

**Ткачук А.Г.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ГРАДУЮВАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОПТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ НА БАЗІ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ

*Розроблено нову інформаційно-вимірjувальну систему для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів, а також проведення наземної відеозйомки на базі роботизованої гусеничної платформи. Мобільний робот побудовано на базі малошумного гусеничного шасі, яке має підвищену прохідність. Платформу виконано із високоміцного алюмінієвого сплаву, а гусениці зроблені з інженерного пластика, який забезпечує відмінну еластичність, чудовий демпфуючий ефект і високе зчеплення шасі з дорогою. Описано як на шасі платформи розміщено аналогову камеру з інфрачервоною підсвіткою, що дозволяє проводити відеозйомку як вдень, так і вночі, а також тепловізор. Всі оптичні сенсори розміщені на спеціалізованій рухомій башті, яка має кут повороту 360 градусів. Ідентифіковано, що на башті також розміщено систему стабілізації оптичних пристроїв із ємнісним чутливим елементом, який складається з двох пластин: стаціонарної та рухомої. Статичне калібрування проводиться при одному або декількох рівнях постійного прискорення. Динамічне калібрування, зазвичай, виконується за допомогою електродинамічного вібростенда. Розглянуто типи конструкцій ємнісного чутливого елемента. Описано методи калібрування чутливих елементів: статичні і динамічні. Приведено опис експериментальної установки для проведення градування чутливого елемента. Проведено метрологічну операцію градування чутливого елемента системи стабілізації оптичних пристроїв на базі роботизованої платформи. Встановлено, що кут повороту його вимірjувальної осі відносно довідкової вертикалі впливає прямо пропорційно на його вихідні покази та величину його похибки.*

**Ключові слова:** чутливий елемент, роботизована платформа, точність, інформаційно-вимірjувальна система, ємність.

**Постановка проблеми.** Тренд на робототехніку тільки зароджується і все це стає більш зрозумілим та доступним для людини. Щодня з'являється дедалі більше компаній, які починають випускати роботів, і навіть вирішувати завдання вже існуючих роботів. Кожен робот – це унікальна робота інженерів та програмістів, тому виробництво та розробка нових – це тривалий процес, який займає час.

Мобільна робототехніка є сьогодні однією з пріоритетних галузей науки і техніки. Саме ця галузь пов'язана зі створенням мобільних роботів, які можуть переміщатися у фізичному середовищі. Мобільні роботи, як правило, контролюються програмним забезпеченням і використовують датчики та іншу передачу для визначення їх оточення. Мобільні роботи поєднують прогрес у штучному інтелекті з фізичною робототехнікою, що дозволяє їм орієнтуватися в оточенні.

Сьогодні приладові розвідувальні системи, в основному, встановлюються на безпілотних літальних апаратах та мають обмежений функціонал. Тому використання багатофункціональних приладових інформаційно-вимірjувальних систем

на базі саме мобільних роботизованих наземних платформ є актуальним та доцільним.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Багато наукових праць таких видатних вчених, як: М.А. Павловський, Б.Б. Самотокін, Д.А. Браславський, С.С. Рівкін, А.Ю. Ішлінський, С.Ф. Коновалов, О.М. Безвесільна, В.П. Квасніков та інші, присвячені дослідженням акселерометрів.

У роботі [1, с. 2] описано стан і перспективи розвитку роботизованих дистанційно-керованих автомобілів, які можуть використовуватись як у військових, так і цивільних цілях.

У роботах [2, с. 60; 3, с. 6] запропоновано в якості чутливого елемента системи стабілізації відеокамери використовувати коріолісовий вібраційний гіроскоп. Приведено будову і принцип роботи відомої системи ударо- і віброзахисту навігаційного комплексу. Однак, відсутні пропозиції по покращенню технічних характеристик системи.

У роботах [4, с. 149; 5, с. 3] відображено результати досліджень локалізації небезпечних газів на відкритому повітрі. Представлено систему, що здатна виконувати пошук газів по різних

сценаріях забруднення. Дану систему було вдосконалено враховуючи непередбачуваний характер розсіювання газу, що описано в [6, с. 36].

Провідними виробниками акселерометрів є фірми Analog Devices, Motorola, Sensor Nor, Nippondenco, SNL та інші.

**Постановка завдання.** Калібрування чутливих елементів дуже важливе і необхідне при вимірах прискорення, вібрації і ударів.

Методи калібрування існують як статичні, так і динамічні. Статичне калібрування проводиться при одному або декількох рівнях постійного прискорення. Наприклад, якщо обраний метод калібрування за допомогою похилого столу, то використовується вертикальна складова вільного падіння без вибору величини. З іншого боку, якщо обрана центрифуга, то вона виробляє постійне прискорення в залежності від швидкості обертання, а величини можуть бути обрані в широкому діапазоні від 0 g до 50000 g. Динамічне калібрування, зазвичай, виконується за допомогою електродинамічного вібростенда. Електродинамічний вібростенд призначений для коливання у синусоїдальному русі зі змінними частотами і амплітудами. Вони стабілізуються на обраних рівнях калібрування. Це абсолютний метод, який складається з вимірювання зміщення за допомогою лазерного інтерферометра і точного частотного вимірювача для точних частотних вимірювань. Вібростенд повинен приводитися в рух підсилювачем потужності, що дає синусоїдальний вихід з мінімальними спотвореннями. Високоточні акселерометри, в основному п'єзоелектричного типу, калібруються за абсолютним методом і потім використовуються в якості робочого стандарту. Кращим методом є зворотне калібрування, при якому зразок випробування монтується безпосередньо на робочий стандарт, який, в свою чергу, монтується на електродинамічний вібростенд [7, с. 36].

*Мета* – проведення метрологічної операції градування чутливого елемента системи стабілізації для оптичних пристроїв на базі роботизованої платформи.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Науковцями лабораторії робототехніки Державного університету «Житомирська політехніка» розроблено нову інформаційно-вимірювальну систему для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів, а також проведення наземної відеозйомки на базі роботизованої гусеничної платформи (рис. 1).

Мобільний робот побудовано на базі малошумного гусеничного шасі, яке має підвищену



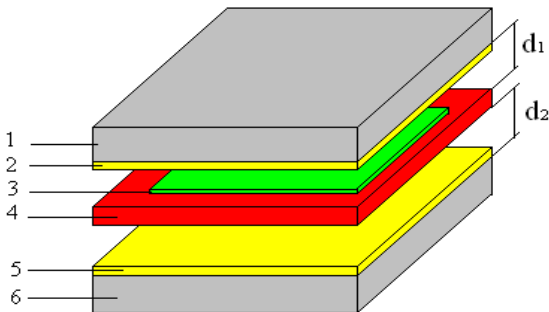
**Рис. 1. Інформаційно-вимірювальна система для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів та проведення наземної відеозйомки на базі роботизованої гусеничної платформи**

прохідність. Саму платформу виконано із з високоміцного алюмінієвого сплаву. Гусениці танка зроблені з інженерного пластика, який забезпечує відмінну еластичність, чудовий демпфуючий ефект і високе зчеплення шасі з дорогою. Робоплатформа має два потужні електродвигуни, оснащені редукторами з металевими шестернями.

На шасі розміщено аналогову камеру з ІЧ підсвіткою, що дозволяє проводити відеозйомку також і в нічний час. Поруч з відеокамерою встановлено тепловізор. Всі оптичні сенсори розміщені на спеціалізованій рухомій башті, яка має кут повороту 360 градусів. На башті також розміщено систему стабілізації оптичних пристроїв із ємнісним чутливим елементом, який складається з двох пластин: стаціонарної, часто з'єднаної з корпусом, і вільно переміщуваної усередині корпусу, до якого приєднана інерційна маса. Ці пластини формують конденсатор, величина ємності якого залежить від відстані між ними і від прискорення руху, випробуваного датчика. Максимальне переміщення, яке визначається ємнісним акселерометром, не перевищує 20 мкм. Отже, в таких датчиках завжди необхідно компенсувати дрейф різних параметрів, а також пригнічувати всі можливі перешкоди. Тож зазвичай акселерометри мають диференціальну структуру, для чого в їх склад вводиться додатковий конденсатор, ємність якого повинна бути близька до ємності основного конденсатора. При цьому напруги на

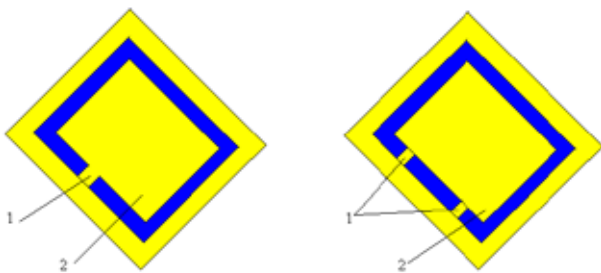
конденсатори подаються із зміщенням фаз  $180^\circ$ . Тоді величина прискорення датчика буде пропорційна різниці значень ємностей конденсаторів. Диференціальна структура дозволяє збільшити амплітуду і поліпшити лінійність сигналу, так як залежність ємності від переміщення є нелінійною [8, с. 57].

На рис. 2 показано поперечний переріз чутливого елементу, в якому інерційна маса (ІМ) розміщена між верхньою нерухомою обкладкою та нижньою. Інерційна маса прикріплена до рухомої обкладки. Верхня нерухома обкладка та нижня відділенні від ІМ шарами діелектрика,  $d_1$  та  $d_2$  – змінні відстані між обкладками. Всі елементи виготовленні методами мікротехнологій на одній кремнієвій підкладці.



**Рис. 2. Ємнісний акселерометр:**  
1,6 – нерухомі обкладки; 2,5 – діелектрики;  
3 – інерційна маса; 4 – рухома обкладка

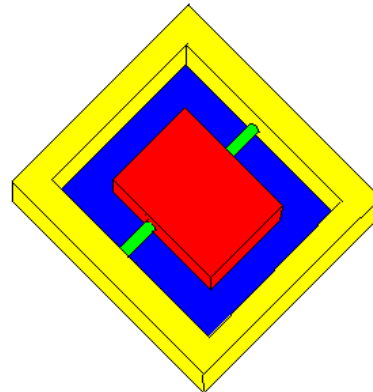
Існує багато методів закріплення ІМ на рухомій обкладці. Розглянемо два основні конструктивні види закріплення ІМ: консольна (рис. 3) конструкція та мостова (рис. 4).



**Рис. 3. Консольна конструкція:** 1 – балка;  
2 – ІМ: а) закріплення ІМ з однією балкою;  
б) закріплення ІМ з двома балками

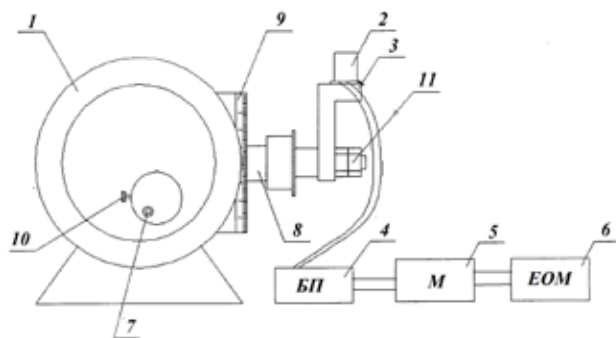
На рис. 3, а зображено консольну конструкцію закріплення ІМ за допомогою однієї балки. При такій конструкції переміщення маси по осі “у” ввєрх чи ввєниз, призведе до обертання її по осі “х”.

Це ускладнює вимірювання зміни ємності акселерометра. В подальшому балку було розділено на дві (рис. 3, б). Це призвело до того, що коли ІМ піднімається ввєрх чи опускається ввєниз по осі “у” практично немає обертання по осі “х”. На рис. 4, а зображено мостову конструкцію закріплення ІМ у стані, коли на ІМ не діє прискорення і вона знаходиться у статичному стані. На рис. 4, б зображено переміщення ІМ при дії прискорення. Як видно, при дії прискорення, балки які закріплюють ІМ з двох боків рівномірно опускають ІМ або піднімають.



**Рис. 4. Мостова конструкція**

Градуювання – це метрологічна операція, за допомогою якої засіб вимірювань (міра або вимірювальний прилад) забезпечується шкалою або градуювальною таблицею (кривою) [9, с. 10]. Для цього використовуємо установку (рис. 5), яка складається із оптичної ділильної головки 1, чутливого елемєнту 2, встановленого на кронштейні 3, блоку підсилення 4, модуля введення-виведення 5 та ЕОМ 6.



**Рис. 5. Експериментальна установка для градуювання:** 1 – оптична ділильна головка;  
2 – чутливий елемент; 3 – кронштейн;  
4 – блок підсилення; 5 – модуль введення-виведення; 6 – ЕОМ; 7,10 – поворотні ручки;  
8 – вал; 9 – відлікова шкала; 11 – прижимні гайки

Градуювання відбувається при нахилєнні вимірювальної осі  $OZ$  за допомогою оптичної ділильної головки на деякий кут  $\alpha_z$  (рис. 6). Градуювання

реалізується за допомогою поворотної ручки 7 оптичної ділильної головки 1. При цьому повертається вал 8, кронштейн 3, а також закріплений на кронштейні чутливий елемент 2. Кут повороту  $\alpha_z$  керується по відліковій шкалі 9. Вихідний сигнал чутливого елемента 2 відображається на ЕОМ 6.

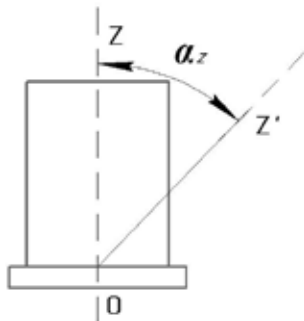


Рис. 6. Кут нахилу чутливого елемента

Отримані результати  $g_{zЕКСП}$  градуювання чутливого елемента експериментальним шляхом відобразимо у табл. 1 та порівняємо їх із аналітичними розрахунками ( $g_{zТЕОР} = g \cdot \cos\alpha_z$ ). Побудуємо графіки залежностей  $g_z$  від кута повороту  $\alpha_z$  (рис. 7). Оскільки обрано метод статичного градуювання, то і як прискорення використано прискорення сили тяжіння, а одиниці вимірювання – мГл.

Як бачимо із табл. 1, різниця між відхиленнями вимірювальної осі чутливого елемента на кут  $\alpha_z$  обчисленими аналітично та отримані експериментально не перевищує 1 мГл. Кут повороту його вимірювальної осі відносно довідкової верти-

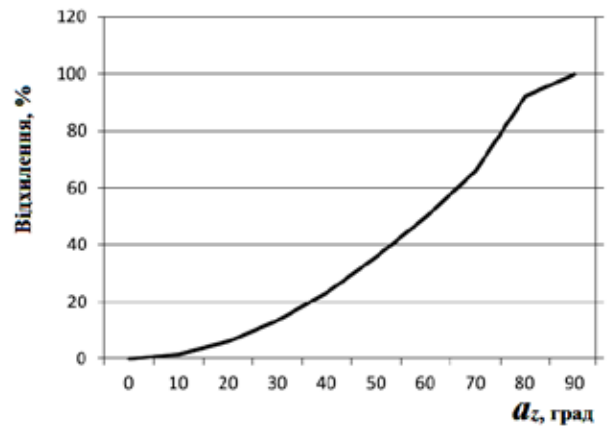


Рис. 7. Графік залежності відхилення вимірювальної осі чутливого елемента  $a$

калі впливає прямо пропорційно на його вихідні покази та величину його похибки.

**Висновки.** Розглянуто нову інформаційно-вимірювальну систему для проведення відеозйомки на базі роботизованої гусеничної платформи. Встановлено, що дана система є необхідною для попередження про можливі загрози вибухів чи отруєння газами, проведення рятувальних робіт тощо. Описано розроблену конструкцію роботизованої платформи та башту, на якій встановлено оптичні пристрої, які необхідно стабілізувати у положення вертикалі. Приведено схему чутливого елемента системи стабілізації оптичних пристроїв. Проведено градуювання розробленого чутливого елемента.

Таблиця 1

Градувальна таблиця чутливого елемента системи стабілізації башти для оптичних пристроїв

№	$a$	$g_{zЕКСП}$ , мГл	$g_{zТЕОР}$ , мГл	Відхилення експерт. від теорет. по модулю, мГл	Відхилення від поточного значення, %
1	0	981100,375	981100,376	0,001	0
2	10	966195,234	966195,257	0,023	1,52
3	20	921932,665	921932,784	0,119	6,03
4	30	849658,072	849657,849	0,223	13,39
5	40	751566,893	751566,491	0,402	23,40
6	50	630639,662	630639,161	0,501	35,72
7	60	490549,470	490550,188	0,718	50,01
8	70	335556,981	335556,091	0,890	65,79
9	80	17365,725	17364,818	0,907	98,23
10	90	0	0	0	100

**Список літератури:**

1. Калінін О.М., Костюк В.В., Русіло П.О., Варванець Ю.В. Стан і перспективи розвитку самохідних дистанційно-керованих машини для потреб Збройних Сил України. *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2016. № 39.
2. Chikovani V.V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator / V.V. Chikovani // *Електроніка та системи управління*. – №4(34). – 2012р. – С. 56-63.
3. Remillieux, G.; Delhayе, F. Sagem Coriolis Vibrating Gyros: A vision realized/ Remillieux G.; Delhayе F.// *Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS)*, 2014. – С. 1-13.

4. Bartholmai M, Neumann P. Micro-drone for gas measurement in hazardous scenarios via remote sensing. 2010, 149:152.
5. Neumann P, Bartholmai M, Schiller JH, et al. Micro-drone for the characterization and self-optimizing search of hazardous gaseous substance sources: A new approach to determine wind speed and direction. In: Robotic and Sensors Environments (ROSE), 2010 IEEE International Workshop on; IEEE; 2010. p. 1-6. DOI: 10.1109/rose.2010.5675265.
6. Neumann P, Asadi S, Schiller JH, et al. An artificial potential field based sampling strategy for a gas-sensitive micro-drone. In: IROS Workshop on Robotics for Environmental Monitoring (WREM); 2011. p. 34-38.
7. Webster J. G. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement / J. G. Webster, H. Eren. Boca Raton : CRC Press, 2014. 2nd ed. 1603 p.
8. Безвесільна О. М. Перетворювальні пристрої приладів / О. М. Безвесільна, П.М. Таланчук. К. : ІСДО, 1994. 448 с.
9. Безвесільна О.М. Система стабілізації вимірювальної осі п'єзогравіметра авіаційної гравіметричної системи у положення вертикалі / О. М. Безвесільна, А.Г. Ткачук. Вісник інженерної академії України. 2013. № 1. С. 10–12.

#### **Tkachuk A.H. GRADUATING CHARACTERISTICS OF THE SENSITIVE ELEMENT OF THE OPTICAL DEVICES STABILIZATION SYSTEM BASED ON A ROBOTIC PLATFORM**

*A new information and measurement system have been developed to monitor the presence of harmful and explosive gases, as well as ground video recording based on a robotic crawler platform. The mobile robot is built on the basis of a low-noise tracked chassis, which has increased cross-country ability. The platform is made of high-strength aluminum alloy, and the tracks are made of engineering plastic, which provides excellent elasticity, excellent damping effect and high traction of the chassis with the road. It is described how an analog camera with infrared illumination is placed on the chassis of the platform, which allows video recording both during the day and at night, as well as a thermal imager. All optical sensors are placed on a specialized mobile tower that has a rotation angle of 360 degrees. It has been identified that the tower also houses a stabilization system for optical devices with a capacitive sensitive element, which consists of two plates: a stationary one and a movable one. Static calibration is performed at one or more levels of constant acceleration. Dynamic calibration is usually performed using an electrodynamic vibration stand. The types of constructions of the capacitive sensitive element are considered. Methods of calibration of sensitive elements are described: static and dynamic. A description of the experimental setup for calibration of the sensitive element is given. A metrological calibration operation of the sensitive element of the optical device stabilization system based on the robotic platform was carried out. It is established that the angle of rotation of its measuring axis relative to the reference vertical affects directly proportionally its output readings and the magnitude of its error.*

**Key words:** sensitive element, robotic platform, accuracy, information and measurement system, capacity.