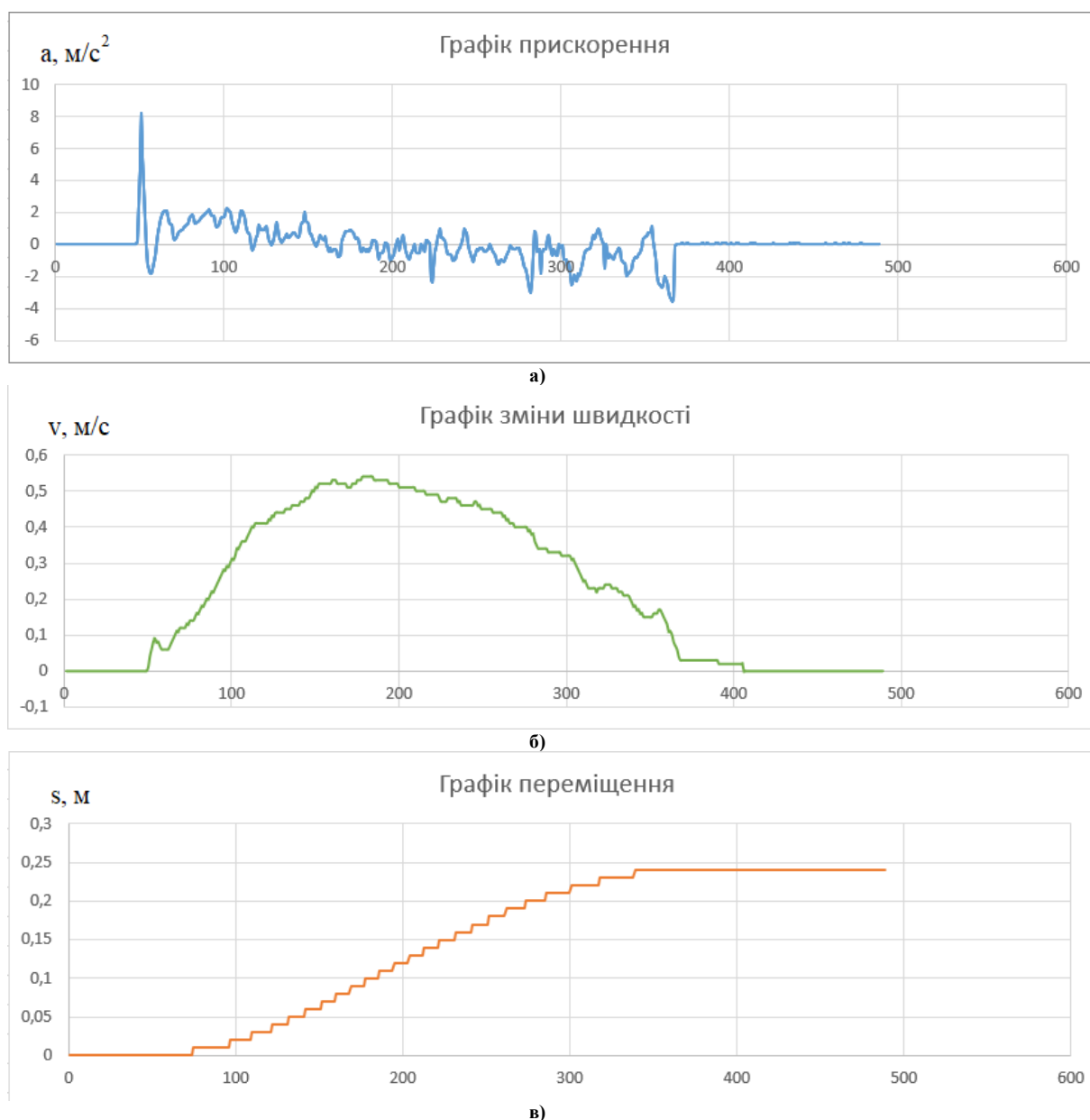


Рис. 9. Зображення графіків тестового вимірювання : а) прискорення; б) – швидкість; в) - переміщення

В таблиці 2 наведені дані шести вимірювань, що було отримано в результаті перевірки похибки у випадку коли фактичне відхилення від центру по осі Y дорівнює 30 см.

Таблиця 2
Результати калібрування датчика
акселерометра

№	Фактичне відхилення, см	Дані з датчика, см	Похибка, см	Похибка, %
1	30	30,11	0,11	0,37
2	30	29,73	0,27	0,9
3	30	30,65	0,65	2,17
4	30	30,16	0,16	0,53
5	30	29,93	0,07	0,24
6	30	29,56	0,44	1,46

Середня похибка дорівнює 0,95%, що є гарним результатом у випадку стабілізації вільно падаючого вантажу. На рис. 10 зображено алгоритм роботи коду програми, що використовувався для отримання результатів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У статті досліджено спосіб вимірювання відхилення від нуля вантажу вантажного БПЛА [13], шляхом використання інерційної системи, основною складовою якої є акселерометр MEMS. Також у цій статті запропоновано алгоритм отримання відстані за допомогою інтегрування значень прискорення отриманих з датчика. Було виконано калібрування гіроскопа та акселерометра датчику MPU6050 за допомогою виготовленого калібрувального кубу, що дало змогу зменшити похибку вимірювань. Невеликий розмір вимірювальної системи дає можливість адаптування до безпілотного літального апарату, або до його модулів. Шляхом практичних вимірювань виявлено, що середня похибка такої системи дорівнює 0.95%.

Експеримент показав, що враховуючи похибку, можливо використовувати даний метод відслідковування відхилення тіла у пристрої стабілізації вільно падаючого вантажу.

Мінусом цієї системи є її неактуальність у разі нахилу пристрою. Для подальшого покращення інерційної системи варто використати магнітометр, тому що за допомогою цього датчика в поєднанні з гіроскопом є можливість отримання точнішого значення нахилу системи. Саме це дасть змогу корегувати значення акселерометра у відношенні до кута.

Література

1. How Does Wind Speed Affect Homerun Chances? [Електронний ресурс] // Random Problems. – Режим доступу: <https://www.somesolvedproblems.com/2019/10/how-does-wind-speed-affect-homerun.html> (дата звернення: 19.10.2022). – Назва з екрана.
2. Novel capacitive sensing system design of a microelectromechanical systems accelerometer for gravity measurement applications / Z. Li [та ін.] // Micromachines. – 2016. – Т. 7, № 9. – С. 167–169.
3. Process development of an all-silicon capacitive accelerometer with a highly symmetrical spring-mass structure etched in TMAH+Triton-X-100 / B. Tang [та ін.] // Sensors and Actuators. – 2014. – Т. 217. – С. 105–110.
4. Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas / R. Yang et al. Qingdao : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2010.
5. Absolute distance measurement based on spectral interferometry using femtosecond optical frequency comb / G. Tang et al. Optics and Lasers in Engineering. 2019. Vol. 120. P. 71–78.
6. Absolute distance measurement based on spectral interferometer using the effect of the FSR of a Fabry–Perot etalon / M. Chen et al. Optics and Lasers in Engineering. 2019. Vol. 123. P. 20–27.
7. Small Displacement Measuring System Based on MEMS Accelerometer / W.-m. Niu et al. Mathematical

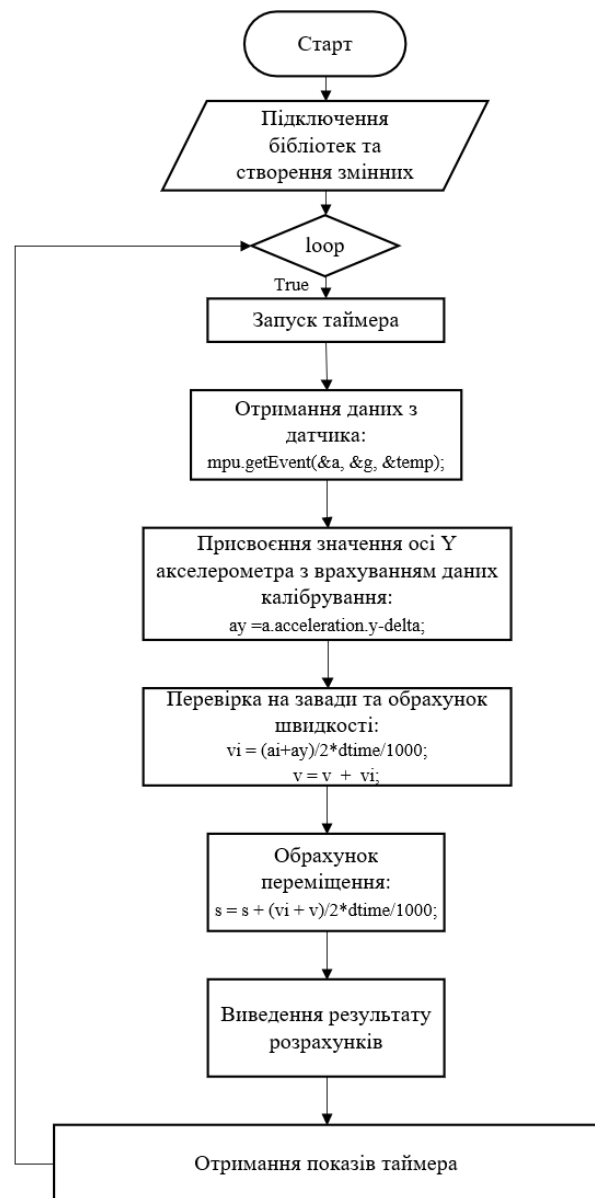


Рис. 10. Зображення алгоритму програмного коду

Problems in Engineering. 2019. No. 1. P. 1–7.

8. Berg G. V. Integrated velocity and displacement of strong earthquake ground motion / G. V. Berg // Bull. Seismol. Soc. – 1961. – Т. 51, № 2. – С. 175–189.

9. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 [Електронний ресурс]. – 1197 Borregas Ave, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A. : InvenSense Inc, 2013. – 52 с. – Режим доступу: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf> (дата звернення: 05.10.2022). – Назва з екрана.

10. Parkhomey I. Radar Technique for Aircraft with an Artificially Reduced RCS under Conditions of Application a Resonant Electromagnetic Field / I. Parkhomey, J. Boiko // Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 1. – С. 184–190.

11. Parkhomey I., Boiko J., Eromenko O. Methodology for the Development of Radar Control Systems for Flying Targets with an Artificially Reduced RCS //Journal of Robotics and Control (JRC). – 2022. – Т. 3. – №. 4. – С. 402–408.

12. Бойко Ю. М. Моделювання характеристик широкопasmової антенної системи для пеленгації БПЛА /Ю. М. Бойко, О.І. Полікаровських, В. П. Ткачук, В.М. Авдєєв, О.С. Свістунів // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 3. – С. 158–167.

13. Ghamari M. et al. Unmanned aerial vehicle communications for civil applications: a review //IEEE Access. – 2022.

References

1. How Does Wind Speed Affect Homerun Chances? [Elektronnyi resurs] // Random Problems. – Rezhym dostupu: <https://www.somesolvedproblems.com/2019/10/how-does-wind-speed-affect-homerun.html> (data zvernennia: 19.10.2022). – Nazva z ekrana.

2. Novel capacitive sensing system design of a microelectromechanical systems accelerometer for gravity measurement applications / Z. Li [ta in.] // Micromachines. – 2016. – Т. 7, № 9. – С. 167–169.

3. Process development of an all-silicon capacitive accelerometer with a highly symmetrical spring-mass structure etched in TMAH+Triton-X-100 / B. Tang [ta in.] // Sensors and Actuators. – 2014. – Т. 217. – С. 105–110.

4. Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas / R. Yang et al. Qingdao : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2010.

5. Absolute distance measurement based on spectral interferometry using femtosecond optical frequency comb / G. Tang et al. Optics and Lasers in Engineering. 2019. Vol. 120. P. 71–78.

6. Absolute distance measurement based on spectral interferometer using the effect of the FSR of a Fabry–Perot etalon / M. Chen et al. Optics and Lasers in Engineering. 2019. Vol. 123. P. 20–27.

7. Small Displacement Measuring System Based on MEMS Accelerometer / W.-m. Niu et al. Mathematical Problems in Engineering. 2019. No. 1. P. 1–7.

8. Berg G. V. Integrated velocity and displacement of strong earthquake ground motion / G. V. Berg // Bull. Seismol. Soc. – 1961. – Т. 51, № 2. – С. 175–189.

9. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 [Elektronnyi resurs]. – 1197 Borregas Ave, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A. : InvenSense Inc, 2013. – 52 s. – Rezhym dostupu: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf> (data zvernennia: 05.10.2022). – Nazva z ekrana.

10. Parkhomey I. Radar Technique for Aircraft with an Artificially Reduced RCS under Conditions of Application a Resonant Electromagnetic Field / I. Parkhomey, J. Boiko //Herald of Khmelnytskyi national university. – 2022. – № 1. – С. 184–190.

11. Parkhomey I., Boiko J., Eromenko O. Methodology for the Development of Radar Control Systems for Flying Targets with an Artificially Reduced RCS //Journal of Robotics and Control (JRC). – 2022. – Т. 3. – №. 4. – С. 402–408.

12. Boiko J. Modeling the characteristics of a broadband antenna system for UAV direction finding / J. Boiko, O. Polikarovskiykh, V. Tkachuk, V. Avdieiev, O. Svistunov //Herald of Khmelnytskyi national university. – 2022. – № 3. – С. 158–167.

13. Ghamari M. et al. Unmanned aerial vehicle communications for civil applications: a review //IEEE Access. – 2022.

Надійшла/Paper received : 05.08.2022 p. Надрукована/Printed :01.11.2022 p.