

**ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ**

УДК 631.451

**МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ІНКЛІНОМЕТР***Сапегін О. М., Строкач Г. Ю.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: [sapegin\\_a@ukr.net](mailto:sapegin_a@ukr.net)*

У якості вимірювачів кута нахилу на рухомих об'єктах невеликої маневреності часто використовують різноманітні інклінометри. Здебільшого це великогабаритні пристрої, в яких використовують різноманітні маятники як чутливі елементи. Використання сучасних мікроелектромеханічних чутливих елементів, а також малогабаритних мікропроцесорів у поєднанні із технологією тривимірного друку дозволяє створювати невеликі та дешеві прилади. У роботі подані результати синтезу алгоритмічного та програмного забезпечення мікромеханічного інклінометру, а також приведено розроблену конструкцію. В якості чутливих елементів використувався мікромеханічний інерціальний вимірювальний модуль MPU 6050, бортовим обчислювачем є мікроконтролер сімейства Arduino. Розроблено алгоритмічне забезпечення інклінометру, що ґрунтується на використанні засобів інерціальної навігації, а саме чисельному інтегруванні рівняння орієнтації Пуассона. Дрейфи нулів мікромеханічних гіроскопів вдалося частково компенсувати впровадженням компліментарного фільтра. Він дозволяє використати сигнали акселерометрів MPU 6050 для поточної корекції вихідної матриці напрямних косинусів. Проведено серію тестів для підбору оптимального коефіцієнта підсилення фільтра. Програмне забезпечення для платформи Arduino розроблено у середовищі Matlab Simulink. Це дозволило значно пришвидшити процес розробки та тестування приладу. Корпус розроблено у середовищі SolidWorks. Використання мініатюрних датчиків та контролера дозволило застосувати технологію тривимірного друку для виготовлення усіх деталей корпусу приладу. Для автономної роботи інклінометр додатково оснащено блоком акумуляторів. Натурні випробування макету інклінометру показали стабільну точність і низький дрейф кутів нахилу на нерухомій основі.

**Ключові слова:** кутоніп; мікромеханічний датчик; Arduino; Matlab.

**Вступ**

Інклінометр – це прилад, що показує кут нахилу об'єкту. Фактично інклінометр показує нахил об'єкту відносно площини горизонту або вертикалі місця. У якості чутливих елементів інклінометра природно використовувати різні види маятників: фізичні, або рідинні. Недоліком маятникових систем є їх надмірна чутливість до прискорення за вимірювальною віссю, що унеможлиблює коректне використання таких приладів. Разом із тим, інформацію про цей кут надають авіагоризонти, або її можна отримати за допомогою вільного триступеневого гіроскопа, проте подібні системи мають надмірну вагу, вартість, а іноді й точність.

Сучасні мікроелектромеханічні чутливі елементи систем орієнтації дозволяють широко використовувати класичні методи і підходи інерціальної навігації. Системи, що раніше потребували великогабаритних, важких і складних модулів, тепер стало можливо створити на основі мікромеханіки. Звичайно, мікромеханічні пристрої значно поступаються точністю класичним системам, але їх дешевизна та мініатюрність дозволяє використовувати їх у системах низької та середньої точності [1 – 3].

Для синтезу апаратного забезпечення було обрано мікроконтролер та платформу Arduino. Arduino являє собою електронну платформу, головна ідея якої полягає в забезпеченні легкості при використанні апаратного та програмного забезпечення. Отже, для використання цієї платформи не потрібно дуже глибоко вивчати принципи роботи мікроконтролерів та периферії для них, відкритість початкового коду (open source) надає можливість створення різноманітних модифікацій та удосконалень. Завдяки цьому існує велика кількість різноманітних бібліотек, створених для подальшої оптимізації та покращення роботи користувачів. Через це стало можливим створення додатку для середовища Matlab – Matlab Support Package for Arduino Hardware, що дозволяє взаємодіяти з платами Arduino.

У додаток вбудовано бібліотеки для роботи з послідовними інтерфейсами ("I2C", "SPI"), сервомашинами ("Servo"), а також існують спеціальні функції для спрощення роботи з найпопулярнішими інерційними вимірювальними модулями (MPU6050, MPU9250, LSM9DS1), робота з якими забезпечується функціями, що мають назву модулів [4].

**Постановка задачі**

У роботі [5] було продемонстровано найпростіший варіант кутоміру – на основі акселерометрів. Прилад показав високу точність визначення вертикалі основи у статичному режимі. Проте, виявився очікуваний недолік – при русі об'єкта, на якому встановлено прилад, акселерометри починають реагувати на це додаткове прискорення і при вимірюванні кутів нахилу вноситься похибка. Приклад роботи інклінометру на рухомій основі наведено на рис. 1.

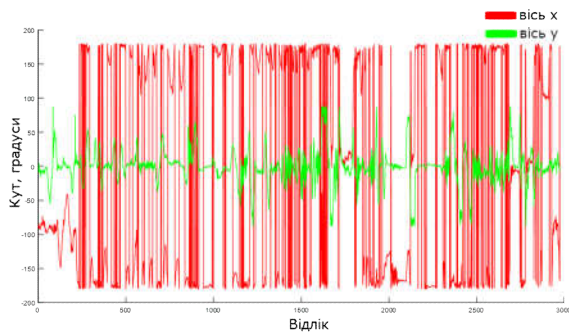


Рис. 1. Покази кутоміру на основі акселерометрів на рухомому об'єкті

Експеримент проведено на рухомому транспорті. Імітувались нахили, подібні до тих, які може здійснювати автомобіль на бездоріжжі до  $60^{\circ}$ . Вісь чутливості приладу X була направлена за напрямком руху транспорту, вісь Y – перпендикулярно до X. Як можна побачити з рис. 1, вихідний кут осі X (червоний) має значні відхилення, що зовсім не відповідають реальним кутам нахилу об'єкта. Через це стає неможливим використання такого приладу на рухомих основах [5]. Для створення системи, що коректно працювала би на рухомій основі, запропоновано підхід, що ґрунтується за використання алгоритму безплатформної інерціальної системи орієнтації [6 – 8]. Для зручності використання системи доцільно спроектувати для неї устаткування: корпус, блок чутливих елементів та розрахунковий мікроконтролер, елементи живлення, показчики.

**Конструкція кутоміру**

Для реалізації інклінометра вибрано наступні компоненти:

- інерціальний вимірювальний модуль (ІВМ) MPU6050;
- плата Arduino UNO;
- сервомашини НК15178;
- акумулятори NCR18650В з кейсом та контролером заряду.

На рис. 2 наведено схему підключення окремих електронних компонентів інклінометру. Для MPU6050 рекомендована напруга живлення 3.3 В, тому живлення на нього подається з відповідного виходу контролера, а контакти для I2C SDA та

SCL під'єднані до відповідних SDA та SCL виходів плати, також можливе під'єднання до контактів A4 та A5 відповідно. Для сервомашин необхідна напруга живлення 5 В, яка подається з плати Arduino. Контакти керування під'єднані до контактів із функцією широтно-імпульсної модуляції – 9 та 10. Живлення Arduino з акумуляторів реалізовано через контакти Vin та GND. Виходи контролера заряду та акумуляторного кейсу з'єднані відповідно до їх полярності.

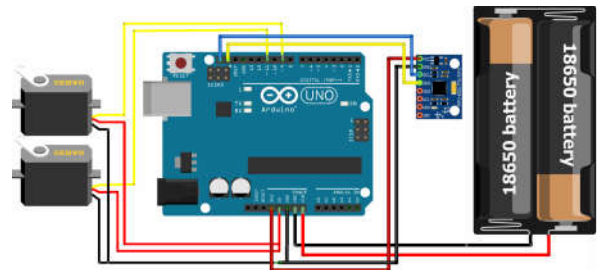


Рис. 2. Схема підключення компонентів інклінометру до плати Arduino UNO

Для зручного використання інклінометру розроблено корпус, який складається з трьох окремих компонентів: основи, передньої панелі та кришки.

На основі розташовуються та закріплюються всі основні елементи приладу. Для фіксації плати та кейсу акумуляторів передбачено отвори для гвинтів. У геометричному центрі корпусу створено Г-подібну стійку для кріплення інерціального вимірювального модуля на гвинтах. Також, для щільного закріплення ІВМ на стійці, передбачено жолоб для припою знизу плати модуля. Для кращої фіксації передньої панелі корпусу передбачено жолоб у передній частині основи. На передній панелі передбачено отвори для встановлення та закріплення сервомашин. Самі сервомашини оточені кільцями, що захищають показчики кутів нахилу від зовнішніх пошкоджень та є кріпленням для циферблату. Вони кріпляться до корпусу за допомогою гвинтів.

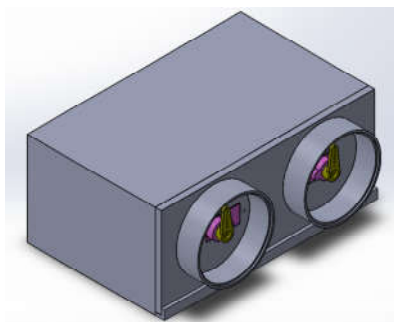
Кришка корпусу накриває основу та повторює силует передньої панелі. У задній частині кришки передбачено отвори для доступу до контролера заряду акумуляторів. Вони кріпляться до основи та передньої панелі гвинтами.

**Калібрування блоку чутливих елементів**

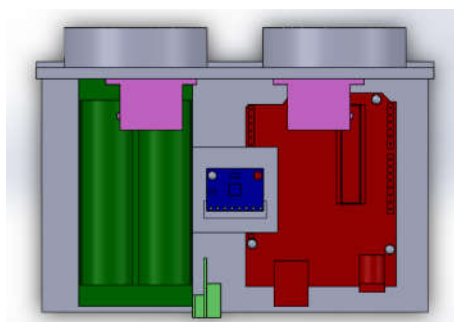
Для коректної роботи та забезпечення точності приладу необхідно провести калібрування ІВМ. Інерціальний вимірювальний модуль MPU6050 містить в собі триади акселерометрів та гіроскопів. Їх калібрування можна провести методами тестових поворотів та обертанням на одновісному поворотному столі [9].

Калібрування гіроскопів виконується обертанням ІВМ на поворотному столі зі сталою відомою кутовою швидкістю. Виконується 3 серії пус-

ків для кожної осі IBM окремо. Для підвищення точності каліброваних коефіцієнтів було записано



а)



б)

Рис. 3. Трьохвимірний модель приладу, де: а) – зовнішній вигляд приладу; б) – розташування елементів у приладі

Матриці калібрування для блоку акселерометрів мають вигляд

$$A = K^{-1}(U_a - U_{a0}), \quad (1)$$

а для блоку гіроскопів

$$W = R^{-1}(U_\omega - U_{\omega0}), \quad (2)$$

де  $K$  – матриця масштабних коефіцієнтів акселерометрів;  $U_a$  – вихідні сигнали акселерометрів;  $U_{a0}$  – матриця зміщення нулів акселерометрів і  $R$  – матриця масштабних коефіцієнтів гіроскопів;  $U_\omega$  – вихідні сигнали гіроскопів;  $U_{\omega0}$  – матриця зміщення нулів гіроскопів.

Для цього датчика їх значення мають вигляд:

$$K = \begin{bmatrix} -0,02 & 1,01 & -0,05 \\ -0,99 & -0,02 & -0,01 \\ -0,01 & 0,06 & 1,01 \end{bmatrix}; \quad U_{a0} = \begin{bmatrix} -0,05 \\ 0,11 \\ 0,41 \end{bmatrix}.$$

$$R = \begin{bmatrix} 58,159 & 0,836 & 3,051 \\ 0,516 & 57,198 & -0,619 \\ -3,931 & 0,357 & 57,038 \end{bmatrix}; \quad U_{\omega0} = \begin{bmatrix} 0,034 \\ 0,038 \\ 0,001 \end{bmatrix}.$$

#### Алгоритм кутоміра

Безплатформна інерціальна система орієнтації визначає поточне значення кутів нахилу об'єкта відносно базової, зазвичай, географічної системи координат [10].

Водночас, розраховується значення кінематичного параметру орієнтації: кути Ейлера-Крилова, матриця напрямних косинусів (МНК) чи векторний параметр. Найбільш зручним та наочним кінематичним параметром є матриця напрямних косинусів. Поточне її значення розраховується за допомогою рівняння Пуассона:

$$\frac{dC^{SP}}{dt} = C^{SP} \cdot (\omega_P^{PS} \times), \quad (3)$$

сигнали гіроскопів при декількох кутових швидкостях [9].

де  $C^{SP}$  – матриця напрямних косинусів переходу від базової системи координат  $S$  до пов'язаної з об'єктом  $P$ ,  $(\omega_P^{PS} \times)$  – кососиметрична матриця з проекції кутової швидкості, вимірної IBM. Вона має наступний вигляд:

$$(\omega_P^{PS} \times) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{3P}^{PS} & \omega_{2P}^{PS} \\ \omega_{3P}^{PS} & 0 & -\omega_{1P}^{PS} \\ -\omega_{2P}^{PS} & \omega_{1P}^{PS} & 0 \end{bmatrix}.$$

Рівняння (3) має диференціальну форму і для отримання поточної інформації про МНК необхідно проводити чисельне інтегрування. Існує велика кількість методів інтегрування [9], проте при створенні цієї системи було використано найпростіший метод першого порядку – лівих прямокутників:

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} x(t) dt = \frac{h}{2}(x_i + x_{i+1}), \quad (4)$$

де позначено  $h$  – крок інтегрування, що в даному випадку співпадає з кроком опитування датчиків IBM,  $x_i$  – попереднє значення інтегрованої функції,  $x_{i+1}$  – поточне значення інтегрованої функції.

Однак при використанні лише рівняння Пуассона (3), через великі дрейфи мікромеханічних гіроскопів, має місце стрімке накопичення похибки інтегрування, яка вносить неточність у показання інклінометру [11]. Компенсувати цю похибку можна за допомогою впровадження комплементарного фільтру. Принцип роботи фільтру полягає у додаванні показань з акселерометрів при розрахунку кутів. За допомогою акселерометрів розраховуються кути нахилу об'єкта відносно вектору прискорення сили вільного падіння – вертикалі. Зі значень цих кутів формується МНК акселерометрів. Надалі МНК акселерометрів пропускаються через фільтр низьких частот, а МНК гіроскопів – через фільтр високих частот. Результати фільтру-

вання сумують та отримують вихідну МНК, з якої визначають скореговані кути орієнтації

$$C_{out}^{SP} = (1-k) \cdot C_{\omega}^{SP} + k \cdot C_a^{SP}, \quad (5)$$

де  $k$  – коефіцієнт фільтрів,  $C_{\omega}^{SP}$  – МНК з показань гіроскопу, отримана за (3),  $C_a^{SP}$  – МНК з показань акселерометрів,  $C_{out}^{SP}$  – вихідна МНК.

Від величини коефіцієнта фільтрів залежить чутливість фільтру.

Програмне забезпечення для мікроконтролера Arduino створено у середовищі Matlab.

У програмному середовищі Matlab було створено об'єкт для роботи з платою Arduino, наприклад для Arduino Uno, що підключена до третього порту, ініціалізація має вигляд:

```
a=arduino('COM3','Uno');
```

Надалі створюється об'єкт датчика [4]

```
imu=mpu6050(a),
```

а також об'єкти для сервомашин

```
s1=servo(a,'D9'), s2=servo(a,'D10');
```

Зчитування значень кутову швидкості та прискорення відбувається функцією `read(imu)`. Покази акселерометрів та гіроскопів калібруються відповідно за формулами (1) та (2).

Розраховані з матриці  $C_{out}^{SP}$  кути передаються на сервомашини, які відпрацьовують вихідний кут на шкалі приладу.

### Результати експерименту

Перевірка роботи інклінометру відбувалась у статичному режимі – прилад був залишений на столі в стані спокою на 10 хвилин. Сигнали датчиків представлено на рис. 4. У разі використання лише мікроемеханічних гіроскопів, за цей час, інклінометр накопичив би значний дрейф. Довга робота у статичному режимі показує, наскільки якісно вдалося конфігурування компліментарного фільтра (5).

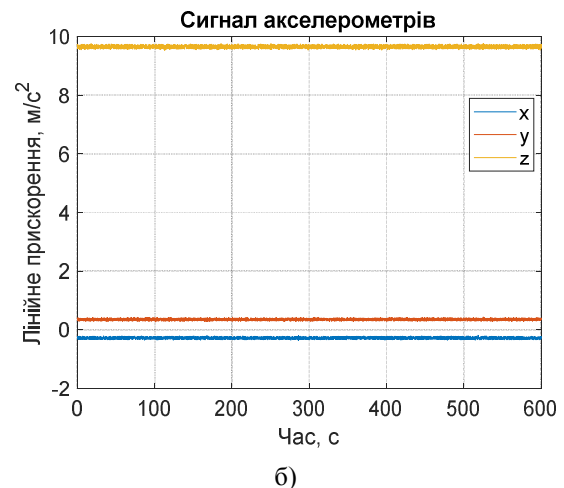
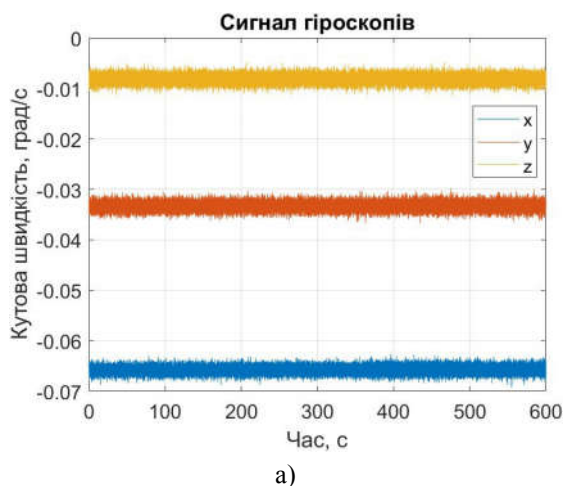


Рис. 4. Сигнали приладу, де: а) – кутова швидкість; б) – лінійне прискорення

Для фільтру обрано коефіцієнт 0.05, як той, що забезпечує оптимальне співвідношення між показаннями акселерометрів та гіроскопів при низькому дрейфі значень кутів (рис. 5).

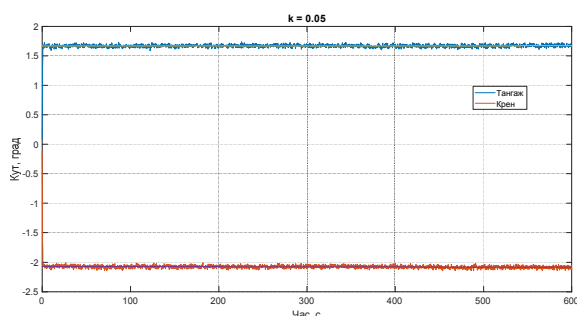


Рис. 5. Результат роботи інклінометру

Як видно з рис. 5, прилад фіксує нерівність столу відносно площини горизонту. За час роботи приладу дрейф тангажа склав  $6,27 \cdot 10^{-5}$  град, крену –  $2,51 \cdot 10^{-4}$  град, швидкість дрейфу тангажа –  $1,04 \cdot 10^{-7}$  град/с, крену –  $4,18 \cdot 10^{-7}$  град/с.

### Висновки

Для застосування кутоміру на рухомих об'єктах необхідно перейти від використання лише акселерометрів при визначенні кута нахилу об'єкту відносно площини горизонту. Для цього доцільно використати блок мікроелектромеханічних чутливих елементів з гіроскопів та акселерометрів. Визначення поточних кутів нахилу об'єкта відносно вертикалі здійснюється за допомогою алгоритму БІСО, що ґрунтується на чисельному інтегруванні методом прямокутників рівняння Пуассона.

Для початкової виставки системи та для корекції випадкового дрейфу нуля гіроскопів використовувалися сигнали акселерометрів та розроблений комплементарний фільтр. Коефіцієнт підсилення фільтру було визначено емпірично в результаті випробувань приладу.

Для зручної роботи з приладом було розроблено конструкцію корпусу. Забезпечено можливість роботи інклінометра в автономному режимі.

Планується виготовлення дослідного зразка приладу та проведення натурних випробувань. Великий інтерес має дослідження точності і швидкодії розробленого алгоритмічного забезпечення в реальних умовах роботи приладу. Перспективним шляхом підвищення точності визначення кутової орієнтації відносно вертикалі є подальше удосконалення комплементарного фільтру. Цікавим є порівняння його точності із фільтром Маджвіка чи Калмана в умовах реальної роботи кутоміру.

Розроблений інклінометр на базі мікромеханічного IBM цілком може використовуватись як вимірювач кута нахилу не маневрених об'єктів, наприклад автомобілів.

#### Література

- [1] С. С. Сысоева, “Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения”, *Компоненты и технологии*, № 6, С. 40–46, 2014.
- [2] Y. Liu, H. Wang, F. Cheng, M. Wang, and X. Ni, “Improvement Method of Full-Scale Euler Angles Attitude Algorithm for Tail-Sitting Aircraft,” Springer, Singapore, 2018, С. 257–269.
- [3] Y. Wu, Y. A. Litmanovich, “Strapdown Attitude Computation: Functional Iterative Integration versus Taylor Series Expansion,” Sep. 2019, Accessed: Feb. 28, 2020. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1909.09935>.
- [4] MATLAB Support Package for Arduino Hardware Documentation. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/arduino/index.html>. [Accessed: 02-Jun-2020].
- [5] Г. Ю. Строкач, О. М. Сапегін, “Кутомір на основі акселерометру ADXL-335”, *на XII наук.-практ. конф. Погляд у майбутнє приладобудування*, 2019, С. 46–48.
- [6] Ю. Н. Челноков, С. Е. Переляев, Л. А. Челнокова, “Исследование алгоритмов определения инерциальной ориентации движущегося объекта,” *Известия Саратовского университета. Новая серия. Математика. Механика. Информатика*, Вып. 16, №. 1, С. 80–95, 2016, DOI: 10.18500/1816-9791-2016-16-1-80-95.
- [7] О. М. Сапегін, М. В. Норенко, “Алгоритм безплатформної інерціальної системи орієнтації на лазерних гіроскопах,” *Наукові вісті НТУУ “КПР”*, № 2, С. 108–113, 2017. DOI: 0.20535/1810-0546.2017.2.96257
- [8] В. Л. Волков, Н. В. Жидкова, “Особенности моделирования бесплатформенных инерциальных систем,” *Научное обозрение. Технические науки*, №. 4, С. 5–12, 2016.
- [9] В. В. Мелешко, О. И. Нестеренко, *Бесплатформенные инерциальные навигационные системы*. Кировоград: ПОЛИМЕД Сервис, 2011.
- [10] В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский, *Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем*. Москва, РФ: Наука, 1992.
- [11] W. Zhang, M. Ghogho, and B. Yuan, “Mathematical Model and Matlab Simulation of Strapdown Inertial Navigation System,” *Model. Simul. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–25, 2012, DOI: 10.1155/2012/264537

УДК 631.451

**О. М. Сапегін, Г. Ю. Строкач**

**МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ИНКЛИНОМЕТР**

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

В качестве измерителей угла наклона на подвижных объектах небольшой маневренности часто используют различные инклинометры. Как правило, это крупногабаритные устройства, в качестве чувствительных элементов которых используются различные маятники. Использование современных микроэлектромеханических чувствительных элементов, а также малогабаритных микропроцессоров в сочетании с технологией трехмерной печати позволяет создавать небольшие и дешевые приборы. В работе представлены результаты синтеза алгоритмического и программного обеспечения микромеханического инклинометров, а также приведена разработанная конструкция. В качестве чувствительных элементов использовался микромеханический инерциальный измерительный модуль MPU 6050, бортовым вычислителем выступил микроконтроллер семейства Arduino. Разработано алгоритмическое обеспечение инклинометров, основанное на использовании средств инерциальной навигации, а именно численного интегрирования уравнения ориентации Пуассона. Дрейфы нулей микромеханических гироскопов удалось частично компенсировать внедрением комплементарного фильтра. Он позволяет использовать сигналы акселерометров MPU 6050 для текущей коррекции исходной матрицы направляющих косинусов. Проведена серия тестов для подбора оптимального коэффициента усиления фильтра. Программное обеспечение для платформы Arduino разработано в среде Matlab Simulink. Это позволило значительно ускорить процесс разработки и тестирования устройства. Корпус разработан в среде SolidWorks. Использование миниатюрных дат-

чиков и контроллера позволило использовать технологию трехмерной печати для всех деталей прибора. Для автономной работы инклинометр дополнительно оснащен блоком аккумуляторов. Натурные испытания макета инклинометров показали стабильную точность и низкий дрейф углов наклона на неподвижном основании.

**Ключевые слова:** угломер; микромеханический датчик; Arduino; Matlab.

### **Oleksandr Sapegin, Grygoriy Strokach**

#### **MICROELECTROMECHANICAL INCKINOMETER**

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

A variety of inclinometers are often used to measure the angle of inclination on moving objects of low maneuverability. Often, these are large devices, with a various pendulum as sensitive elements. The use of modern microelectromechanical sensing elements, as well as small microprocessors in combination with three-dimensional printing technology allows creating small and cheap devices. The paper presents the results of the synthesis of algorithmic and software micromechanical inclinometer, as well as the developed design. The micromechanical inertial measuring module MPU 6050 was used as sensitive elements, the microcontroller of the Arduino family acted as the onboard computer. An algorithmic software for the inclinometer based on the use of inertial navigation tools, namely numerical integration of the Poisson orientation equation, has been developed. Zero drifts of micromechanical gyroscopes were partially compensated by the introduction of a complementary filter. It allows you to use the signals of the accelerometers MPU 6050 for the current correction of the output matrix of the guide cosines. A series of tests was performed to select the optimal filter gain. The software for the Arduino platform in the Matlab Simulink environment was developed. This significantly accelerated the process of development and testing of the device. The case is developed in the SolidWorks environment. The use of miniature sensors and a controller allowed the use of three-dimensional printing technology for all parts of the device body. For autonomous operation, the inclinometer was additionally equipped with a battery pack. Field tests of the inclinometer model showed stable accuracy and low drift of angles on a fixed base.

**Keywords:** inclinometer; microelectromechanical sensors; Arduino; Matlab.

*Надійшла до редакції  
04 червня 2020 року*

*Рецензовано  
17 червня 2020 року*

УДК 629.051

## **О ТОЧНОСТИ НЕКОТОРЫХ “РАСШИРЕННЫХ” АЛГОРИТМОВ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ**

*Лазарев Ю. Ф., Аврутов В. В., Мироненко П. С.*

*Национальный технический университет Украины*

*«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

*E-mail: [mironenkops46@gmail.com](mailto:mironenkops46@gmail.com)*

**Введение.** Основной проблемой при разработке алгоритмов бесплатформенных инерциальных систем ориентации является повышение их точности. Большинство алгоритмов, приводимых в известной литературе (см., например, [1]-[4]), опираются на упрощенную формулу Борца, в которой в правой части не учитывается член дифференциального уравнения ориентации с двойным векторным произведением. Представляет интерес выяснить, как повлияет на точность алгоритма "расширение" уравнения ориентации учетом отброшенного члена.

**Основная часть.** Методика исследований точности алгоритмов сводится к определению значений двух неизвестных параметров, которые характеризуют точность алгоритма: порядка точности и коэффициента пропорциональности. Такой подход позволяет провести моделирование лишь для некоторых конкретных значений амплитуды и частоты колебаний основания, а полученные результаты обобщить на любые амплитуды и частоты. Оценка эффективности рассматриваемых алгоритмов производится посредством сравнительного исследования систематической погрешности известных двухшаговых алгоритмов, опирающихся на измерения приращений квазикоординат поворота основания на каждом шаге опроса измерителей.