

УДК 621.326

М. Паламар, докт. техн. наук; П. Мальований; Я. Паламар

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ НАХИЛУ ОПОРНО-ПОВОРОТНОЇ ПЛАТФОРМИ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ MEMS АКСЕЛЕРОМЕТРА

***Резюме.** Досліджено похибки, що виникають внаслідок поперечного нахилу площини корпусу сенсора кута на основі MEMS інклінометра. Наведено результати дослідження, отримані при вимірюваннях кутів опорно-поворотної платформи антени, запропоновано метод підвищення точності на основі використання трьохосового MEMS акселерометра та процедури калібрування сенсора перед початком роботи.*

***Ключові слова:** MEMS, інклінометр, сенсор кута, калібрування, опорно-поворотний пристрій, система керування, антенна система.*

M. Palamar, P. Malovany, Y. Palamar

IMPROVEMENT OF THE MEASUREMENT ACCURACY OF THE SUPPORT-ROTARY PLATFORM OF THE ANTENNA SYSTEM USING MEMS ACCELEROMETERS

***Summary** The article is devoted to the research of errors arising from the influence of non-linear characteristics of MEMS gyroscopes, which appear at high angles deviation plane of the crystal sensor from horizontal surface, and also from the influence of cross slope plane casing MEMS inclinometer which is based on gyroscopic sensor. The research for the purpose of estimation possibility of using such sensors for precision control tasks in controlling antenna system based on support-rotary platform with paralel kinematic links and octahedral composition Hexapod type and other targeting systems have been performed.*

The automated laboratory stand for research of MEMS gyroscope parameters which allows to compare results of measurements and data of pecision optoelectronic angle sensor in range $\pm 90^\circ$ with presence of transverse slope influence has been developed. The results of experimental research, which shows main sources of MEMS inclinometer errors with their numerical estimation, are presented.

The method of increasing the accuracy of the angular position determination by means of using three-axis MEMS accelerometer is proposed and sensor calibration procedure before commencement of operation is considered. The importance of the method based on considering information received from two other mutually-perpendicular coordinate axes to compensate the negative influence of cross slope on the main axis by creating cross interactions correcting matrix has been analysed.

Due to angle calculation using 12 calibrated parameters the errors were decreased owing to crystal cross slope influence and MEMS sensor non-linearity conversation with slope angles above 45 degrees.

The using of the method has practical value in the tasks of designing precision antenna complex control systems with new the Hexapod type support-rotary platforms, in robotics and many other technical targeting systems. The method allows to increase the accuracy, reliability and to reduce the cost of such systems.

***Key words:** MEMS, inclinometer, angle sensor, calibration, support-rotary device, control system, antenna system.*

Вступ і актуальність проблеми. В останні роки в робототехніці, конструкціях станків, стендів та іншого обладнання все більше використовують механізми маніпуляторів з паралельними кінематичними ланками, зокрема на основі

шестиступеневої платформи Стюарта або Нехарод [1]. У таких механізмах рух платформи здійснюється системою лінійних приводів з октаедральною компоновкою, яка забезпечує 6 ступенів вільності і високу точність переміщень. Завдяки унікальним властивостям такої конструкції на її основі відносно недавно з'явилися опорно-поворотні платформи (ОПП) для великогабаритних антенних комплексів з діаметрами рефлекторів понад 3 метри, які мають низку переваг порівняно з класичними ОПП з високоточними обертовими механізмами, таких як значно менша маса, поєднання високої жорсткості, компактності, надійності, простота конструкції, технологічність складання й обслуговування.

Разом з тим для наведення променя антени на супутник на основі такої платформи ускладнюється керування нею й визначення просторового кутового положення. Типові кутові сенсори для визначення кутів повороту осей АС з'єднуються обертовими валами за допомогою спеціальних перехідних муфт для суміщення осей. Проте у ОПП Нехарод поворотних осей азимута і кута місця немає, а кут нахилу платформи необхідно розраховувати через видовження системи лінійних актуаторів з точностями до одиниць кутових мінут. Разом з тим неточності у вимірюванні переміщень актуаторів, наявність люфтів деформацій, або похибки початкової установки (горизонтування) платформ можуть призвести до похибок наведення і втрати зв'язку з супутником.

У навігаційних системах для подібних задач використовують пристрої визначення координат орієнтації об'єктів у просторі на основі різних типів гіроскопів, які є досить громіздкими і дорогими приладами. Завдяки розвитку сучасної елементної бази та досягнень нанотехнологій на сьогодні з'явилися твердотілі гіроскопічні сенсори, акселерометри, виготовлені на основі MEMS технологій (Мікро-електро-механічні системи). Пристрої такого типу можуть забезпечити високу роздільну здатність, зберігаючи при цьому невеликі розміри.

Незважаючи на значну кількість публікацій з висвітлення принципів побудови MEMS-гіроскопів, у них, зазвичай, не висвітлюються практичні аспекти апаратної реалізації MEMS гіроскопів для задач вимірювання кутів наведення АС з високою точністю, аналізуванням і оцінюванням похибок, що виникають у системі наведення, зокрема від взаємовпливу осей нахилу, вібрацій, кліматичних впливів і т.п.

Мета роботи – дослідження похибок, що виникають при використанні сенсорів кута на основі інклінометрів, виготовлених за MEMS технологією та способів їх зменшення.

Аналіз об'єкта й методики дослідження. За принципом роботи існує багато типів гіроскопів (рис.1), які можна поділити на два основні класи: вільні гіроскопи (астатичні), що зберігають заданий напрямок і датчики кутової швидкості, до яких, власне, і відносяться MEMS гіроскопи.

Класичні гіроскопи, як правило, є складними і дуже дорогими пристроями для бортового устаткування літаків, кораблів і т.п. Наприклад, найпростіші гіроскопи МГВ-5 і МГВ-6 російського виробництва важать 1,3 та 1 кг і коштують \$12000 і \$6000 відповідно [2]. До малогабаритних сенсорів кутової швидкості, що можуть використовуватися в якості датчиків первинної інформації у навігаційних системах, відносяться гіроскопи, що динамічно налаштовуються, волоконно-оптичні й хвильові твердотілі гіроскопи, а також мікромеханічні гіроскопи (рис.1).

Як бачимо з діаграми (рис.1), мікромеханічні гіроскопи відносяться до області відносно низьких точностей, перш за все через наявність дрейфу кута, спричиненого інтегруванням прискорення й швидкості сенсора.

Але останнім часом завдяки розвитку інноваційних MEMS технологій ситуація змінюється, з'явилися нові класи мікромеханічних гіроскопічних чутливих елементів на базі кремнієвих технологій [3,4], що являють собою об'ємний електронний чіп з

кварцовою підкладкою площею у кілька квадратних міліметрів, на яку методом фотолітографії наноситься плоский вібратор.

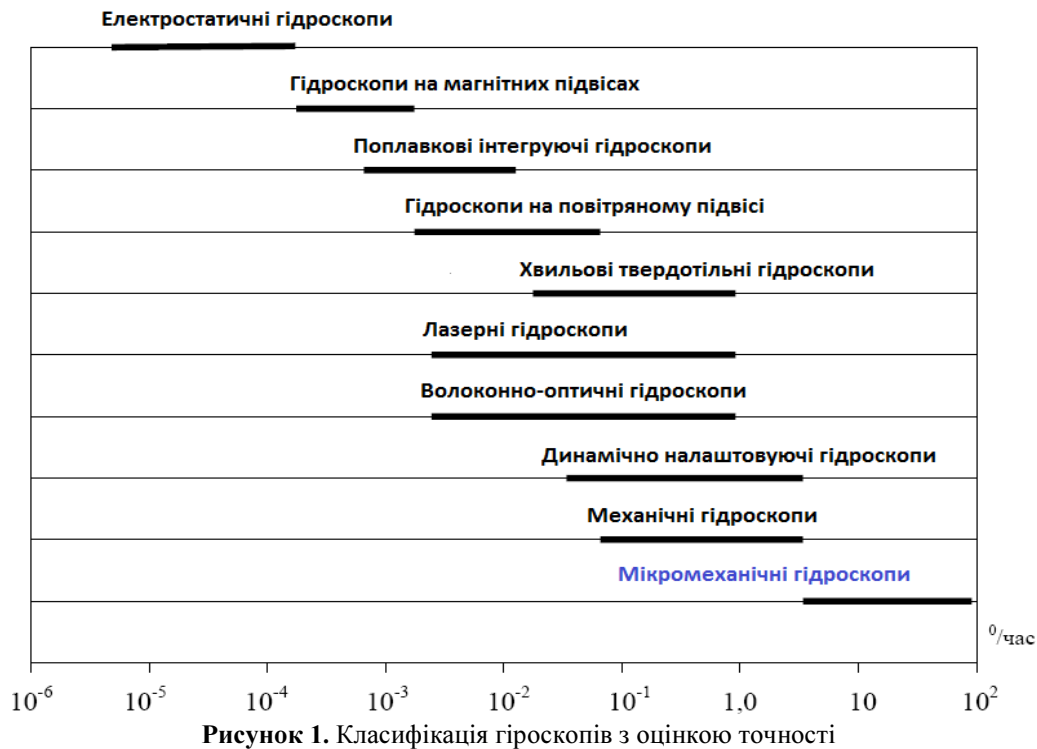


Figure 1. Gyroscopes classification with estimation of precision

Такі мікромеханічні гіроскопи мають цілу низку унікальних переваг порівняно з механічними прототипами, перш за все надійність, стійкість до вібрацій та жорстких кліматичних умов, мініатюрність, мікроспоживання, низька вартість, що робить їх перспективними для використання у різних навігаційних системах.

Для оцінювання параметрів та можливостей використання MEMS акселерометрів у системах керування антенними комплексами з поворотною платформою Нехарод для визначення просторового кутового положення променя антени при наведенні на супутник розроблено вимірювальний стенд на базі класичної поворотної платформи оснащеної електронними засобами керування та вимірювання кутів (рис.2).

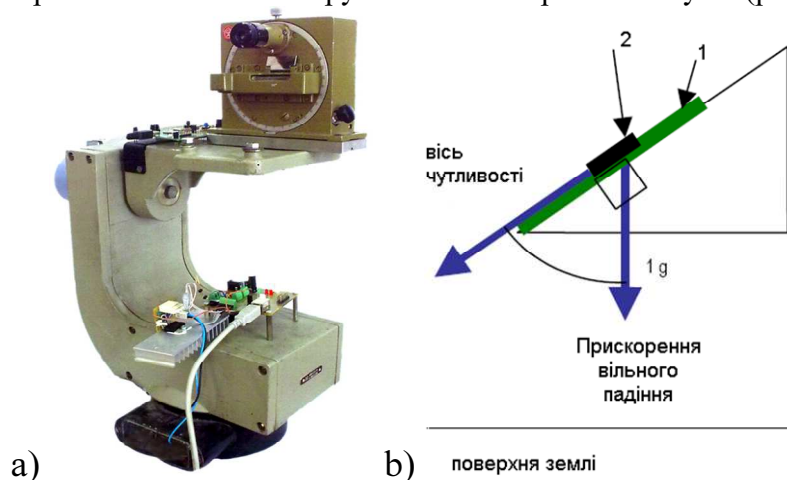


Рисунок 2. Вимірювальний стенд для дослідження MEMS – інклінометрів

Figure 2. Measuring stand for research of MEMS – inclinometers

У роботі використано MEMS сенсор кута марки SCA61T-FA1H1G, який після попереднього опрацювання інформації внутрішнім мікроконтролером видає значення кутового положення, тобто є інклінометром на основі MEMS технології [5]. Він являє собою інтегральну схему у 8-выводному SMD корпусі. Діапазон вимірювання його становить $\pm 90^\circ$, роздільна здатність $0,0025^\circ$, робоча напруга 4.75...5.25 В. Інклінометр містить вбудований температурний сенсор та аналогово-цифровий перетворювач з роздільною здатністю 11 біт, а також має функцію автоматичного калібрування, яка коригує вихідне значення залежно від температури сенсора, оскільки зміна температури кристалу збільшує похибку вимірювання.

Отримання кутового положення із використанням показів MEMS-акселерометра ґрунтується на використанні залежності

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{D_{out}[LSB] - D_{out@0^\circ}[LSB]}{Sens[LSB/g]}\right), \quad (1)$$

де α – кут (в радіанах);

$D_{out}[LSB]$ – виміряне цифрове значення кута;

$D_{out@0^\circ}[LSB]$ – цифрове значення при положенні інклінометра в 0° ;

$Sens[LSB/g]$ – чутливість інклінометра.

Перш за все необхідно було дослідити залежність похибок інклінометра від кутів нахилу платформи у повному діапазоні кутів нахилу, а також оцінити вплив поперечного нахилу платформи на результати вимірювань.

Розроблене програмне забезпечення контролера лабораторного стенда призначене для автоматизованого керування поворотною платформою стенда, зчитування даних від сенсорів, передавання їх через послідовний інтерфейс на ПЕОМ. Друга частина програмного забезпечення для ПЕОМ призначена для видачі команд на контролер, приймання, опрацювання та візуалізації отриманих даних.

Експериментальні дослідження та аналіз результатів. Для зняття характеристик сенсора у повному робочому діапазоні здійснювався поворот платформи навколо осі обертання електроприводом постійного струму із блоком керування за командами з ПЕОМ. Кут нахилу платформи визначався MEMS – інклінометром та порівнювався з даними прецизійного оптоелектронного сенсора кута, закріпленого на валу обертання платформи (рис.2а). Дискретність відліку оптоелектронного сенсора становить 20 кут. сек., похибка вимірювань ± 2 кут. мін. у повному діапазоні обертання $0...360$ град.

На рис.3 приведено графік різниці кутів за даними інклінометра та оптоелектронного сенсора.

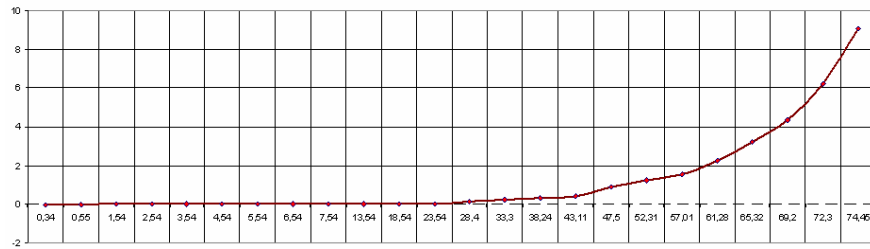


Рисунок 3. Різниця показів кутів MEMS-інклінометра і оптоелектронного сенсора

Figure 3. Difference between angle measurements of MEMS inclinometer and optoelectronic sensor

Як бачимо з графіка, похибка визначення кутового положення MEMS – інклінометром суттєво зростає після кута нахилу платформи більше 45 град. і при наближенні до 90^0 значення похибки перевищує 8^0 . Це пояснюється, тим що площина кристала MEMS – інклінометра зменшується відносно вектора прискорення вільного падіння (рис.2b) і, відповідно, зменшується чутливість кристала.

Далі досліджувався вплив поперечного нахилу платформи на результати вимірювань кута MEMS інклінометром по основній осі. Вимірювання проводилися при кутах поперечного нахилу 0^0 , 30^0 та 65^0 відповідно у діапазоні кутів $\pm 90^0$ для основної осі. Кут поперечного нахилу вимірювався оптичним приладом (квадрантом). Графіки залежності вихідних даних акселерометра від кута за результатами вимірювань при різних кутах поперечного нахилу платформи наведені на рис.4. Також знято покази сенсора без поперечного нахилу, але при зміщенні сенсора на 45 см від центру осі обертання поворотної платформи.

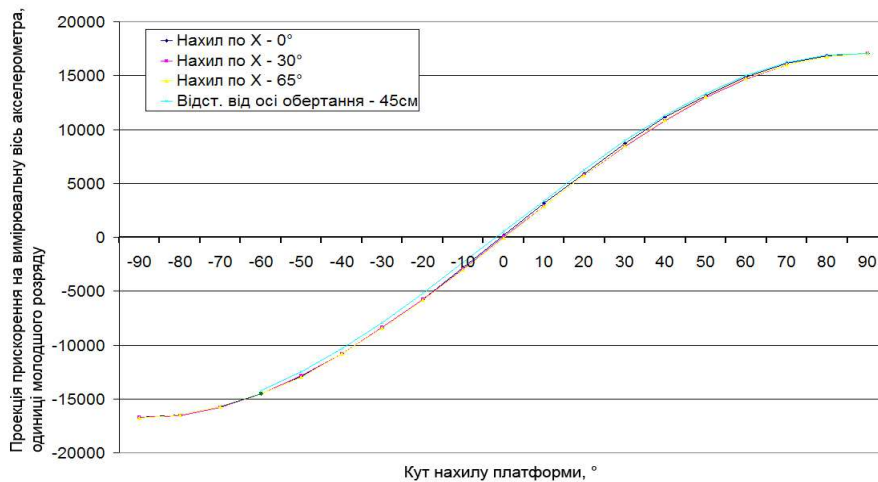


Рисунок 4. Результат вимірювання при різних кутах поперечного нахилу в діапазоні $-90^0 \dots +90^0$

Figure 4. Result of measurements with different tilt angle in range $-90^0 \dots +90^0$

Як бачимо з графіків, вихідний сигнал MEMS – інклінометра нелінійний, а поперечний нахил платформи дає суттєвий вплив на результати вимірювання кута інклінометром. Згідно з рис.5 розбіжність показів при поперечному нахилі у 30^0 досягає 10 одиниць молодшого розряду за даними MEMS інклінометра, що призводить до похибки 0,8 град. Також суттєвою є похибка від неточності установавання його на об'єкті.

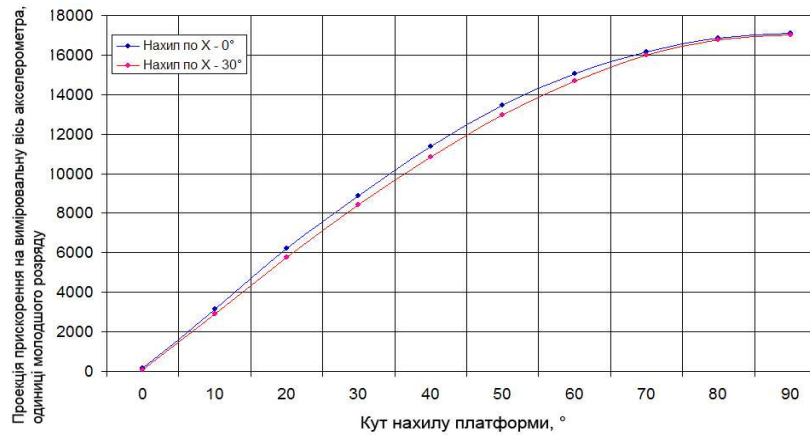


Рисунок 5. Вплив поперечного нахилу платформи у 30° на покази акселерометра в діапазоні 0°...90°

Figure 5. Influence of platform cross inclination of 30° on the accelerometer values in range 0°...90°

Метод зменшення впливу поперечного нахилу на вимірювання кута. Враховуючи, що при входженні інклінометра в нелінійну зону видачі даних по одній осі інша перпендикулярна їй вісь навпаки наближається до лінійної зони, пропонується використати 3-осьовий інклінометр. Для врахування негативного впливу поперечного нахилу проводимо калібрування сенсора з урахуванням інформації, знятої з інших координатних осей.

Для трьохосового інклінометра калібрування проводимо з використанням перетворень

$$G_{12} = \begin{pmatrix} G_{12x} \\ G_{12y} \\ G_{12z} \end{pmatrix} = W G_f + V = \begin{pmatrix} W_{xx} & W_{xy} & W_{xz} \\ W_{yx} & W_{yy} & W_{yz} \\ W_{zx} & W_{zy} & W_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{fx} \\ G_{fy} \\ G_{fz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де G_{12} – калібрований вихід акселерометра по 12 параметрах;

W – матриця перетворення, яка компенсує усі можливі взаємодії між вимірювальними осями, а також неточності розміщення чутливого елемента в корпусі акселерометра та самого акселерометра на друкованій платі;

G_f – нормований вихід акселерометра;

V – матриця коефіцієнтів, які компенсують зміщення нуля чутливих елементів по всіх трьох осях.

Матриця W має 9 незалежних елементів і розширює базову калібруючу модель через включення всіх можливих перехресних взаємодій і будь-який поворот корпусу сенсора на друкованій платі.

Будь-яке i -те вимірювання кутів нахилу $\theta[i]$ та $\phi[i]$ можна записати

$$\begin{pmatrix} G_{12x}[i] \\ G_{12y}[i] \\ G_{12z}[i] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{xx} & W_{xy} & W_{xz} \\ W_{yx} & W_{yy} & W_{yz} \\ W_{zx} & W_{zy} & W_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{fx}[i] \\ G_{fy}[i] \\ G_{fz}[i] \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} -\sin \theta[i] \\ \cos \theta[i] \sin \phi[i] \\ \cos \theta[i] \cos \phi[i] \end{pmatrix} \quad (3)$$

Формула (3) розкладається на три незалежні рівності (4) для чотирьох калібровальних параметрів у кожному з трьох каналів прискорення.

$$\begin{aligned}
W_{xx}G_{fx}[i] + W_{xy}G_{fy}[i] + W_{xz}G_{fz}[i] + V_x &= -\sin\theta[i]; \\
W_{yx}G_{fx}[i] + W_{yy}G_{fy}[i] + W_{yz}G_{fz}[i] + V_y &= \cos\theta[i]\sin\varphi[i]; \\
W_{zx}G_{fx}[i] + W_{zy}G_{fy}[i] + W_{zz}G_{fz}[i] + V_z &= \cos\theta[i]\cos\varphi[i].
\end{aligned}
\tag{4}$$

Відповідно до виразу (4) проводиться розрахунок кутового положення орієнтації опорно-поворотної платформи антенної системи, завдяки чому зменшуються похибки як від впливу поперечного нахилу кристалу, так і від нелінійності перетворення MEMS сенсора при великих кутах нахилу, як показано на рис.6.

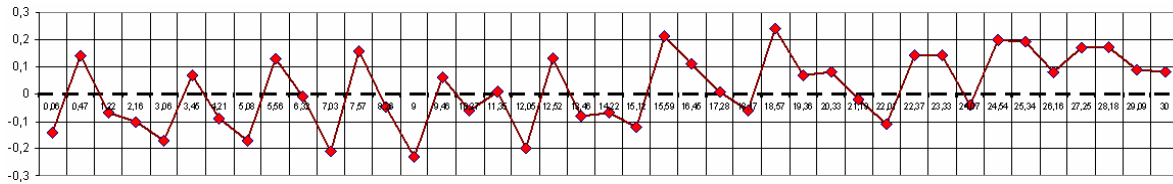


Рисунок 6 Точність MEMS-акселерометра після калібрування

Figure 6 Accuracy of MEMS-accelerometer after calibration

Висновки. При вимірюванні кутів нахилу платформи за допомогою MEMS акселерометрів необхідно враховувати вплив від нелінійності характеристики сенсора на великих кутах нахилу та вплив від поперечного нахилу корпуса сенсора в інших площинах. При використанні три-осьових акселерометрів та проведенні калібрування, яке враховує взаємне розміщення кристалів по 3 координатах шляхом введення коригуючих коефіцієнтів перехресного впливу, можна підвищити точність визначення кутових координат наведення антени в усьому діапазоні вимірювання кутів нахилу платформи.

Conclusions. During measuring slope angles of platform using MEMS accelerometers the influence of the non-linearity of the sensor at high slope angles and the influence of cross-slope sensor case in other planes must be taken into account. When a 3-axis accelerometer is used and calibration procedure is performed which takes into account the mutual position of crystals in 3 coordinates through entering cross influence of the correcting coefficients in all slope angles measurement range of platform could be increased.

Список використаної літератури

1. Fichter, E. F. A Stewart platform – based manipulator, general theory and practical construction. International Journal of Robotics Research [Text] / E. F. Fichter, 1986. – Vol. 5. – No. 2. – Pp. 157–182.
2. Коврижкін, О. Г. Використання магнітометрів для визначення кутової орієнтації безпілотного літального апарата [Текст] / О. Г. Коврижкін, В. Б. Мельникович, І. Я. Горін. – 2009.
3. Mark, Pedley. High precision calibration of a three-axis accelerometer [Text] / Mark, Pedley // Freescale Semiconductor, 2013.
4. Laura, Salhuana. Tilt sensing using linear accelerometers [Text] / Laura, Salhuana // Freescale Semiconductor, 2012.
5. Murata. The SCA61T inclinometer series Datasheet Laura, Salhuana [Text] / Murata // Electronics Oy, 2010

Отримано 11.06.2015