

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

НОВІТНІ ПРИЛАДИ ОРІЄНТАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ

Лабораторний практикум

для студентів напряму підготовки 051003 «Приладобудування»
спеціальності 7.05100303 «Прилади і системи орієнтації та навігації»
приладобудівного факультету

Рекомендовано Вченою радою приладобудівного факультету НТУУ «КПІ»

Київ
НТУУ «КПІ»
2012

Новітні прилади орієнтації і навігації: Лабораторний практикум для студентів напряму підготовки 051003 «Приладобудування» спеціальності 7.05100303 «Прилади і системи орієнтації та навігації» приладобудівного факультету / Уклад.: О. І. Нестеренко, В. Є. Баланчук – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 74 с.

Рекомендовано Вченою радою приладобудівного факультету НТУУ «КПІ»

Навчальне видання

Новітні прилади орієнтації та навігації

Лабораторний практикум

для студентів напряму підготовки 051003 «Приладобудування»
спеціальності 7.05100303 «Прилади і системи орієнтації та навігації»
приладобудівного факультету

Укладачі

Нестеренко Олег Іванович

Баланчук Володимир Євгенович

Відповідальний
редактор

Ю.Ф. Лазарєв, канд. техн. наук, доц.

Рецензент

Черняк М. Г., канд. техн. наук, доц.

За редакцією укладачів

Надруковано з оригінал-макета замовника

Передмова

Методичні вказівки складені відповідно до чинної робочої навчальної програми дисципліни «Новітні прилади» для студентів приладобудівного факультету, які навчаються за програмою освітньо-кваліфікаційного рівня спеціаліст за напрямом підготовки 051003 «Приладобудування» спеціальності 7.05100303 «Прилади і системи орієнтації та навігації».

Метою даного навчального видання є поглиблення розуміння роботи новітніх типів гіроскопів, акселерометрів та систем на їх основі, ознайомлення зі зразками сучасних датчиків, проведення експериментальних досліджень їхніх характеристик.

Тематика робіт охоплює дослідження мікромеханічних датчиків кутової швидкості, акселерометрів, твердотілого хвильового гіроскопа.

Методичні вказівки містять короткі теоретичні відомості про моделі вихідних сигналів гіроскопів та акселерометрів, методики оцінки їхніх параметрів, обладнання, яке застосовується для калібрування акселерометрів, гіроскопів та систем на їх основі. Навчальне видання також містить порядок виконання лабораторних робіт та методику обробки даних вимірювань.

В ході виконання лабораторних робіт студенти набувають практичних навичок роботи з устаткуванням для калібрування гіроінерціальних датчиків сучасних систем орієнтації та навігації.

1. Лабораторна робота №1.

Експериментальне дослідження характеристик мікромеханічних акселерометрів

Мета роботи:

1. Ознайомлення з методикою калібрування низькочастотних лінійних акселерометрів.
2. Вивчення основних характеристик та правил виконання вимірювань на оптичній ділительній головці (ОДГ).
3. Виконання калібрування акселерометрів на ОДГ.

1.1. Теоретичні відомості

Низькочастотні лінійні акселерометри є одними з основних чутливих елементів сучасних систем орієнтації і навігації. Акселерометр призначений для вимірювання проекції лінійного прискорення об'єкта \vec{a} , на якому він встановлений, на свою вимірювальну вісь. Дуже важливо пам'ятати, що акселерометр вимірює уявне прискорення

$$\mathbf{a} = \mathbf{W} - \mathbf{g}', \quad (1.1)$$

де \mathbf{W} – вектор абсолютного лінійного прискорення, \mathbf{g}' – гравітаційне прискорення.

Рівняння (1.1) є основним рівнянням інерціальної навігації, про що буде сказано в дисципліні «Навігаційні системи».

Нехай вимірювальною віссю акселерометра є вісь Z . Тоді в ідеалі вихідний сигнал акселерометра U_{az} (наприклад – струм, напруга, код АЦП), повинен бути пропорційним проекції уявного прискорення (1.1) на вісь Z :

$$U_{az} = k_z \cdot a_z, \quad (1.2)$$

де k_z – спільний передатний коефіцієнт (масштабний коефіцієнт), що включає передатний коефіцієнт датчика переміщень інерціальної маси акселерометра,

передатні коефіцієнти підсилювача та інших можливих перетворювачів ланцюга.

В дійсності кожен окремих екземпляр акселерометра має свої індивідуальні особливості у вигляді масштабного коефіцієнта, зміщення нуля, перехресних зв'язків та інших параметрів.

Для забезпечення високої точності систем орієнтації і навігації необхідно мати високоточну інформацію від вимірювачів, що може бути забезпечено тільки за умови урахування вказаних особливостей кожного акселерометра.

Спочатку складається адекватна модель вихідного сигналу акселерометра, що враховує його особливості та похибки, потім визначаються параметри цієї моделі. В подальшому, при штатній роботі системи, вихідний сигнал акселерометра перетворюється з урахуванням прийнятої моделі, щоб максимально точно визначити проєкції уявного прискорення вздовж базових осей системи.

Визначення параметрів вихідних сигналів вимірювачів (параметрів їх математичних моделей) з метою подальшого їх урахування називають **калібруванням**.

1.1.1. Модель вихідного сигналу акселерометра

З одного боку, чим більш повно модель враховує особливості вимірювальних пристроїв, тим з більшою точністю можна визначити величини, що вимірюються. Однак, надлишкове ускладнення моделі призводить до збільшення об'єму обчислень, що не є виправданим якщо модель доповнюється малозначущими складовими, тим більше якщо вони слабо повторюються у різних пусках акселерометра.

В загальному випадку, залежність вихідного сигналу акселерометра від прискорення, що вимірюється, є нелінійним, та допускає лінеаризацію тільки для обмеженого діапазону прискорень, що вимірюються. В подальшому розглянемо тільки лінійну модель акселерометрів. Доповнимо ідеальну модель вихідного сигналу акселерометра (1.2) наступними реальними складовими:

- зміщення нуля акселерометра U_{az0} ;

- коефіцієнти перехресної чутливості k_{zx} , k_{zy} ;
- шум вимірювання n_{az} .

Тоді вихідний сигнал акселерометра (1.2) приймає вигляд:

$$U_{az} = k_z a_z + k_{zx} a_x + k_{zy} a_y + U_{az0} + n_{az} ; \quad (1.3)$$

Важливо відмітити, що модель вимірювань (1.3) – це модель не чутливого елемента акселерометра, а модель всього вимірювального тракту, що включає сам чутливий елемент, а також вимірювальні, підсилюючі та перетворюючі елементи.

1.1.2. Калібрування акселерометрів

Задачею калібрування акселерометра є визначення параметрів моделі його вихідного сигналу (1.3) з метою їх урахування при обчисленні дійсного значення уявного прискорення a_z .

Калібрування низькочастотних лінійних акселерометрів виконується на спеціальних стендах шляхом завдання тестових вхідних впливів (прискорень) і вимірюванням вихідних сигналів акселерометрів. Розроблена велика кількість методик визначення параметрів акселерометрів, враховуючи велику кількість різновидів устаткування, що може бути використане для калібрування. Розглянемо одну з найбільш популярних методик – методику з формуванням пар рівнянь для визначення кожного параметру.

Калібрування акселерометрів в діапазоні $\pm 1g$ здійснюється шляхом завдання відомих положень акселерометра відносно вектора прискорення сили тяжіння g . За необхідності калібрування акселерометра чи інерціального вимірювального модуля (ІВМ) в більш широкому діапазоні прискорень використовуються спеціальні центрифуги.

Для високоточного завдання положення акселерометра відносно вектора сили тяжіння g , частіше за все використовують прецизійні оптичні ділильні головки (ОДГ), що забезпечують точність повороту акселерометра на рівні приблизно 5-10 кутових секунд. Для зменшення впливу від зовнішніх коливань, добових коливань споруд та інших механічних взаємодій, ОДГ встановлюють

на спеціальний фундамент, що є розв'язаним відносно споруди, в якій знаходиться калібрувальна ділянка.

На рис. 1.1 показано оптичну ділильну головку ОДГЭ-5 на валу 2 якої закріплена базова платформа 3 з боковими базами 4. Площина базової платформи паралельна осі вала, а бокові бази встановлені відповідно перпендикулярно і паралельно відносно осі обертання вала ОДГ.

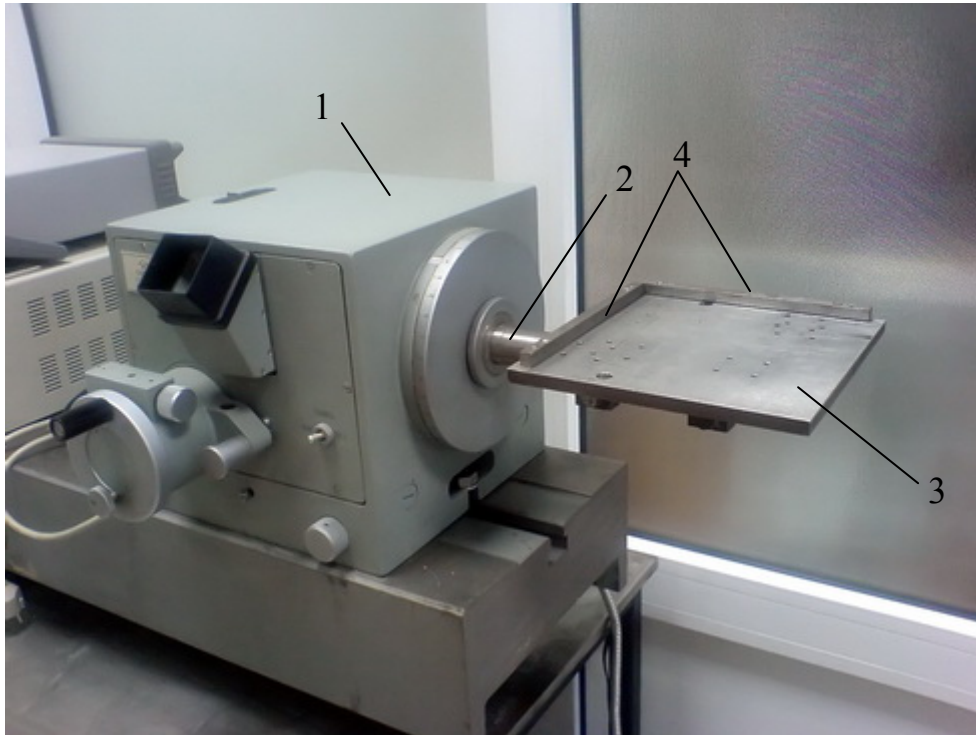


Рис. 1.1. Оптична ділильна головка ОДГЭ-5

1 – ОДГ; 2 – вал; 3 – базова платформа; 4 – бокові бази

Вимірювальний модуль, або інший прилад, в якому встановлено акселерометр, повинен мати щонайменше дві перпендикулярні базові поверхні, які і формують базові осі приладу. Вимірювальний модуль встановлюється однією зі своїх баз на площадку ОДГ і притискається другою базою до однієї з бокових баз площадки. Таким чином забезпечується паралельність однієї з осей вимірювального модуля відносно осі обертання ОДГ.

Для здійснення калібрування вісь обертання ОДГ і базова платформа виставляються в горизонті також з точністю до 5 – 10 кутових секунд з використанням прецизійних рідинних рівнів. Це дозволяє з високою точністю зорієнтувати базові осі вимірювального модуля, а значить, і акселерометра відносно вектора прискорення сили тяжіння \mathbf{g} .

Запишемо більш детально вираз (1.1) для уявного прискорення \mathbf{a} . Підставивши туди вираз для абсолютного лінійного прискорення \mathbf{W} в супроводжуючому географічному триграннику, отримаємо:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{V}}{dt} + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{U}) \times \mathbf{V} + \mathbf{U} \times (\mathbf{U} \times \mathbf{r}) - \mathbf{g}', \quad (1.4)$$

де \mathbf{V} – вектор лінійної швидкості руху об'єкта відносно Землі; \mathbf{U} – вектор кутової швидкості обертання Землі, \mathbf{r} – радіус-вектор, що задає положення центру мас об'єкта відносно центру Землі; $\boldsymbol{\omega}$ – абсолютна кутова швидкість повороту супроводжуючого географічного тригранника.

Врахуємо, що дві останні складові у виразі (1.4) формують вектор прискорення сили тяжіння:

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}' - \mathbf{U} \times (\mathbf{U} \times \mathbf{r}). \quad (1.5)$$

Тоді вираз (1.4) для уявного прискорення буде мати вигляд

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{V}}{dt} + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{U}) \times \mathbf{V} - \mathbf{g}, \quad (1.6)$$

де остання складова вже не гравітаційне прискорення, а прискорення сили тяжіння.

У фіксованих положеннях, що задаються за допомогою ОДГ, акселерометр лишається нерухомим відносно Землі, тому у виразі (1.6) $\mathbf{V} = 0$, $\frac{d\mathbf{V}}{dt} = 0$ і уявне прискорення, що вимірює акселерометр, буде дорівнювати прискоренню сили тяжіння, що береться з протилежним знаком:

$$\mathbf{a} = -\mathbf{g}. \quad (1.7)$$

Розглянемо один з найпоширеніших варіантів задання положення акселерометра при калібруванні на ОДГ, схему якого наведено в табл. 1.1. З таблиці видно, що для повного калібрування акселерометра, його необхідно обертати

навколо двох осей. Справа у тому, що для визначення параметрів моделі (1.3) вихідних сигналів акселерометрів необхідно задавати відомі положення a_x , a_y , a_z по кожній з трьох осей X, Y, Z, а це означає, що кожна з трьох осей повинна змінювати своє положення відносно вектора g . При повороті акселерометра на ОДГ навколо однієї осі, ця вісь не змінює своє положення відносно вектора g . Тому акселерометр переставляють на ОДГ, змінюючи вісь обертання.

В табл. 1.1 також наведено значення проєкцій уявного прискорення (1.7) на осі акселерометра для кожного положення з урахуванням того, що вектор g направлено вертикально вниз.

Підставивши значення проєкцій уявного прискорення a_x , a_y , a_z з табл. 1.1 у вираз (1.3), отримуємо значення вихідного сигналу акселерометра U_{az} для кожного з положень, які також наведені в табл. 1.1.

Для суттєвого зменшення впливу шуму вимірювань n_{az} , вихідний сигнал акселерометра осереднюється на протязі часу вимірювання (зазвичай 30...60 с), тому вирази в табл. 1.1. шум вимірювань n_{az} з виразу (1.3) не враховують.

У відповідності до виразів у останньому стовпці табл. 1.1, визначаємо шукані параметри моделі (1.3) вихідного сигналу акселерометра:

$$k_z = (U_{az1} - U_{az3} + U_{az5} - U_{az7}) / 4g; \quad k_{zx} = (U_{az6} - U_{az8}) / 2g; \quad k_{zy} = (U_{az4} - U_{az2}) / 2g; \\ U_{az0} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_{azi} . \quad (1.8)$$

Зрозуміло, що для обчислення параметрів акселерометрів за формулами (1.8) необхідно знати модуль вектора прискорення сили тяжіння в місці проведення випробувань.

Треба відмітити, що до складу систем орієнтації і навігації зазвичай входить три акселерометра, осі чутливості яких взаємно ортогональні. Калібрування акселерометрів здійснюється після їх монтажу у вимірювальний модуль і повного електричного монтажу штатних електричних ланцюгів. Калібрування всіх трьох акселерометрів здійснюється одночасно за описаною вище методикою.

Таблиця 1.1. Положення осей акселерометра при калібруванні на ОДГ і відповідні значення прискорень та вихідних сигналів акселерометра

№	Положення осей акселерометра	Кут за шкалою ОДГ	Проекції \vec{g}	Проекції уявного прискорення	Вихідний сигнал акселерометра (1.3)
Обертання навколо осі X					
1		0°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = -g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = g$	$U_{az1} = k_{zg} + U_{az0}$
2		90°	$g_x = 0$ $g_y = g$ $g_z = 0$	$a_x = 0$ $a_y = -g$ $a_z = 0$	$U_{az2} = -k_{zy}g + U_{az0}$
3		180°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = -g$	$U_{az3} = -k_{zg} + U_{az0}$
4		270°	$g_x = 0$ $g_y = -g$ $g_z = 0$	$a_x = 0$ $a_y = g$ $a_z = 0$	$U_{az4} = k_{zy}g + U_{az0}$
Обертання навколо осі Y					
5		0°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = -g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = g$	$U_{az5} = k_{zg} + U_{az0}$
6		90°	$g_x = -g$ $g_y = 0$ $g_z = 0$	$a_x = g$ $a_y = 0$ $a_z = 0$	$U_{az6} = k_{zx}g + U_{az0}$
7		180°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = -g$	$U_{az7} = -k_{zg} + U_{az0}$
8		270°	$g_x = g$ $g_y = 0$ $g_z = 0$	$a_x = -g$ $a_y = 0$ $a_z = 0$	$U_{az8} = -k_{zx}g + U_{az0}$

1.2. Послідовність виконання роботи

Для дослідження використовується збірка мікромеханічних акселерометрів, що показана на фотографії рис. 1.2. Позначення:

- 1 – акселерометри, змонтовані на платах;
- 2 – плата з АЦП та мікроконтролером;
- 3 – основа (пластина);
- 4 – роз'єм.

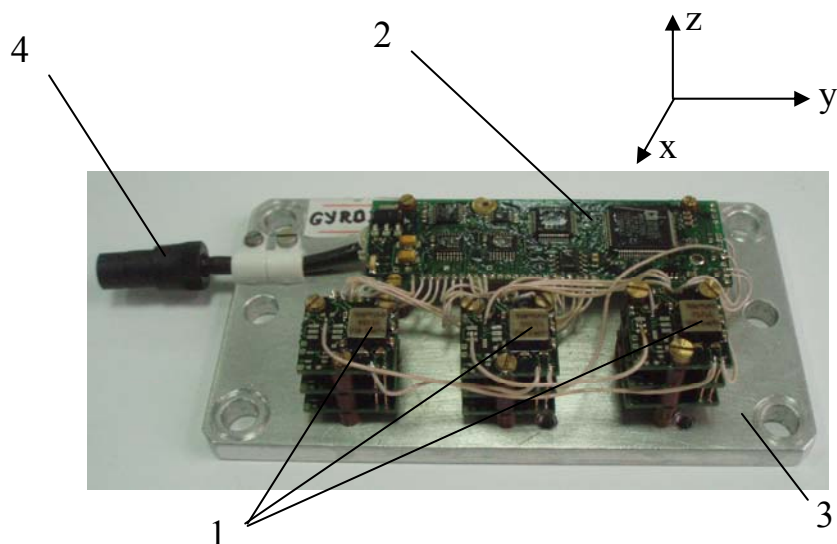


Рис. 1.2. Збірка мікромеханічних акселерометрів

1. Проведення вимірювань

1. Ознайомитись з конструкцією ОДГ та правилами користування нею.
2. Установити збірку акселерометрів (рис. 1.2) на платформу ОДГ, зорієнтувавши віссю X вздовж осі обертання валу (в напрямку від ОДГ).
3. Підключити кабель одним роз'ємом до збірки акселерометрів, а іншим – до COM порту комп'ютера (або до порту USB використовуючи перехідний пристрій COM-USB).
4. Увімкнути живлення збірки акселерометрів. На платі мікроконтролера повинен загорітися червоний індикатор.

5. Запустити програму ClbAcc (див. рис. 1.3).

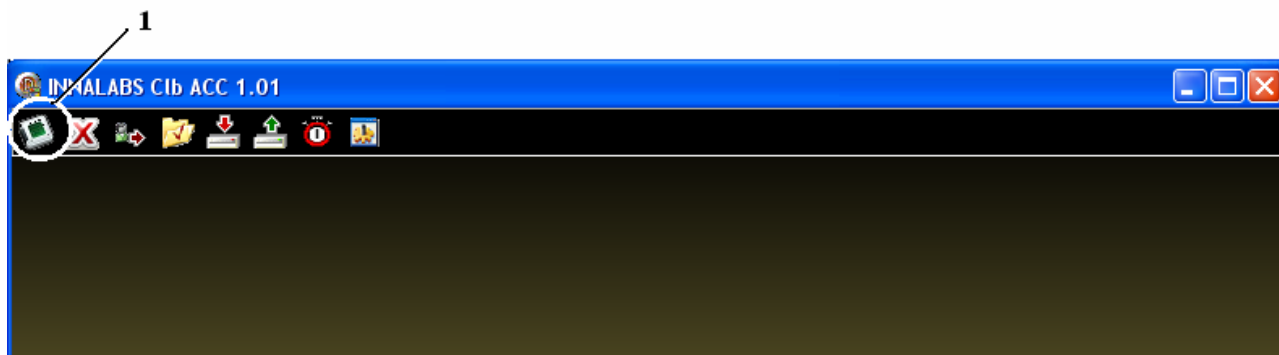


Рис. 1.3. Основне вікно програми ClbAcc

6. Натиснути клавішу 1 “Calibrate on Optical Dividing Head” для переходу до калібрування. В результаті відкриється вікно рис. 1.4.

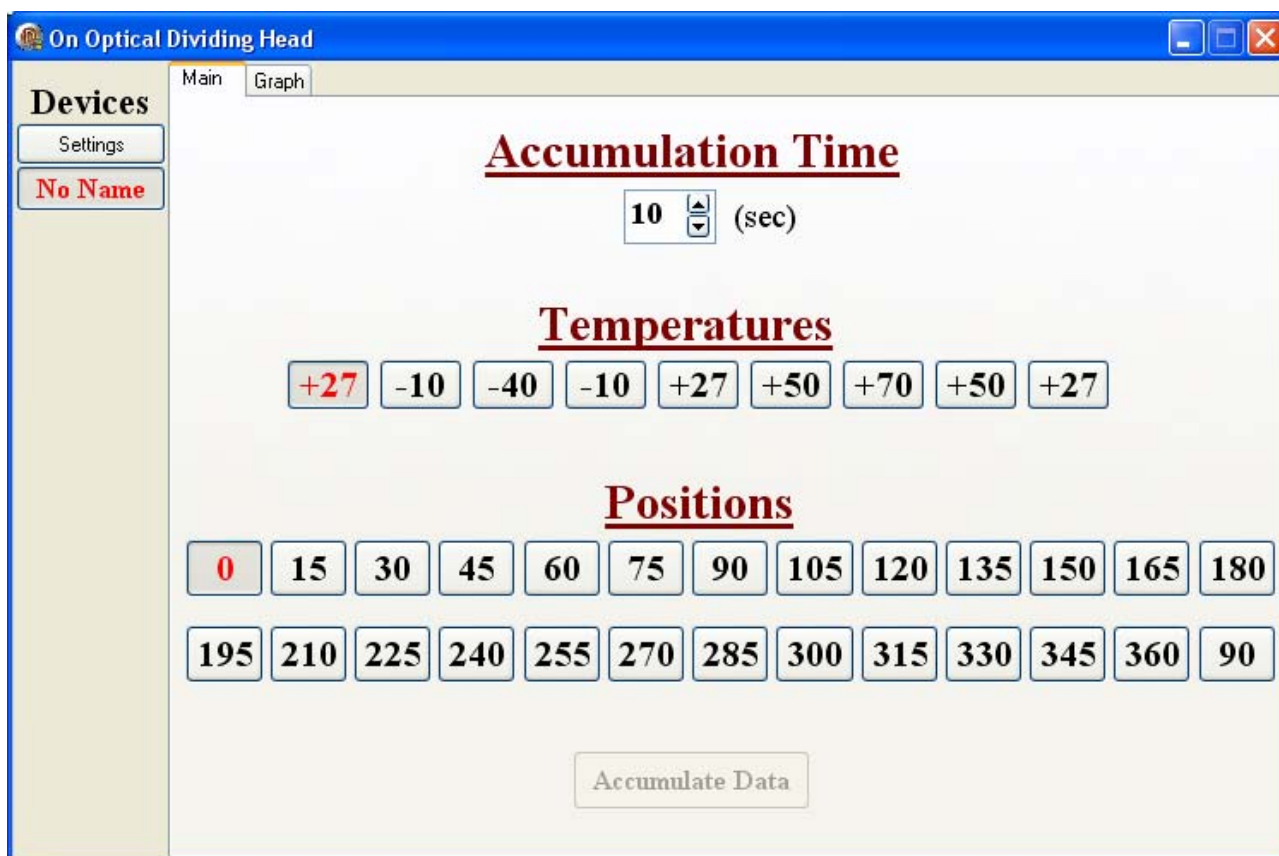


Рис. 1.4. Вікно програми ClbAcc для проведення вимірювань на ОДГ

7. Задати час набору даних 10 сек. в полі “Accumulation Time” (див. рис. 1.4).
8. Натиснути клавішу “Settings” (див. рис. 1.4). В результаті відкриється вікно рис. 1.5, в якому в полі “Port Name” треба обрати зі списку номер COM-порту, до якого підключена збірка акселерометрів.

9. Просканувати вказаний порт, натиснувши на кнопку “Scan”. В полі “Device name” замість напису “No Name” має з’явитися назва збірки акселерометрів.
10. Натиснути кнопку “OK” для завершення налаштувань програми.

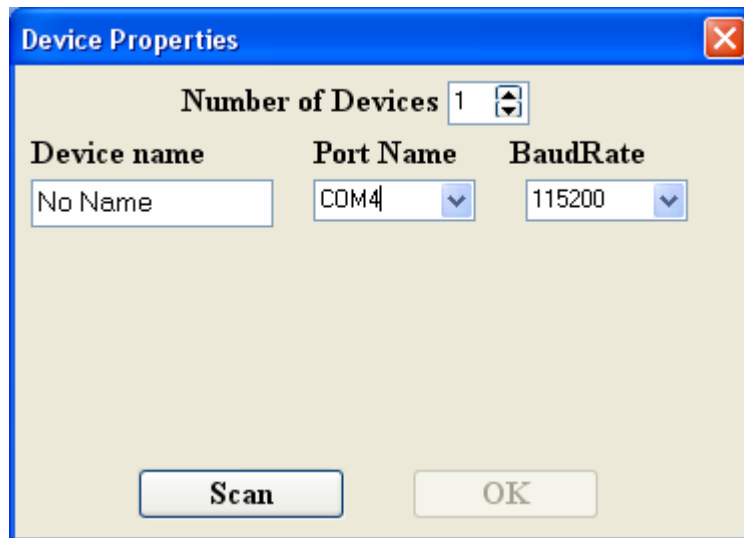


Рис. 1.5. Вікно “Device Properties” програми ClbAcc

11. За допомогою ручки ОДГ встановити збірку акселерометрів в перше положення відповідно табл. 1.1.
12. Зі списку положень “Positions” (рис. 1.4) вибрати перше положення “0” градусів.
13. Виконати вимірювання сигналів акселерометрів, натиснувши кнопку “Accumulate Data” у вікні програми (рис. 1.4).
14. Повторити п. 11 – п. 13 тричі, встановлюючи збірку акселерометрів кожного разу в нове положення відповідно до табл. 1.1, і обираючи зі списку положень “Positions” (рис. 1.4) відповідно положення “90”, “180” і “270” градусів. Для вимірювання сигналів кожного разу треба натискати кнопку “Accumulate Data”.
15. **Переустановити** збірку акселерометрів на платформі ОДГ, зорієнтувавши віссю **Y** вздовж осі обертання валу (в напрямку від ОДГ).
16. Повторити п. 11 – п. 14, встановлюючи збірку акселерометрів в положення у відповідності до другої частини табл. 1.1, і обираючи зі

списку положень “Positions” (рис. 1.4) відповідно кути “0”, “90”, “180” и “270” градусів. Для вимірювання сигналів кожного разу треба натискати кнопку “Accumulate Data”.

Осереднені значення сигналів акселерометра в кожному з положень автоматично записуються в текстовий файл виду

OpticalDividingHead_PPPPMМДДГГХХ.txt,

де PPPP, MM, DD – рік, місяць, день проведення тесту; GG, XX – час в годинах і хвилинах. Структуру цього файла наведено в табл. 1.2.

Одна збірка акселерометрів містить до 9-ти датчиків. Перед початком лабораторної роботи кожен студент отримує від викладача порядковий номер акселерометра в збірці для подальшої обробки його вихідних сигналів.

Таблиця 1.2. Структура текстового файла

OpticalDividingHead_PPPPMМДДГГХХ.txt, утвореного програмою ClbAcc

Назва збірки	Температура, °C	Кут по ОДГ, град	№ положення на ОДГ			Вихідні сигнали акселерометрів U _{azi}	Температури акселерометрів
1	2	3	4	5	6	7 – 15	16 – 24
Colibrys	+27	0	0	0	0	13185.47	14798
Colibrys	+27	90	6	0	0	521.57	14799
Colibrys	+27	180	12	0	0	-12872.84	14790
Colibrys	+27	270	18	0	0	-595.04	14780

Примітки:

1. У стовпці 2 показано задане значення температури.
2. Вихідні сигнали акселерометрів (стовпці 7 – 15) і їх внутрішня температура (стовпці 16 – 24) записуються в кодах АЦП, отриманих після перетворення аналогових сигналів в цифрові.
3. В стовпцях 7 – 24 таблиці наведені наближені значення вихідних сигналів і температури акселерометрів.

2. Обробка вимірювань

1. Занести до табл. 1.3 результати вимірювань вихідного сигналу U_{azi} акселерометра для кожного i -го положення акселерометра відповідно до табл. 1.1. Вихідні дані взяти з файлу, створеного програмою СІbАсс, для вказаного викладачем в індивідуальному завданні номеру акселерометра.
2. Обчислити за формулами (1.8) параметри моделі (1.3) вихідного сигналу акселерометра. При цьому прийняти модуль вектора прискорення сили тяжіння $g = 9.8106 \text{ м/с}^2$. Отримані калібрувальні параметри занести в табл. 1.4. **Обов'язково вказати розмірності кожного параметру.**

1.3. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Модель вихідного сигналу акселерометра, яка ідентифікувалася при калібруванні.
3. Положення акселерометра під час процедури калібрування.
4. Вихідні сигнали акселерометра в калібрувальних точках (табл. 1.3).
5. Розрахунок параметрів за формулами (1.8).
6. Обчислені калібрувальні параметри акселерометра (табл. 1.4).

Таблиця 1.3. Результати вимірювань вихідного сигналу акселерометра

Номер положення акселерометра, i	Кут по ОДГ, градуси	Вихідний сигнал акселерометра U_{azi}
Обертання навколо осі X		
1	0°	
2	90°	
3	180°	
4	270°	
Обертання навколо осі Y		
5	0°	
6	90°	
7	180°	
8	270°	

Таблиця 1.4. Результати калібрування акселерометра

Тип акселерометра	№ акселерометра в збірці	Результати калібрування			
		k_z	k_{zx}	k_{zy}	U_{az0}
Colibrys MS9002.D					

1.4. Контрольні запитання

1. Для чого призначений низькочастотний лінійний акселерометр?
2. Що таке уявне прискорення?
3. Чим відрізняється прискорення сили тяжіння \vec{g} від гравітаційного прискорення?
4. Пояснити модель (1.3) вихідного сигналу акселерометра.
5. Пояснити розмірності кожного коефіцієнта в моделі (1.3) вихідного сигналу акселерометра.
6. В чому полягає задача калібрування акселерометра?
7. Що таке ОДГ і для чого вона призначена?
8. В чому сутність методики калібрування акселерометра, використаної в даній роботі?
9. Коротко описати процедуру калібрування акселерометра, яка виконувалась під час лабораторної роботи.

2. Лабораторна робота № 2.

Експериментальне дослідження характеристик тривісного блока акселерометрів

Мета роботи:

1. Ознайомлення з методикою калібрування тривісного блока лінійних акселерометрів.
2. Виконання калібрування тривісного блока акселерометрів на ОДГ.
3. Ознайомлення з методикою визначення кутів нахилу по сигналах акселерометра.
4. Виконання перевірки точності калібрування блока акселерометрів.

2.1. Теоретичні відомості

2.1.1. Модель вихідних сигналів тривісного блока акселерометрів

До складу вимірювального модуля систем орієнтації і навігації зазвичай входять три акселерометри зі взаємно ортогональними осями чутливості, назовемо їх X, Y, Z.

Вихідний сигнал кожного акселерометра можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned}U_{ax} &= k_x a_x + k_{xy} a_y + k_{xz} a_z + U_{ax0} + n_{ax}; \\U_{ay} &= k_{yx} a_x + k_y a_y + k_{yz} a_z + U_{ay0} + n_{ay}; \\U_{az} &= k_{zx} a_x + k_{zy} a_y + k_z a_z + U_{az0} + n_{az},\end{aligned}\tag{2.1}$$

де

k_x, k_y, k_z – масштабні коефіцієнти (коефіцієнти передачі) кожного з акселерометрів;

$k_{xy}, k_{xz}, k_{yx}, k_{yz}, k_{zx}, k_{zy}$ – коефіцієнти перехресної чутливості;

$U_{ax0}, U_{ay0}, U_{az0}$ – зсув нулів акселерометрів;

n_{ax}, n_{ay}, n_{az} – шуми вимірювань.

Для зручності подальших перетворень, вираз (2.1) можна представити у матричному вигляді:

$$\begin{bmatrix} U_{ax} \\ U_{ay} \\ U_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{ax0} \\ U_{ay0} \\ U_{az0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{ax} \\ n_{ay} \\ n_{az} \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

2.1.2. Калібрування тривісного блока акселерометрів

Задачею калібрування акселерометрів є визначення параметрів моделі їх вихідних сигналів (2.1) або (2.2) з метою їх подальшого урахування при обчисленні дійсних значень проекцій a_x , a_y , a_z уявного прискорення на осі вимірювального модуля.

Як і в лабораторній роботі №1, для задання уявного прискорення вздовж вимірювальних осей використовується встановлення блока акселерометрів у відомі положення відносно вектора \mathbf{g} прискорення сили тяжіння. При цьому використовується той факт, що на нерухомій відносно Землі основі уявне прискорення \mathbf{a} дорівнює вектору \mathbf{g} прискорення сили тяжіння, взятому з протилежним знаком:

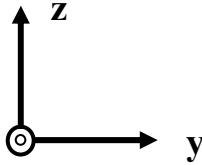
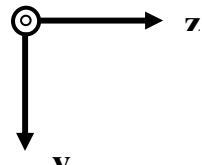
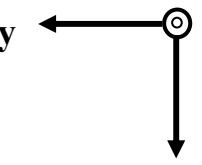
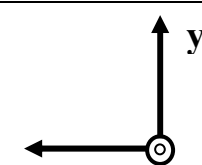
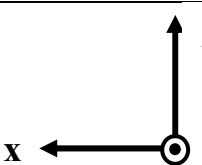
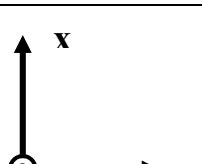
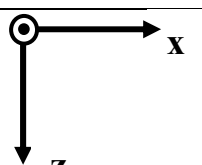
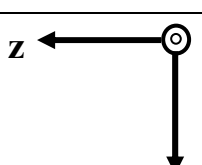
$$\mathbf{a} = -\mathbf{g}. \quad (2.3)$$

Такий підхід дозволяє калібрувати акселерометри у діапазоні вимірювання $\pm 1g$ ($\pm 9.8 \text{ м/с}^2$). За необхідності калібрування акселерометрів у більш широкому діапазоні прискорень використовуються спеціальні центрифуги.

Як і в Лабораторній роботі №1, для високоточного завдання положення блока акселерометрів відносно вектора \mathbf{g} , використовується прецизійна оптична ділильна головка (ОДГ). Положення блока акселерометрів наведено у табл. 2.1 – вони задаються так як і в Лабораторній роботі №1, з урахуванням того, що вектор \mathbf{g} направлений вертикально вниз.

Підставивши значення проекцій уявного прискорення a_x , a_y , a_z з табл. 2.1 у вираз (2.1), отримаємо значення вихідних сигналів акселерометрів U_{ax} , U_{ay} , U_{az} в кожному з положень, які також наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Положення осей блока акселерометрів при калібруванні на ОДГ і відповідні значення прискорень і вихідних сигналів акселерометрів

№	Положення осей блока акселерометрів	Кут за шкалою ОДГ	Проекції g	Проекції уявного прискорення	Вихідні сигнали акселерометрів (2.1)
Поворот навколо осі X					
1		0°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = -g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = g$	$U_{ax1} = k_{xz} g + U_{ax0}$ $U_{ay1} = k_{yz} g + U_{ay0}$ $U_{az1} = k_z g + U_{az0}$
2		90°	$g_x = 0$ $g_y = g$ $g_z = 0$	$a_x = 0$ $a_y = -g$ $a_z = 0$	$U_{ax2} = -k_{xy} g + U_{ax0}$ $U_{ay2} = -k_y g + U_{ay0}$ $U_{az2} = -k_{zy} g + U_{az0}$
3		180°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = -g$	$U_{ax3} = -k_{xz} g + U_{ax0}$ $U_{ay3} = -k_{yz} g + U_{ay0}$ $U_{az3} = -k_z g + U_{az0}$
4		270°	$g_x = 0$ $g_y = -g$ $g_z = 0$	$a_x = 0$ $a_y = g$ $a_z = 0$	$U_{ax4} = k_{xy} g + U_{ax0}$ $U_{ay4} = k_y g + U_{ay0}$ $U_{az4} = k_{zy} g + U_{az0}$
Поворот навколо осі Y					
5		0°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = -g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = g$	$U_{ax5} = k_{xz} g + U_{ax0}$ $U_{ay5} = k_{yz} g + U_{ay0}$ $U_{az5} = k_z g + U_{az0}$
6		90°	$g_x = -g$ $g_y = 0$ $g_z = 0$	$a_x = g$ $a_y = 0$ $a_z = 0$	$U_{ax6} = k_x g + U_{ax0}$ $U_{ay6} = k_{yx} g + U_{ay0}$ $U_{az6} = k_{zx} g + U_{az0}$
7		180°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = -g$	$U_{ax7} = -k_{xz} g + U_{ax0}$ $U_{ay7} = -k_{yz} g + U_{ay0}$ $U_{az7} = -k_z g + U_{az0}$
8		270°	$g_x = g$ $g_y = 0$ $g_z = 0$	$a_x = -g$ $a_y = 0$ $a_z = 0$	$U_{ax8} = -k_x g + U_{ax0}$ $U_{ay8} = -k_{yx} g + U_{ay0}$ $U_{az8} = -k_{zx} g + U_{az0}$

Для суттєвого зменшення впливу шуму вимірювань n_{az} , вихідний сигнал акселерометра осереднюється на протязі часу вимірювання (зазвичай 30...60 с), тому у табл. 2.1 шум вимірювань n_{az} з виразу (2.1) не враховується.

У відповідності до виразів в останньому стовпці табл. 2.1, визначаємо шукані параметри моделі (2.1) вихідних сигналів блока акселерометрів:

$$\begin{aligned} k_x &= (U_{ax6} - U_{ax8}) / 2g; & k_{xy} &= (U_{ax4} - U_{ax2}) / 2g; & k_{xz} &= (U_{ax1} - U_{ax3} + U_{ax5} - U_{ax7}) / 4g; \\ k_{yx} &= (U_{ay6} - U_{ay8}) / 2g; & k_y &= (U_{ay4} - U_{ay2}) / 2g; & k_{yz} &= (U_{ay1} - U_{ay3} + U_{ay5} - U_{ay7}) / 4g; \\ k_{zx} &= (U_{az6} - U_{az8}) / 2g; & k_{zy} &= (U_{az4} - U_{az2}) / 2g; & k_z &= (U_{az1} - U_{az3} + U_{az5} - U_{az7}) / 4g; \\ U_{ax0} &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_{axi}; & U_{ay0} &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_{ayi}; & U_{az0} &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_{azi}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Зрозуміло, що для обчислення параметрів акселерометрів по формулам (2.4) необхідно знати модуль вектора прискорення сили тяжіння в місці проведення випробувань.

2.1.3. Використання результатів калібрування акселерометрів в алгоритмах систем орієнтації і навігації

Після проведення калібрування, описаного в п.2.1.2, стають відомими значення всіх коефіцієнтів моделі вихідних сигналів акселерометрів (2.1) або (2.2). Це дозволяє при роботі системи визначати поточні проекції уявного прискорення a_x , a_y , a_z , використовуючи вихідні сигнали акселерометрів U_{ax} , U_{ay} , U_{az} . Визначимо значення вектора $[a_x \ a_y \ a_z]^T$ з матричного рівняння (2.2) без урахування шумів вимірювань n_{ax} , n_{ay} , n_{az} :

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} U_{ax} \\ U_{ay} \\ U_{az} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{ax0} \\ U_{ay0} \\ U_{az0} \end{bmatrix} \right); \quad (2.5)$$

де матриця

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix}^{-1}. \quad (2.6)$$

обчислюється заздалегідь (відразу після калібрування) і вже в такому вигляді завантажується в пам'ять обчислювача системи.

Слід відмітити, що компенсація шумів вимірювань n_{ax} , n_{ay} , n_{az} , що входять до моделі (2.1) або (2.2) вихідних сигналів акселерометрів, неможлива через випадковість характеру цих шумів. Для зменшення рівня цих шумів використовуються низькочастотні фільтри. Проте використання таких фільтрів обмежується вимогами до смуги пропускання акселерометрів, яка, в свою чергу, визначається динамікою об'єкта, на якому встановлено акселерометри.

2.1.4. Визначення кутів нахилу об'єкта по сигналах акселерометрів

Відкалібровані сигнали тривісного блока акселерометрів можна використовувати для визначення кутів нахилу нерухомого об'єкта, на якому встановлені ці акселерометри. Акселерометри також використовуються в алгоритмах початкового виставлення систем орієнтації і навігації рухомих об'єктів коли необхідно визначити початкові кути тангажу і крену об'єкта.

Ідея такого застосування акселерометрів полягає у наступному.

Пов'яжемо з об'єктом систему координат $Ox_0y_0z_0$, де Oy_0 – поздовжня, Oz_0 – нормальна, Ox_0 – бокова осі. Нехай трьохосний блок акселерометрів встановлено на об'єкті таким чином, що осі акселерометрів співпадають з осями об'єкта. В цьому випадку акселерометри будуть вимірювати проекції уявного прискорення \mathbf{a} на осі об'єкта, тобто a_{x0} , a_{y0} , a_{z0} .

Розглянемо горизонтальну систему координат $Oxyz$, у якій вісь Oz направлена вертикально вгору (по географічній (істинній) вертикалі), а осі Ox , Oy лежать в площині горизонту.

Задамо положення осей об'єкта $Ox_0y_0z_0$ відносно горизонтальної системи координат $Oxyz$ кутами тангажа θ та крена γ (див рис. 2.1). Також на рисунку показано напрям вектора \vec{g} прискорення сили тяжіння, який направлений в протилежно осі Oz .

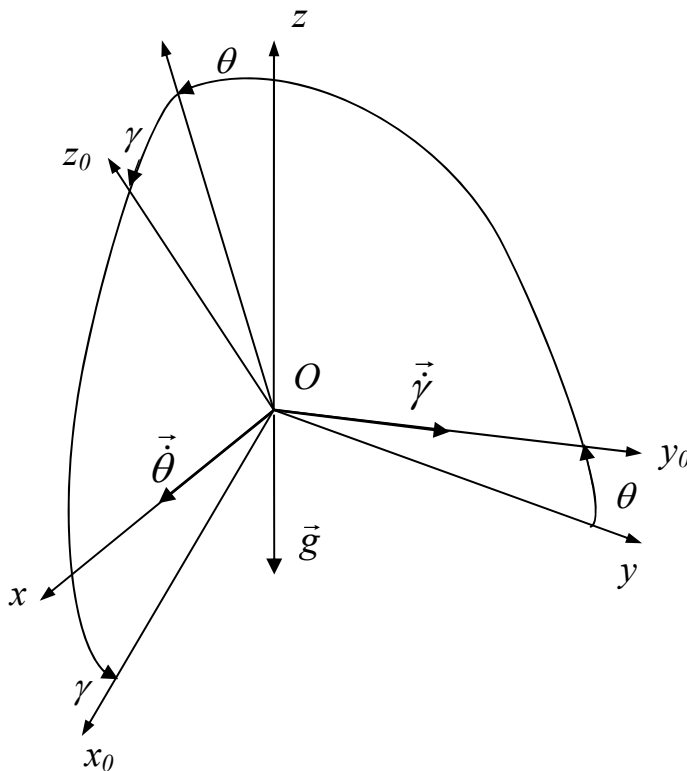


Рис. 2.1. Положення осей об'єкта $Ox_0y_0z_0$ відносно горизонтальної системи координат $Oxyz$

Якщо об'єкт нерухомий, то вектор уявного прискорення $\vec{a} = -\vec{g}$ (2.3), а це означає що акселерометри будуть вимірювати проекції вектора \vec{g} на осі об'єкта, взяті з протилежним знаком:

$$\vec{a}_{x0} = -\vec{g}_{x0}; \quad \vec{a}_{y0} = -\vec{g}_{y0}; \quad \vec{a}_{z0} = -\vec{g}_{z0}. \quad (2.7)$$

Використавши рис. 2.1, запишемо проекції вектора \vec{g} на осі об'єкта $Ox_0y_0z_0$.

$$\vec{g}_{x0} = g \cos \theta \sin \gamma;$$

$$\vec{g}_{y0} = -g \sin \theta;$$

$$\vec{g}_{z0} = -g \cos \gamma \cos \theta.$$

З урахуванням (2.7) отримаємо проекції уявного прискорення, які вимірюють акселерометри:

$$\begin{aligned} a_{x0} &= -g \cos \theta \sin \gamma; \\ a_{y0} &= g \sin \theta; \\ a_{z0} &= g \cos \gamma \cos \theta. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Зі співвідношень (2.8) легко визначити шукані кути тангажа θ і крена γ об'єкта:

$$\begin{aligned} \theta &= \arcsin (a_{y0} / g); \\ \gamma &= -\operatorname{arctg} (a_{x0} / a_{z0}), \end{aligned} \quad (2.9)$$

де $g = \sqrt{a_{x0}^2 + a_{y0}^2 + a_{z0}^2}$.

Враховуючи, що загальноприйняті діапазони зміни кута крену γ лежать в межах від $-\pi$ до $+\pi$, а область значень функції arctg знаходиться в межах від $-\pi/2$ до $+\pi/2$, після обчислення кута крену γ за формулою (2.9) необхідно зробити наступні перетворення:

$$\begin{aligned} \text{якщо } a_{z0} < 0 \text{ і } a_{x0} < 0, \text{ то } \gamma &= -\operatorname{arctg} \frac{a_{x0}}{a_{z0}} + \pi; \\ \text{якщо } a_{z0} < 0 \text{ і } a_{x0} \geq 0, \text{ то } \gamma &= -\operatorname{arctg} \frac{a_{x0}}{a_{z0}} - \pi. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Слід відмітити, що перетворення (2.10) виконується автоматично, якщо у другому виразі (2.9), при обчисленнях в середовищі Matlab, замість функції arctg (atan) використати функцію $\operatorname{atan2}$. Ця функція присутня також в багатьох мовах програмування.

2.2. Послідовність виконання роботи

Для дослідження тривісного блока мікромеханічних акселерометрів використовується безплатфорова курсовертикаль фірми Innalabs, показана на знімку рис. 2.2. Також на рисунку показано напрям осей курсовертикалі, з якими співпадають осі трьох акселерометрів, що встановлено у приладі.

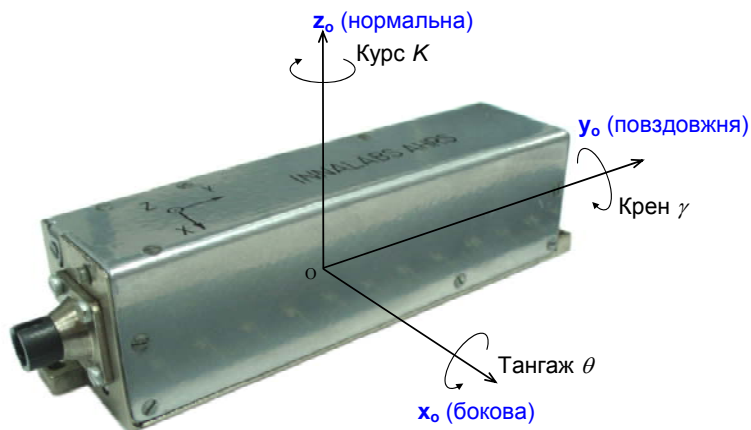


Рис. 2.2. Безплатформа курсовертикаль фірми Innalabs

1. Проведення вимірювань для калібрування акселерометрів

- 1.1. Встановити курсовертикаль (рис. 2.2) на платформу ОДГ, зорієнтувавши віссю X вздовж осі обертання вала (в напрямку від ОДГ).
- 1.2. Підключити кабель одним роз'ємом до курсовертикалі, а іншим – до COM порту комп'ютера (або до порту USB використовуючи перехідний пристрій COM-USB).
- 1.3. Увімкнути живлення курсовертикалі. На корпусі курсовертикалі повинен загорітися червоний індикатор.
- 1.4. Запустити програму Pointer23.exe (див. рис. 2.3).



Рис. 2.3. Основне вікно програми Pointer

- 1.5. Обрати в меню “Calibration” пункт “On Optical Dividing Head” для переходу до калібрування. В результаті відкриється вікно рис. 2.4.

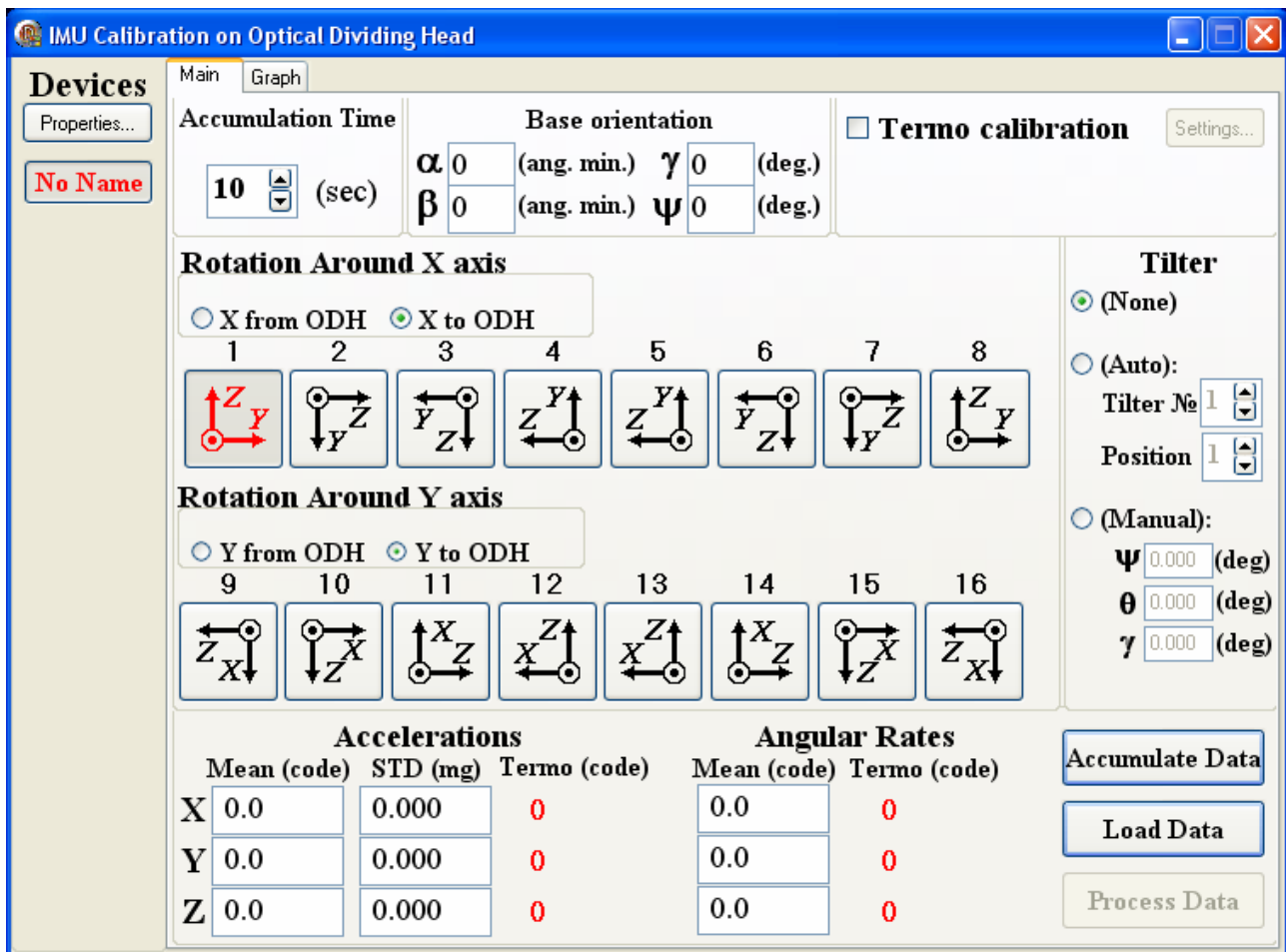


Рис. 2.4. Вікно програми Pointer для здійснення калібрування на ОДГ

- 1.6. Встановити час набору даних 10 сек. в полі “Accumulation Time” (див. рис. 2.4).
- 1.7. Встановити нульові значення кутів $\alpha, \beta, \gamma, \psi$ в групі “Base orientation” як показано на рис. 2.4.
- 1.8. Натиснути кнопку “Properties” (див. рис. 2.4). В результаті виникає вікно рис. 2.5, в якому в полі “Port Name” треба обрати зі списку номер COM-порту, до якого підключена курсовертикаль.

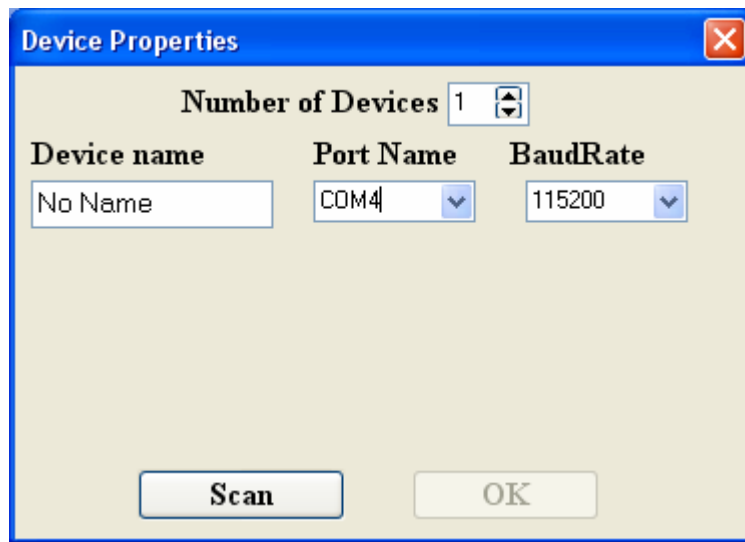


Рис. 2.5. Вікно “Device Properties” програми Pointer

- 1.9. Просканувати вказаний порт, натиснувши на кнопку “Scan”. В полі “Device name” замість надпису “No Name” повинна з’явитися назва курсовертикалі.
- 1.10. Натиснути кнопку “OK” для завершення установок програми.
- 1.11. За допомогою ручки ОДГ встановити курсовертикаль у перше положення відповідно табл. 2.1.
- 1.12. Зі списку положень “**Rotation around X axis**” (рис. 2.4) вибрати положення **1**.
- 1.13. Виконати вимірювання сигналів акселерометрів, натиснувши кнопку “Accumulate Data” у вікні програми (рис. 2.4).
- 1.14. Повторити п. 1.11 – п. 1.13 тричі, встановлюючи курсовертикаль кожного разу в нове положення відповідно до табл. 2.1, обираючи зі списку положень (рис. 2.4) відповідно положення 2, 3, 4. Для вимірювання сигналів кожного разу треба натискати кнопку “Accumulate Data”.
- 1.15. **Переустановити** курсовертикаль на площадці ОДГ, зорієнтувавши віссю **Y** вздовж осі обертання валу (в напрямку від ОДГ).
- 1.16. Повторити п. 1.11 – п. 1.14, встановлюючи курсовертикаль в положення у відповідності до другої частини табл. 2.1, і обираючи зі спи-

ску положень “**Rotation around Y axis**” (рис. 2.4) відповідно положення 13, 14, 15, 16. Для вимірювання сигналів кожного разу треба натискати кнопку “Accumulate Data”.

1.17. Завершити калібрування в програмі Pointer, закривши вікно рис. 2.4.

Осереднені значення сигналів акселерометрів в кожному з положень автоматично записуються в текстовий файл виду

OpticalDividingHead_PPPMМДДГГХХ.txt,

де PPPP, MM, DD – рік, місяць, день проведення тесту; ГГ, ХХ – час в годинах і хвилинах. Структуру цього файла наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Структура текстового файла

OpticalDividingHead_PPPMМДДГГХХ.txt, утвореного програмою Pointer

Серійний № курсовертикалі	№ положення у програмі Pointer			Вихідні сигнали 3-х АКШ, U_{oi}	Вихідні сигнали 3-х акселерометрів			Температури 3-х АКШ	Температури 3-х акселерометрів	Температури 3-х магнітометрів
					Акселерометр X, U_{axi}	Акселерометр Y, U_{ayi}	Акселерометр Z, U_{azi}			
1	2	3	4	5-7	8	9	10	11-13	14-16	17-19
PW09	0	0	0	-517.00	-1092.89	-77.13	12866.30	25365	7963	7872
PW09	1	0	0	-523.06	-252.76	12942.89	-370.99	25365	7963	7868
PW09	2	0	0	-544.62	334.90	-308.34	-13329.13	25366	7966	7869
PW09	3	0	0	-537.22	-504.34	-13326.64	-88.55	25366	7967	7867
PW09	12	0	0	-516.09	-1086.04	-82.90	12867.33	25380	7986	7875
PW09	13	0	0	-529.90	-13478.3	152.03	-214.92	25383	7986	7880
PW09	14	0	0	-543.97	333.63	-311.28	-13324.92	25383	7987	7880
PW09	15	0	0	-529.13	12715.78	-548.21	-243.23	25385	7989	7879

Примітки:

1. У стовпчику 2 показані положення курсовертикалі у відповідності з вікном програми Pointer (рис. 2.4). При цьому нумерація починається з нуля, тобто номера положень в файлі (табл. 2.2) на одиницю менше ніж на рис. 2.4.
 2. Вихідні сигнали ДКШ (стовпці 5 – 7), акселерометрів (стовпці 8 – 10), термодатчиків (стовпці 11 – 19) записані в файл в кодах АЦП, отриманих після перетворення аналогових сигналів в цифрові.
 3. В стовпцях 5 – 19 табл. 2.2 наведено типові значення вихідних сигналів і температур.
 4. В цій роботі для калібрування блока трьох акселерометрів потрібні тільки дані зі стовпців 8 – 10, виділені в табл. 2.2 жовтим кольором.
- 1.18. Записати у табл. 2.3 результати вимірювання вихідних сигналів акселерометрів U_{ax} , U_{ay} , U_{az} для кожного i -го положення блока акселерометрів відповідно до табл. 2.1. Дані взяти з файлу, утвореного програмою Pointer (див. табл. 2.2) .

2. Проведення вимірювань для перевірки точності калібрування

- 2.1. Перевірити точність курсовертикалі у визначенні кута **тангажа**.
- 2.2. Встановити курсовертикаль (рис. 2.2) на платформу ОДГ, зорієнтувавши вісь **X** вздовж осі обертання вала (в напрямку від ОДГ).
- 2.3. Обрати в меню програми Pointer пункт “Accuracy”. В результаті відкриється вікно рис. 2.6.

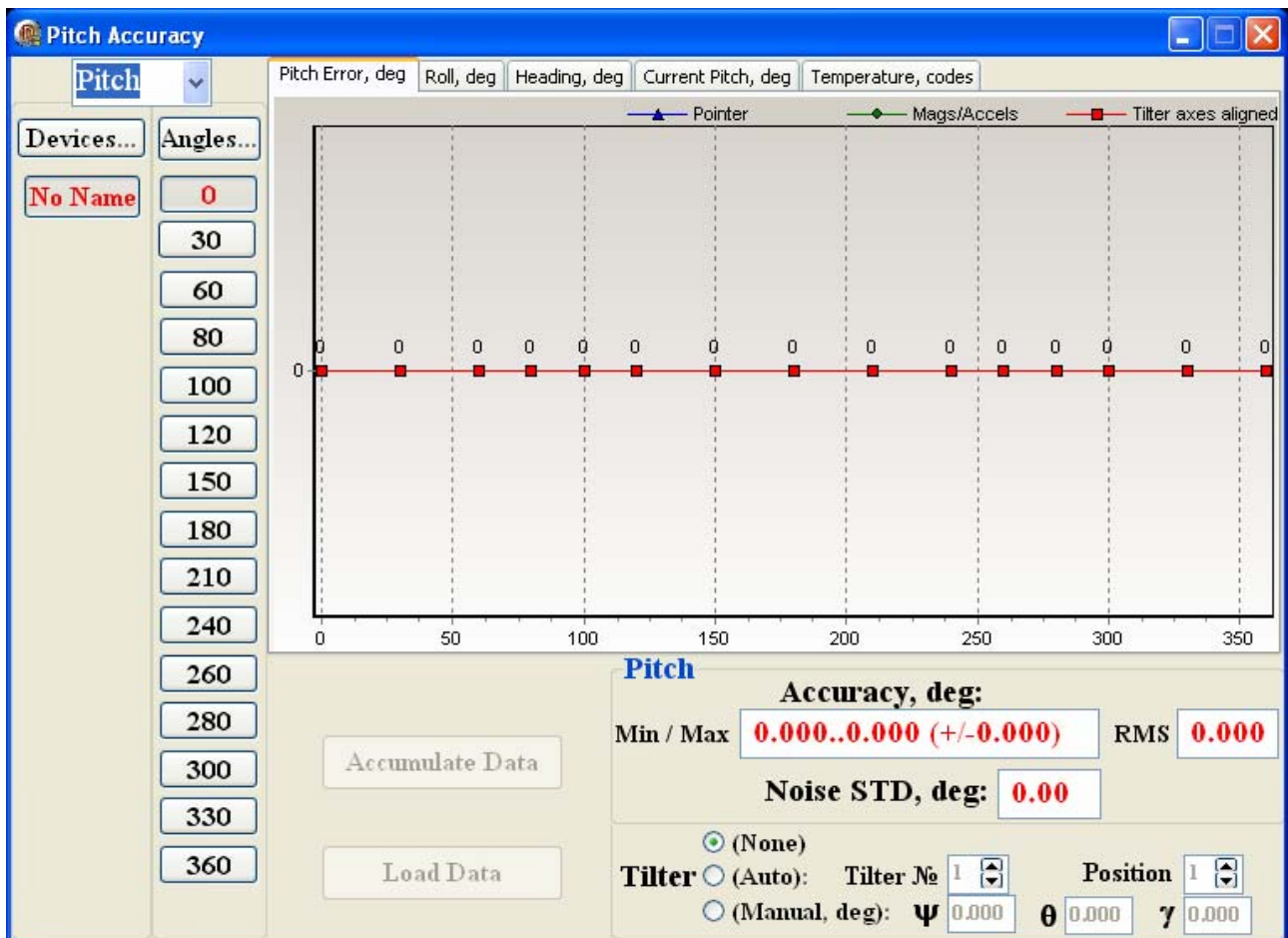


Рис. 2.6. Вікно програми Pointer для перевірки точності курсовертикалі

- 2.4. Обрати зі списку в верхньому лівому куті (рис. 2.6) “Pitch” (тангаж).
- 2.5. Натиснути кнопку “Devices” (рис. 2.6). В результаті відкриється вікно рис. 2.5, в якому в полі “Port Name” треба обрати зі списку обрати номер COM-порту, до якого підключена курсовертикаль.
- 2.6. Просканувати вказаний порт, натиснувши на кнопку “Scan”. В полі “Device name” замість надпису “No Name” повинна з’явитися назва курсовертикалі.
- 2.7. Натиснути кнопку “OK” для завершення установок програми.
- 2.8. За допомогою ручки ОДГ установити курсовертикаль в перше положення (0°), вказане у вікні програми рис. 2.6.
- 2.9. Виконати вимірювання, натиснувши кнопку “Accumulate Data” у вікні програми.

2.10. Повторити п.2.8 – п.2.9, задаючи кут тангажа курсовертикалі, вказаний викладачем у відповідності до рис. 2.6. Для набору даних кожного разу натискати кнопку “Accumulate Data”.

2.11. Закінчити перевірку точності курсовертикалі по тангажу в програмі Pointer, закривши вікно рис. 2.6.

Осереднені вихідні дані курсовертикалі, в тому числі сигнали акселерометрів, в кожному з положень автоматично записуються в текстовий файл виду

Accuracy_PPPMМДДГГХХ.txt,

де PPPP, ММ, ДД – рік, місяць, день проведення тесту; ГГ, ХХ – час в годинах і хвилинах. Структуру цього файла наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Структура текстового файлу

Accuracy_PPPMМДДГГХХ.txt, утвореного програмою Pointer

Серійний № курсовертикалі			Кути орієнтації, обчислені в курсовертикалі, град.			Кути орієнтації, обчислені по акселерометрам і магнітометрам, град.			Вихідні сигнали 3-х ДКШ, $U_{\omega i}$	Вихідні сигнали 3-х акселерометрів		
			Курс	Тангаж	Крен	Курс	Тангаж	Крен		U_{axi}	U_{ayi}	U_{azi}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 - 12	13	14	15
PW09	0	0	248.45	0.03	-0.06	248.45	0.03	-0.05	-529.5	-1090.8	-77.56	12845.4
PW09	1	0	293.7	30.02	-0.07	293.71	30.02	-0.07	-535.00	-1061.0	-6659.7	11165.4
PW09	2	0	320.5	60.00	-0.11	320.54	60.01	-0.118	-545.28	-848.85	-11510.1	6424.02

Примітки:

1. В табл. 2.4 показана структура перших 15 стовпців файла. Всього файл містить 24 стовпця.
2. Вихідні сигнали ДКШ (стовпці 10 – 12) і акселерометрів (стовпці 13 – 15) записані в файл в кодах АЦП, отриманих після перетворення аналогових сигналів в цифрові.
3. В стовпцях 4 – 15 табл. 2.4 наведено типові значення вихідних сигналів.

4. В даній роботі для обчислення кутів орієнтації за сигналами акселерометрів потрібні дані тільки зі стовпців 13 – 15 (виділені в табл. 2.4 жовтим кольором). Кути тангажу і крена, обчислені в курсовертикалі (стовпці 5, 6, виділені блакитним кольором), потрібні для порівняння.
- 2.12. Записати у табл. 2.5 результати вимірювання вихідних сигналів акселерометрів U_{ax} , U_{ay} , U_{az} для кожного положення курсовертикалі. Дані взяти з файлу, утвореного програмою Pointer (див. табл. 2.4). В цю ж таблицю записати значення кута тангажа, обчислені в курсовертикалі (стовбець 5 табл. 2.4).
- 2.13. Перевірити точність курсовертикалі у визначенні кута **крена**.
- 2.14. Встановити курсовертикаль на платформу ОДГ, зорієнтувавши вісь Y вздовж осі обертання вала (в напрямку від ОДГ).
- 2.15. Обрати в меню програми Pointer пункт “Accuracy”. В результаті відкриється вікно рис. 2.6.
- 2.16. Обрати зі списку в верхньому лівому куті (рис. 2.6) “Roll” (крен).
- 2.17. Натиснути кнопку “Devices” (рис. 2.6). В результаті відкриється вікно рис. 2.5, в якому в полі “Port Name” треба обрати зі списку обрати номер СОМ-порту, до якого підключена курсовертикаль.
- 2.18. Просканувати вказаний порт, натиснувши на кнопку “Scan”. В полі “Device name” замість надпису “No Name” повинна з’явитися назва курсовертикалі.
- 2.19. Натиснути кнопку “OK” для завершення установок програми.
- 2.20. За допомогою ручки ОДГ встановити курсовертикаль в перше положення (0°), вказане у вікні програми рис. 2.6.
- 2.21. Виконати вимірювання, натиснувши кнопку “Accumulate Data” у вікні програми.
- 2.22. Повторити п.2.20 – п.2.21, задаючи кут крена курсовертикалі, вказаний викладачем у відповідності з рис. 2.6. Для набору даних кожного разу натискати кнопку “Accumulate Data”.

- 2.23. Закінчити перевірку точності курсовертикалі по тангажу в програмі Pointer, заклавши вікно рис. 2.6.

Осереднені вихідні дані курсовертикалі, в тому числі сигнали акселерометрів, в кожному з положень автоматично записуються в текстовий файл виду

Accuracy_PPPPMМДДГГХХ.txt,

де PPPP, ММ, ДД – рік, місяць, день проведення тесту; ГГ, ХХ – час в годинах і хвиликах. Структуру цього файла наведено вище, в табл. 2.4.

- 2.24. Записати в табл. 2.6 результати вимірювання вихідних сигналів акселерометрів U_{ax} , U_{ay} , U_{az} для кожного положення курсовертикалі. Дані взяти з файлу, утвореного програмою Pointer (див. табл. 2.4). В табл. 2.6 записати значення кута крена, обчислені в курсовертикалі (стовбець 6 табл. 2.4).

3. Обробка вимірювань

- 3.1. Обчислити за формулами (2.4) параметри моделі (2.1) вихідних сигналів блока акселерометрів. При цьому прийняти модуль вектора прискорення сили тяжіння $g = 9.8106 \text{ м/с}^2$. Отримані параметри калібрування записати в табл. 2.7. **Обов'язково вказати розмірності для кожного параметра.**
- 3.2. Обчислити обернену матрицю масштабних коефіцієнтів Q (2.6).
- 3.3. Обчислити калібровані показання трьох акселерометрів a_x , a_y , a_z у відповідності з виразом (2.5) для кожного положення курсовертикалі, вказаного в табл. 2.5 і табл. 2.6. Занести результати в ці таблиці.
- 3.4. Розрахувати за формулами (2.9) значення кутів тангажу і крена для кожного положення курсовертикалі, вказаного в табл. 2.5 і табл. 2.6. Занести результати в ці таблиці.
- 3.5. Розрахувати похибки обчислень кутів тангажу і крена в курсовертикалі і за каліброваними сигналами акселерометрів. Зробити висновки.

2.3. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Модель вихідних сигналів блока акселерометрів, що ідентифікувалась при калібруванні.
3. Положення блока акселерометрів при калібруванні.
4. Вихідні сигнали акселерометрів у калібрувальних точках (табл. 2.3).
5. Розрахунок калібрувальних параметрів за формулами (2.4).
6. Отримані калібрувальні параметри блока акселерометрів (табл. 2.7).
7. Значення оберненої матриці масштабних коефіцієнтів Q (2.6).
8. Результати перевірки точності курсовертикалі по тангажу (заповнити табл. 2.5).
9. Результати перевірки точності курсовертикалі по крену (заповнити табл. 2.6).
10. Розраховані похибки обчисленні кутів тангажу і крена в курсовертикалі і за каліброваними сигналами акселерометрів.
11. Висновки.

Таблиця 2.3. Результати вимірювання вихідних сигналів акселерометрів

Номер положення акселерометра, i	Кут по ОДГ	Вихідний сигнал акселерометра		
		U_{axi}	U_{ayi}	U_{azi}
Поворот навколо осі X				
1	0°			
2	90°			
3	180°			
4	270°			
Поворот навколо осі Y				
5	0°			
6	90°			
7	180°			
8	270°			

Таблиця 2.5. Результати вимірювань при перевірці точності курсовертикалі по тангажу

Заданий кут тангажа, градуси	Кут тангажа по курсовертикалі, градуси	Вихідні сигнали акселерометрів, коди АЦП			Калібровані сигнали акселерометрів, м/с ²			Розрахований кут тангажа, градуси
		U _{axi}	U _{ayi}	U _{azi}	a _x	a _y	a _z	
0								
30								
60								
...								

Таблиця 2.6. Результати вимірювань при перевірці точності курсовертикалі по крену

Заданий кут крена, градуси	Кут крена по курсовертикалі, градуси	Вихідні сигнали акселерометрів, коди АЦП			Калібровані сигнали акселерометрів, м/с ²			Розрахований кут крена, градуси
		U _{axi}	U _{ayi}	U _{azi}	a _x	a _y	a _z	
0								
30								
60								
...								

Таблиця 2.7. Результати калібрування блока акселерометрів

Серійний № курсовертикалі	Акселе-рометр	Параметри калібрування			
		Акс. X	k _x =	k _{xy} =	k _{xz} =
Акс. Y	k _{yx} =	k _y =	k _{yz} =	U _{ay0} =	
Акс. Z	k _{zx} =	k _{zy} =	k _z =	U _{az0} =	

2.4. Контрольні запитання

1. Для чого призначений лінійний акселерометр?
2. Що таке уявне прискорення?
3. Пояснити модель (2.1) вихідного сигналу блока акселерометрів.
4. Пояснити розмірності кожного коефіцієнта в моделі (2.1) вихідних сигналів блока акселерометрів.
5. В чому полягає задача калібрування блока акселерометрів?
6. В чому сутність методики калібрування блока акселерометрів, використаної в роботі?
7. Коротко описати процедуру калібрування блока акселерометрів, яка виконувалась під час лабораторної роботи.
8. Як використовують отримані при калібруванні параметри (коефіцієнти моделі вихідних сигналів акселерометрів (2.1)) для обчислення каліброваних показань акселерометрів?
9. В чому сутність застосованого в роботі способу визначення кутів нахилу об'єкта за сигналами акселерометрів?

3. Лабораторна робота №3.

Експериментальне дослідження характеристик мікромеханічних датчиків кутової швидкості ADXRS610 фірми Analog Devices

Мета роботи:

1. Ознайомлення з методикою калібрування датчиків кутової швидкості.
2. Вивчення основних характеристик і правил виконання вимірювань на поворотних стендах УПГ і МПУ.
3. Виконання калібрування датчиків кутової швидкості на поворотній установці та на оптичній ділильній головці.
4. Оцінка точності калібрування.

3.1. Теоретичні відомості

3.1.1. Модель вихідного сигналу датчика кутової швидкості

Гіроскопічні датчики кутової швидкості (ДКШ) є одними з основних чутливих елементів сучасних систем орієнтації і навігації та систем стабілізації. ДКШ призначений для вимірювання проекції абсолютної кутової швидкості обертання ω на свою вимірювальну вісь. По кількості осей ДКШ поділяють на одноосні, двоосні та трьохосні.

Нехай вимірювальною віссю ДКШ є вісь Z . Тоді в ідеалі вихідний сигнал ДКШ $U_{\omega Z}$ (наприклад – струм, напруга, код АЦП) повинен бути пропорційним проекції абсолютної кутової швидкості обертання ω на вісь Z :

$$U_{\omega Z} = k_z \cdot \omega_z, \quad (3.1)$$

де k_z – спільний коефіцієнт передачі (масштабний коефіцієнт), що включає коефіцієнт передачі власного датчика кута (датчика переміщень) ДКШ, коефіцієнти передачі підсилювача та інших можливих перетворювачів вимірювального ланцюга.

В реальності кожен окремих екземпляр ДКШ має свої індивідуальні особливості у вигляді масштабного коефіцієнта, зміщення нуля, перехресних зв'язків та інших параметрів. Тобто більш реальна модель вихідного сигналу ДКШ має вигляд:

$$U_{\omega z} = k_z \omega_z + k_{zx} \omega_x + k_{zy} \omega_y + U_{\omega z 0} + n_{\omega z}, \quad (3.2)$$

де k_{zx} , k_{zy} – коефіцієнти перехресної чутливості; $U_{\omega z 0}$ – зміщення нуля ДКШ; $n_{\omega z}$ – шум вимірювання.

Датчики кутової швидкості можуть бути побудовані на абсолютно різних принципах, відповідно і модель вихідного сигналу (3.2) може бути уточнена за рахунок специфічних складових. Так, для більшості типів ДКШ характерна істотна чутливість нуля до дії лінійного прискорення руху. Такими є всі електромеханічні гіроскопами, у тому числі і мікромеханічні. Для таких ДКШ модель вихідного сигналу (3.2) розширюють, додаючи складові, що є пропорційними до проекцій a_x , a_y , a_z уявного прискорення на осі чутливості гіроскопів:

$$U_{\omega z} = k_z \omega_z + k_{zx} \omega_x + k_{zy} \omega_y + U_{\omega z 0} + b_{zx} a_x + b_{zy} a_y + b_{zz} a_z + n_{\omega z}, \quad (3.3)$$

де b_{zx} , b_{zy} , b_{zz} – коефіцієнти чутливості нульового сигналу ДКШ до прискорень (так званий «дрейф від g »).

Слід відмітити, що модель (3.3) все ще не є абсолютно повною.

- По перше, залежність вихідного сигналу ДКШ від вимірюваної кутової швидкості є нелінійною, а лінеаризація є припустимою лише для обмеженого діапазону вимірюваних кутових швидкостей.
- По друге, ДКШ є динамічною ланкою, поведінка якої описується диференціальним рівнянням. Рівняння статички (3.3) є справедливим для обмеженого діапазону частот вимірювання кутової швидкості, що характеризується смугою пропускання ДКШ.
- По третє, до моделі (3.3) не включений ряд складових, наприклад, чутливість до вібрацій (дрейф від g^2), чутливість до дії магнітних полів та інше.

3.1.2. Калібрування датчика кутової швидкості

Задачею калібрування ДКШ є визначення параметрів моделі його вихідного сигналу (3.3) $k_z, k_{zx}, k_{zy}, U_{\omega z 0}, b_{zx}, b_{zy}, b_{zz}$ з метою їх подальшого урахування при обчисленні дійсного значення вимірюваної кутової швидкості ω_z .

Оскільки, відповідно до моделі (3.3), вихідний сигнал ДКШ залежить не тільки від проекцій кутової швидкості $\omega_x, \omega_y, \omega_z$, але і від проекцій прискорень a_x, a_y, a_z , для калібрування ДКШ необхідно задавати тестові значення як кутової швидкості ω , так і прискорень a . В результаті калібрування ДКШ розділяється на два етапи, на одному з яких задається кутова швидкість обертання, а на другому – нерухомий ДКШ встановлюється у різних положеннях відносно вектора прискорення сили тяжіння g , як і у випадку калібрування акселерометрів, що проводилась в ході лабораторних робіт 1 і 2. Відповідно, на першому етапі визначаються коефіцієнти k_z, k_{zx}, k_{zy} , а на другому етапі – коефіцієнти $U_{\omega z 0}, b_{zx}, b_{zy}, b_{zz}$.

3.1.2.1. Калібрування датчика кутової швидкості на обертальному стенді

На першому етапі калібрування задаються кутові швидкості обертання ДКШ, без зміни його положення відносно вектора прискорення сили тяжіння g . З цієї причини модель вихідного сигналу ДКШ (3.3), що може бути ідентифікована на даному етапі, приймає вигляд

$$U_{\omega z} = k_z \omega_z + k_{zx} \omega_x + k_{zy} \omega_y + U_{\omega z 0 \Sigma}, \quad (3.4)$$

де $U_{\omega z 0 \Sigma}$ – сумарне зміщення нуля ДКШ, $U_{\omega z 0 \Sigma} = U_{\omega z 0} + b_{zx} a_x + b_{zy} a_y + b_{zz} a_z$.

Для суттєвого зменшення впливу шуму вимірювання вихідний сигнал ДКШ осереднюється протягом часу вимірювання (зазвичай 30...60 с), тому у виразі (3.4) шум вимірювань $n_{\omega z}$ не враховується.

Для точного задання кутової швидкості обертання в лабораторних роботах використовуються поворотні стенди типу МПУ і УПГ з ручним заданням кутової швидкості.

Вимірювальний модуль або інший прилад, в якому встановлено ДКШ, однією зі своїх баз встановлюється на платформі поворотного приладу. Вимоги до точності встановлення ДКШ на платформу дуже важливі, оскільки при калібруванні повинне бути сформовано напрям вимірювальної осі ДКШ, перпендикулярний до платформи поворотного пристрою.

Оскільки поворотні пристрої типу МПУ і УПГ є одновісними, для повного калібрування ДКШ у відповідності до моделі (3.4) необхідно тричі перевстановлювати його на платформі щоб задавати швидкість обертання навколо кожної з трьох осей (ω_x , ω_y , ω_z).

З метою зменшення кількості переустановлень, в даній лабораторній роботі обмежимося калібруванням ДКШ тільки по прямому каналу вимірювань (навколо осі Z). В цьому випадку модель (3.4) вихідного сигналу ДКШ приймає вигляд:

$$U_{\omega_z} = k_z \omega_z + U_{\omega_z 0 \Sigma}, \quad (3.5)$$

Для обчислення параметрів k_z , $U_{\omega_z 0 \Sigma}$, достатньо задати два значення кутової швидкості ω_z . В результаті отримаємо два лінійних рівняння виду (3.5) з двома невідомими k_z , $U_{\omega_z 0 \Sigma}$, які легко визначаються.

Однак на практиці задають декілька значень кутової швидкості обертання в діапазоні вимірювань ДКШ з метою більш точної побудови статичної характеристики (3.5). В даній лабораторній роботі необхідно використати кілька значень кутової швидкості з метою, перш за все, осереднення похибок завдання кутової швидкості на самих поворотних пристроях УПГ і МПУ, які не забезпечують точність і стабільність обертання платформи через власну вікову і фізичну зношеність.

В результаті завдання $N > 2$ значень кутової швидкості обертання ω_{zi} отримаємо N значень вихідного сигналу ДКШ $U_{\omega_{zi}}$, що дозволяє побудувати залежність $U_{\omega_{zi}}(\omega_{zi})$ для $i=1, \dots, N$. Апроксимуємо цю залежність прямою лінією з рівнянням (3.5) методом найменших квадратів. В результаті визначаємо коефіцієнти моделі (3.5) за формулами:

$$k_z = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_{zi} \sum_{i=1}^N U_{\omega zi} - N \cdot \sum_{i=1}^N (\omega_{zi} U_{\omega zi})}{\left(\sum_{i=1}^N \omega_{zi} \right)^2 - N \cdot \sum_{i=1}^N \omega_{zi}^2}; \quad U_{\omega z 0 \Sigma} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N U_{\omega zi} - k_z \cdot \sum_{i=1}^N \omega_{zi} \right). \quad (3.6)$$

3.1.2.2. Калібрування датчика кутової швидкості на оптичній ділительній головці

Другий етап дозволяє визначити коефіцієнти моделі вихідного сигналу ДКШ (3.3) $U_{\omega z 0}$, b_{zx} , b_{zy} , b_{zz} , що не могли бути визначені на першому етапі (при обертанні ДКШ) без задання лінійних прискорень вздовж кожної осі.

На другому етапі калібрування ДКШ не обертається, а встановлюється нерухомо в різні положення відносно вектора прискорення сили тяжіння \mathbf{g} – як і у випадку калібрування акселерометрів, що проводилась в ході лабораторних робіт 1 і 2. Для цього також використовується оптична ділительна головка (ОДГ).

При нерухомому відносно Землі ДКШ його абсолютна кутова швидкість обертання дорівнює швидкості обертання Землі $\omega = U$. Оскільки об'єктом дослідження в даній лабораторній роботі є мікромеханічні ДКШ зі стабільністю нульового сигналу грубішою за 0.01 %/с, можна вважати, що вони практично не відчують швидкість обертання Землі зі швидкістю 15°/год = 0.004°/с. В результаті можна прийняти, що абсолютна кутова швидкість обертання нерухомого ДКШ $\omega = 0$. Підставивши у вираз (3.3) $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$, для нерухомого ДКШ отримаємо:

$$U_{\omega z} = U_{\omega z 0} + b_{zx} a_x + b_{zy} a_y + b_{zz} a_z + n_{\omega z}. \quad (3.7)$$

Для виконання другого етапу калібрування ДКШ встановлюється на базову платформу ОДГ, вісь обертання якої і сама платформа встановлені в горизонті з високою точністю.

Нагадаємо, що при нерухомій основі уявне прискорення \vec{a} дорівнює прискоренню сили тяжіння \mathbf{g} , взятому з протилежним знаком $\mathbf{a} = -\mathbf{g}$, і вектор \mathbf{g} спрямований вертикально вниз.

Як і при калібруванні акселерометрів, задаючи за допомогою ОДГ фіксовані положення ДКШ відносно вектора прискорення сили тяжіння \mathbf{g} , задаємо проєкції уявного прискорення a_x , a_y , a_z на осі X, Y, Z, і отримаємо систему лінійних рівнянь виду (3.7), що дозволяє визначити шукані коефіцієнти $U_{\omega z0}$, b_{zx} , b_{zy} , b_{zz} .

Задамо положення ДКШ при калібруванні на ОДГ у відповідності до табл. 3.1. Підставивши значення проєкцій уявного прискорення a_x , a_y , a_z з табл. 3.1 у вираз (3.7), отримаємо значення вихідного сигналу ДКШ $U_{\omega z}$ для кожного з положень, які також наведені в табл. 3.1.

Для суттєвого зменшення впливу шуму вимірювання $n_{\omega z}$, вихідний сигнал ДКШ осереднюється протягом часу вимірювання (зазвичай 30...60 с), тому у виразах у табл. 3.1 шум вимірювань $n_{\omega z}$ з виразу (3.7) не враховується.

Відповідно до виразів в останньому стовпці табл. 3.1, визначаємо шукані параметри моделі (3.7) вихідного сигналу ДКШ:

$$b_{zx} = (U_{\omega z6} - U_{\omega z8}) / 2g; \quad b_{zy} = (U_{\omega z4} - U_{\omega z2}) / 2g; \quad b_{zz} = (U_{\omega z1} - U_{\omega z3} + U_{\omega z5} - U_{\omega z7}) / 4g;$$

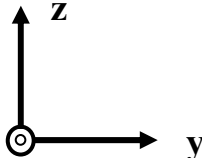
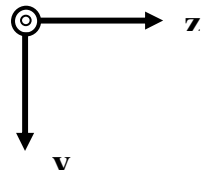
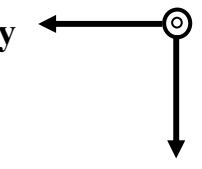
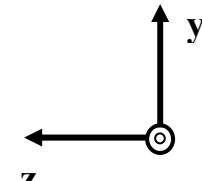
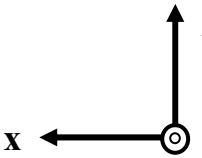
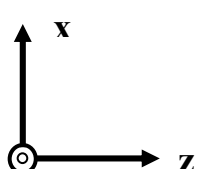
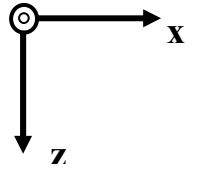
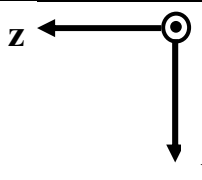
$$U_{\omega z0} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_{\omega zi}. \quad (3.8)$$

Зрозуміло, що для обчислення параметрів ДКШ по формулам (3.8) необхідно знати модуль вектора прискорення сили тяжіння в місці проведення випробувань.

В результаті проведення наведених вище двох етапів калібрування, за формулами (3.6) і (3.8) визначаються всі параметри моделі вихідного сигналу ДКШ (3.3).

Слід відмітити, що до складу вимірювального модуля систем орієнтації і навігації зазвичай входять три ДКШ зі взаємно ортогональними осями чутливості. Калібрування ДКШ виконується після їх встановлення у вимірювальний модуль і повного електричного монтажу штатних електричних ланцюгів. Калібрування всіх трьох ДКШ виконується одночасно за описаною вище методикою.

Таблиця 3.1. Положення осей ДКШ при калібруванні на ОДГ і відповідні значення вихідного сигналу ДКШ

№	Положення осей ДКШ	Кут за шкалою ОДГ	Проекції g	Проекції уявного прискорення	Вихідний сигнал ДКШ (3.7)
Поворот навколо осі X					
1		0°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = -g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = g$	$U_{\omega z1} = b_{zz} g + U_{\omega z0}$
2		90°	$g_x = 0$ $g_y = g$ $g_z = 0$	$a_x = 0$ $a_y = -g$ $a_z = 0$	$U_{\omega z2} = -b_{zy} g + U_{\omega z0}$
3		180°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = -g$	$U_{\omega z3} = -b_{zz} g + U_{\omega z0}$
4		270°	$g_x = 0$ $g_y = -g$ $g_z = 0$	$a_x = 0$ $a_y = g$ $a_z = 0$	$U_{\omega z4} = b_{zy} g + U_{\omega z0}$
Поворот навколо осі Y					
5		0°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = -g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = g$	$U_{\omega z5} = b_{zz} g + U_{\omega z0}$
6		90°	$g_x = -g$ $g_y = 0$ $g_z = 0$	$a_x = g$ $a_y = 0$ $a_z = 0$	$U_{\omega z6} = b_{zx} g + U_{\omega z0}$
7		180°	$g_x = 0$ $g_y = 0$ $g_z = g$	$a_x = 0$ $a_y = 0$ $a_z = -g$	$U_{\omega z7} = -b_{zz} g + U_{\omega z0}$
8		270°	$g_x = g$ $g_y = 0$ $g_z = 0$	$a_x = -g$ $a_y = 0$ $a_z = 0$	$U_{\omega z8} = -b_{zx} g + U_{\omega z0}$

3.2. Послідовність виконання роботи

Для дослідження використовується збірка мікромеханічних ДКШ, зображена на знімку рис. 3.1. Тут позначено:

- 1 – ДКШ, змонтовані на платах;
- 2 – плата з АЦП та мікроконтролером;
- 3 – основа (пластина);
- 4 – роз'єм.

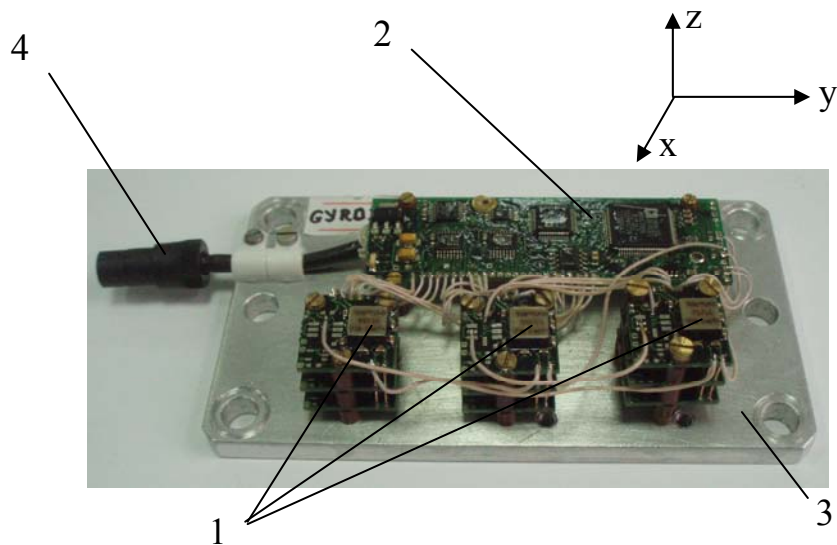


Рис. 3.1. Збірка мікромеханічних ДКШ ADXR610 виробництва Analog Devices

1. Проведення вимірювань першого етапу калібрування (на обертальному стенді).

- 1.1. Ознайомитись з конструкцією поворотних установок УПГ та МПУ і правилами користування ними.
- 1.2. Встановити збірку ДКШ (рис. 3.1) на платформі МПУ (УПГ).
- 1.3. Підключити кабель одним роз'ємом до збірки ДКШ, а іншим – до COM порту комп'ютера (або до порту USB використовуючи перехідний пристрій COM-USB).
- 1.4. Увімкнути живлення збірки ДКШ. На платі мікроконтролера повинен загорітися червоний індикатор.
- 1.5. Запустити програму ClbDUS (див. рис. 3.2).

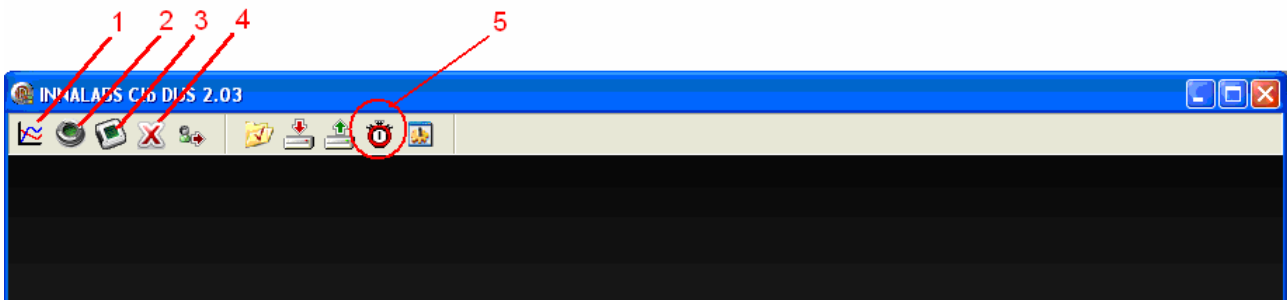


Рис. 3.2. Основне вікно програми ClbDUS та кнопки керування

1 – “View ADC Data”

2 – “Calibrate on Rotate Table” (калібрування на поворотному стенді)

3 – “Calibrate on Optical Dividing Head” (калібрування на ОДГ)

4 – “Stop Device”

5 – “Tests Options”

- 1.6. Натиснути клавішу 2 “Calibrate on Rotate Table” для переходу до калібрування на поворотному стенді. В результаті відкриється вікно рис. 3.3.

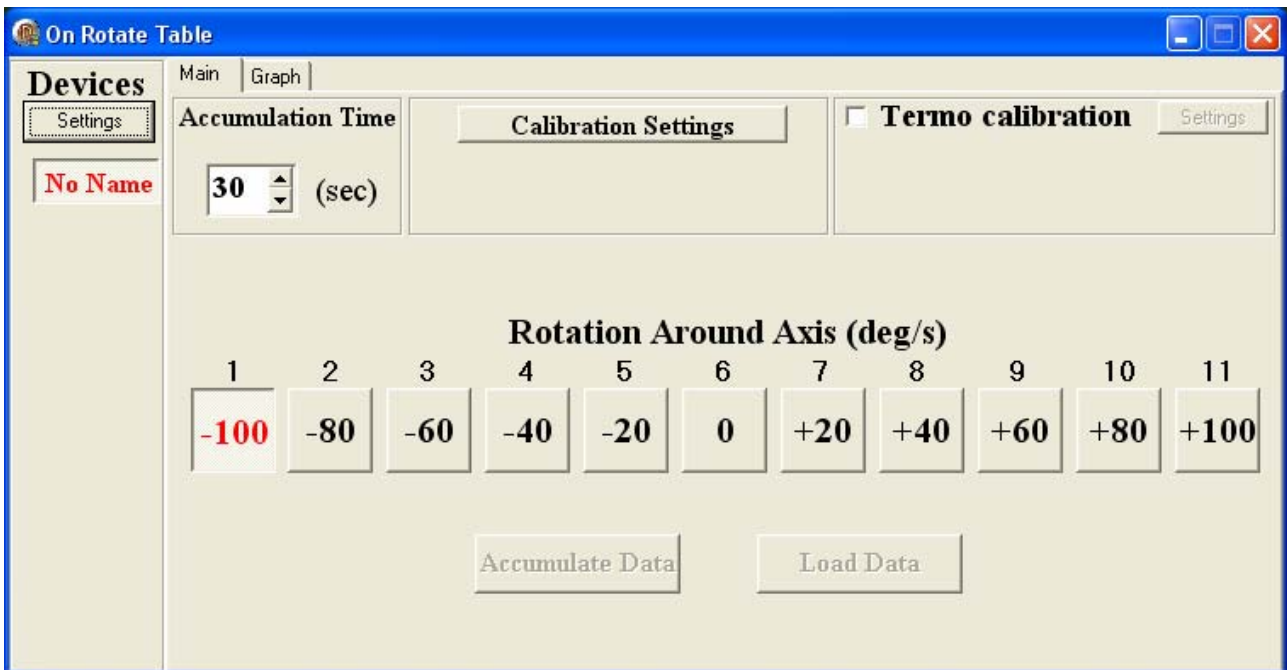


Рис. 3.3. Вікно програми ClbDUS для проведення калібрування на поворотному стенді

- 1.7. Натиснути кнопку “Settings” у вікні рис. 3.3. В результаті відкриється вікно рис. 3.4, в якому в полі “Port Name” треба обрати зі списку номер COM-порта, до якого підключена збірка ДКШ.
- 1.8. Просканувати вказаний порт, натиснувши на кнопку “Scan”. В полі “Device name” замість напису “No Name” повинна з’явитися назва збірки ДКШ.
- 1.9. Натиснути кнопку “OK” для завершення налаштувань програми.

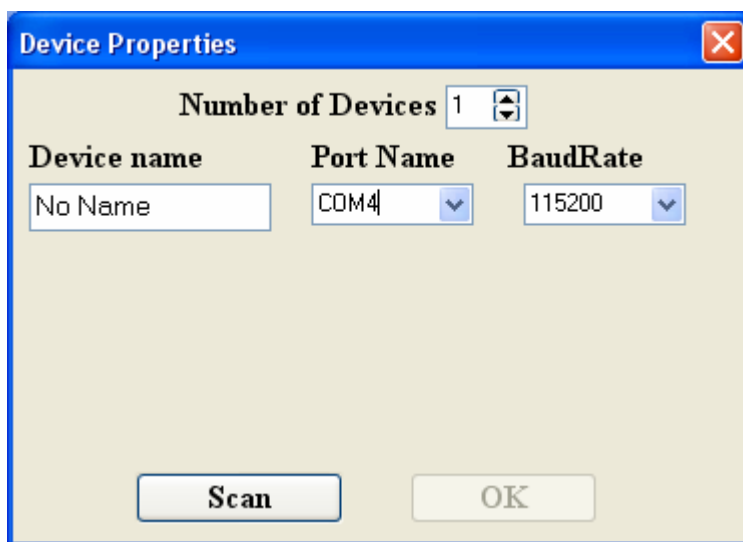


Рис. 3.4. Вікно “Device Properties” програми ClbDUS

- 1.10. За допомогою маховика МПУ задати перше значення кутової швидкості, вказане у вікні програми рис. 3.3. Через 3 секунди після початку обертання платформи натиснути кнопку “Accumulate Data” у вікні програми (рис. 3.3).
- 1.11. Провести вимірювання вихідних сигналів ДКШ при обертанні платформи МПУ з наступними кутовими швидкостями відповідно до рис. 3.3. Кожного разу через 3 секунди після початку обертання платформи натиснути кнопку “Accumulate Data” для вимірювання сигналів.

Осереднені значення сигналів ДКШ в кожному з положень автоматично записуються в текстовий файл виду

RotationTable_PPPMМДДГГХХ.txt,

де PPPP, MM, ДД – рік, місяць, день проведення тесту; ГГ, ХХ – час в годинах і хвилинах. Структуру цього файлу наведено в табл. 3.2.

Одна збірка ДКШ містить до 9-ти датчиків. Перед початком лабораторної роботи кожен студент отримує від викладача порядковий номер ДКШ в збірці для подальшої обробки його вихідних сигналів.

Таблиця 3.2. Структура текстового файлу

RotationTable_PPPMМДДГГХХ.txt, створеного програмою ClbDUS

Назва збірки ДКШ	Номер кутової швидкості			Задане значення кутової швидкості ω_{zi} , град/с	Вихідні сигнали ДКШ U_{azi}	Температури ДКШ
1	2	3	4	5	6 – 14	15 – 23
ADXRS610	0	0	0	-100	7497.78	24803
ADXRS610	1	0	0	-80	5911.11	24798
ADXRS610	2	0	0	-60	4325.37	24795
ADXRS610	3	0	0	-40	2737.80	24795
ADXRS610	4	0	0	-20	1150.74	24797
ADXRS610	5	0	0	0	-436.22	24791
ADXRS610	6	0	0	20	-2024.31	24788
ADXRS610	7	0	0	40	-3613.70	24795
ADXRS610	8	0	0	60	-5201.59	24797
ADXRS610	9	0	0	80	-6788.70	24798
ADXRS610	10	0	0	100	-8377.20	24799

Примітки:

1. Вихідні сигнали ДКШ (стовпці 6 – 14) та їх внутрішня температура (стовпці 15 – 23) записуються в кодах АЦП, отриманих після перетворення аналогових сигналів в цифрові.
2. В стовпцях 6 – 23 таблиці наведено типові значення вихідних сигналів ДКШ.

2. Проведення вимірювань другого етапу калібрування (на оптичній ділильній головці).

З метою зменшення кількості операцій в даній роботі обмежимося завданням положень ДКШ відносно вектора прискорення сили тяжіння, обертаючи ДКШ тільки навколо однієї осі X, без переустановлення збірки ДКШ для обертання навколо осі Y.

- 2.1. Встановити збірку ДКШ (рис. 3.1) на платформу ОДГ, зорієнтувавши віссю X вздовж осі обертання валу (в напрямку від ОДГ).
- 2.2. Підключити кабель одним роз'ємом до збірки ДКШ, а іншим – до COM порту комп'ютера (або до порту USB використовуючи перехідний пристрій COM-USB).
- 2.3. Увімкнути живлення збірки ДКШ. На платі мікроконтролера повинен загорітися червоний індикатор.
- 2.4. Запустити програму ClbDUS (див. рис. 3.2).
- 2.5. Натиснути кнопку 2 “Calibrate on Optical Dividing Head” для переходу до калібрування на ОДГ. В результаті відкриється вікно рис. 3.5.

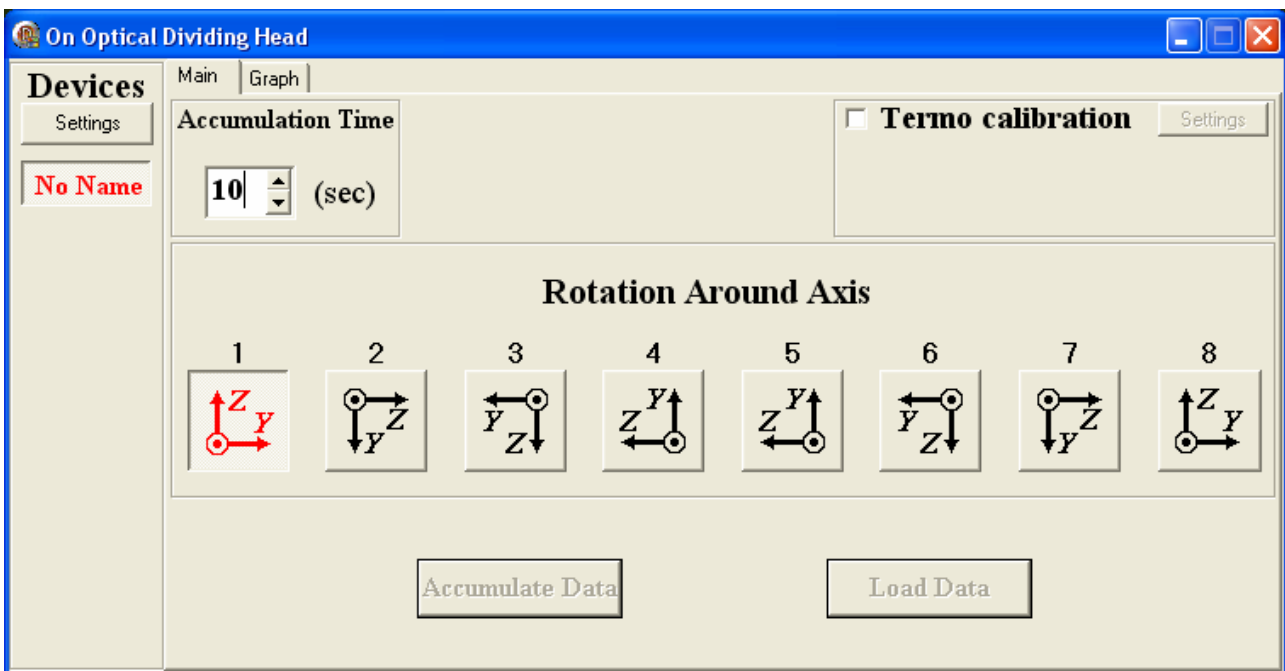


Рис. 3.5. Вікно програми ClbDUS для проведення калібрування на ОДГ

- 2.6. Задати час набору даних 10 сек. в полі “Accumulation Time” (див. рис. 3.5).

- 2.7. Натиснути кнопку “Settings” (див. рис. 3.5). В результаті відкриється вікно рис. 3.4, в якому в полі “Port Name” треба обрати зі списку номер СОМ-порту, до якого підключена збірка ДКШ.
- 2.8. Просканувати вказаний порт, натиснувши на кнопку “Scan”. В полі “Device name” замість напису “No Name” повинна з’явитися назва збірки ДКШ.
- 2.9. Натиснути кнопку “ОК” для завершення налаштувань програми.
- 2.10. За допомогою ручки ОДГ встановити збірку ДКШ в перше положення відповідно табл. 3.1.
- 2.11. Зі списку положень «Rotation Around Axis» (рис. 3.5) вибрати перше положення.
- 2.12. Виконати вимірювання сигналів ДКШ, натиснувши кнопку “Accumulate Data” у вікні програми (рис. 3.5).
- 2.13. Повторити п.2.10 – п.2.12 тричі, встановлюючи збірку ДКШ кожного разу в нове положення відповідно до табл. 3.1, обираючи зі списку положень “Rotation Around Axis” (рис. 3.5) відповідне положення. Для вимірювання сигналів кожного разу треба натискати кнопку “Accumulate Data”.

Осереднені значення сигналів ДКШ в кожному з положень автоматично записуються в файл виду **OpticalDividingHead_PPPPMМДДГГХХ.txt**, де PPPP, ММ, ДД – рік, місяць, день проведення тесту; ГГ, ХХ – час в годинах і хвилинах. Структуру цього файла наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Структура текстового файлу

OpticalDividingHead_ГГГГММДДЧЧММ.txt, утвореного програмою ClbDUS

Назва збірки	№ положення на ОДГ			Вихідні сигнали ДКШ U_{azi}	Температури ДКШ
1	2	3	4	5 – 13	14 – 22
Gyro31	0	0	0	-719.40	24803
Gyro31	1	0	0	-728.22	24798
Gyro31	2	0	0	-719.22	24795
Gyro31	3	0	0	-705.32	24795

Примітки:

1. Вихідні сигнали ДКШ (стовпці 5 – 13) та їх внутрішня температура (стовпці 14 – 22) записуються в кодах АЦП, отриманих після перетворення аналогових сигналів в цифрові.
2. В стовпцях 5 – 22 таблиці наведено типові значення вихідних сигналів і температури ДКШ.

3. Обробка вимірювань першого етапу калібрування.

- 3.1. Занести до табл. 3.4 результати вимірювань вихідного сигналу $U_{\omega zi}$ ДКШ для кожного i -го значення кутової швидкості обертання ДКШ на поворотному стенді. Вихідні дані взяти з файлу RotationTable_PPPPMMDДГГХХ.txt, створеного програмою ClbDUS, для вказаного викладачем в індивідуальному завданні номеру ДКШ.
- 3.2. Обчислити за формулами (3.6) параметри k_z , $U_{\omega z0\Sigma}$ моделі (3.5) вихідного сигналу ДКШ. Отриманий масштабний коефіцієнт k_z занести в табл. 3.6. **Обов'язково вказати розмірність цього коефіцієнта.**

4. Обробка вимірювань другого етапу калібрування.

- 4.1. Занести в табл. 3.5 результати вимірювання вихідного сигналу $U_{\omega zi}$ для кожного i -го положення ДКШ відповідно з першою частиною табл. 3.1 (обертання навколо осі X). Вихідні дані взяти з файлу OpticalDividingHead_PPPPMMDДГГХХ.txt, створеного програмою ClbDUS, для вказаного викладачем в індивідуальному завданні номеру ДКШ.
- 4.2. Обчислити за наведеними нижче формулами

$$\mathbf{b}_{zy} = (U_{\omega z4} - U_{\omega z2}) / 2\mathbf{g}; \quad \mathbf{b}_{zz} = (U_{\omega z1} - U_{\omega z3}) / 2\mathbf{g}; \quad U_{\omega z0} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 U_{\omega zi}. \quad (3.9)$$

параметри моделі (3.7) вихідного сигналу ДКШ. При цьому взяти модуль вектора прискорення сили тяжіння $g = 9.8106 \text{ м/с}^2$. Отримані параметри ка-

лібрування занести до табл. 3.6. **Обов'язково вказати розмірності для кожного параметра.**

Примітка: формули (3.9) отримано з (3.8) для обертання збірки ДКШ тільки навколо осі X. При цьому коефіцієнт b_{zx} не визначається.

В результаті виконання двох етапів калібрування ДКШ визначаються параметри вихідної моделі (3.3) вихідного сигналу ДКШ, вказані в табл. 3.6.

5. Оцінка точності калібрування ДКШ на обертальному стенді.

5.1. Враховуючи значення обчислених параметрів калібрування (табл. 3.6), розрахувати у відповідності до виразу (3.3) калібровані значення вихідного сигналу ДКШ $\omega_{\text{ДКШ}i}$, отримані при обертанні з кутовими швидкостями ω_{zi} , вказаними в табл. 3.4. Результати занести в табл. 3.7.

При цьому врахувати, що обертання ДКШ задавалось тільки навколо однієї осі Z ($\omega_x = \omega_y = 0$), і платформа поворотного стенду встановлена в горизонті з достатньою точністю ($a_x = a_y = 0$; $a_z = g$). В результаті з (3.3) визначаємо:

$$\omega_{\text{ДКШ}} = \omega_z = (U_{\omega z} - U_{\omega z 0} - b_{zz}g) / k_z, \quad (3.10)$$

5.2. Обчислити похибку вимірювання кутової швидкості ДКШ при калібруванні, $\Delta\omega_i = \omega_{\text{ДКШ}i} - \omega_{zi}$ і занести в табл. 3.7.

5.3. Використовуючи дані з табл. 3.7. побудувати графік похибки вимірювання кутової швидкості ДКШ $\Delta\omega_i$ в залежності від заданої кутової швидкості ω_{zi} .

3.3. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Модель вихідного сигналу ДКШ, що ідентифікувалась при калібруванні.
3. Вихідні сигнали ДКШ при заданих значеннях кутової швидкості обертання на поворотному стенді (табл. 3.4).
4. Вихідні сигнали ДКШ в положеннях при калібруванні на ОДГ (табл. 3.5).
5. Розрахунок параметрів за формулами (3.6), (3.9).
6. Обчислені параметри калібрування ДКШ (табл. 3.6).
7. Розраховані калібровані значення вихідного сигналу ДКШ $\omega_{ДКШi}$ і похибки вимірювання кутової швидкості ДКШ при калібруванні $\Delta\omega_i$ (табл. 3.7).
8. Графік похибки вимірювання кутової швидкості ДКШ $\Delta\omega_i$ в залежності від заданої кутової швидкості ω_{zi} .

Таблиця 3.4. Результати вимірювань вихідного сигналу ДКШ на обертальному стенді

Задане значення кутової швидкості ω_{zi} , град/с	Вихідний сигнал ДКШ $U_{\omega zi}$
-100	
-80	
-60	
-40	
-20	
0	
20	
40	
60	
80	
100	

Таблиця 3.5. Результати вимірювань вихідного сигналу ДКШ на ОДГ

Номер положення ДКШ, i	Кут за шкалою ОДГ	Вихідний сигнал ДКШ $U_{\omega zi}$
Поворот навколо осі X		
1	0°	
2	90°	
3	180°	
4	270°	

Таблиця 3.6. Результати калібрування ДКШ

Тип ДКШ	№ ДКШ в збірці	Результати калібрування			
		k_z	$U_{\omega z 0}$	b_{zy}	b_{zz}

Таблиця 3.7. Перевірка точності калібрування ДКШ

Задане значення кутової швидкості ω_{zi} , град/с	Виміряне каліброване значення кутової швидкості $\omega_{ДКШi}$, град/с	Похибка вимірювання кутової швидкості ДКШ при калібруванні $\Delta\omega_i$, град/с
-100		
-80		
-60		
-40		
-20		
0		
20		
40		
60		
80		
100		

3.4. Контрольні запитання

1. Для чого призначений датчик кутової швидкості (ДКШ)?
2. Пояснити модель (3.3) вихідного сигналу ДКШ.
3. Пояснити розмірності кожного коефіцієнта у моделі вихідного сигналу ДКШ.
4. В чому полягає задача калібрування ДКШ?
5. Що таке МПУ, УПГ і ОДГ, для чого вони призначені?
6. В чому полягає суть методики калібрування ДКШ, застосованої в даній роботі? Чому вона розділена на два етапи?
7. Коротко описати процедури калібрування ДКШ, що були виконані під час лабораторної роботи.
8. Чому при калібруванні ДКШ в даній лабораторній роботі визначені не всі параметри вихідної моделі (3.3) вихідного сигналу ДКШ, а тільки ті, які вказані в табл. 3.6?

4. Лабораторна робота №4.

Експериментальне дослідження характеристик мікромеханічних датчиків кутової швидкості LCG50-00500-100 фірми Systron Donner

Для дослідження використовується збірка мікромеханічних ДКШ, зображена на знімку рис. 4.1. Тут позначено:

- 1 – ДКШ, змонтовані на платах;
- 2 – плата з АЦП та мікроконтролером;
- 3 – кронштейн для закріплення ДКШ на поворотному стенді;
- 4 – роз'єм.

На відміну від ДКШ виробництва фірми Analog Devices, досліджуваних у лабораторній роботі №3, у яких вісь чутливості перпендикулярна площині ДКШ, у ДКШ виробництва фірми Systron Donner вісь чутливості знаходиться у площині ДКШ. Тому для монтажу зазначених ДКШ Systron Donner на поворотному стенді потрібен спеціальний кронштейн, показаний на рис. 4.1.

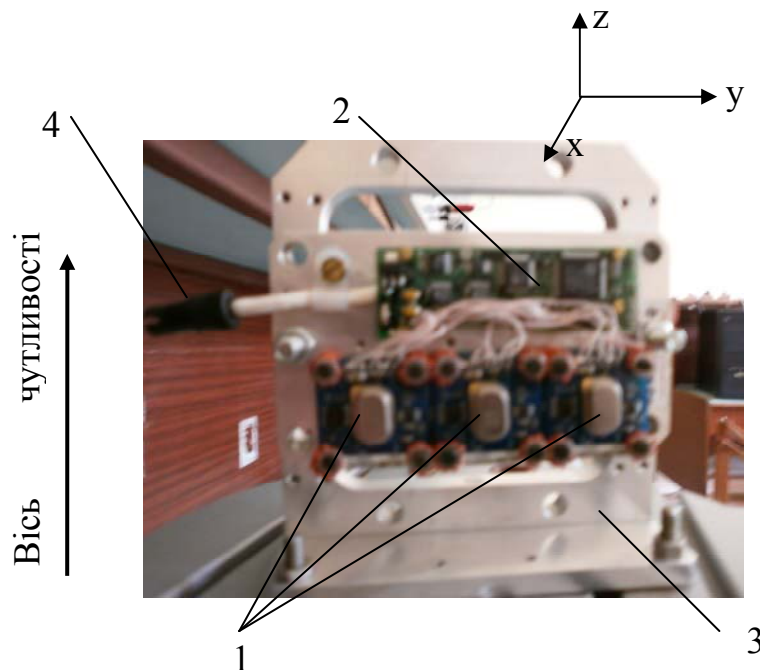


Рис. 4.1. Збірка мікромеханічних ДКШ LCG50-00500-100 виробництва Systron Donner

Примітка:

Мета роботи, теоретичні відомості, послідовність виконання роботи, проведення та обробка вимірювань першого та другого етапу калібрування (на МПУ та на ОДГ), зміст звіту та контрольні запитання див. у лабораторній роботі №3.

5. Лабораторна робота №5.

Експериментальне дослідження характеристик твердотільного хвильового гіроскопа

Мета роботи:

1. Ознайомлення з конструкцією твердотільного хвильового гіроскопу (ТХГ) і особливостями вимірювання ним кутової швидкості.
2. Виконання калібрування ТХГ на поворотній установці та на оптичній дилійній головці.
3. Оцінка точності калібрування ТХГ.

5.1. Теоретичні відомості

Твердотільний хвильовий гіроскоп (ТХГ) відноситься до осциляторних вібраційних гіроскопів з розподіленими параметрами. Чутливим елементом ТХГ є пружна оболонка (резонатор) у вигляді напівсфери або циліндра, у якій збуджуються стійкі коливання – стоячі хвилі. Принцип роботи ТХГ оснований на виникненні моментів коріолісових сил інерції у резонаторі при обертанні гіроскопа, тому ТХГ іноді називають коріолісовим вібраційним гіроскопом (КВГ).

У залежності від способу збудження коливань резонатора, ТХГ може працювати у режимі датчика кутової швидкості (ДКШ) або вільного (інтегруючого) гіроскопа. У даній лабораторній роботі ТХГ використовується у якості ДКШ. Тому теоретичні відомості, наведені у розділі 3.1 лабораторної роботи №3, також справедливі і для ТХГ, зокрема – модель вихідного сигналу (3.3) та формули (3.6), (3.8) для обчислення параметрів цієї моделі при калібруванні.

Точно так, як і калібрування мікромеханічних ДКШ, досліджених у лабораторних роботах №3 і №4, калібрування ТХГ виконується у два етапи, на одному з яких задається кутова швидкість обертання, а на другому – нерухомий ТХГ встановлюється у різних положеннях відносно вектора прискорення сили тяжіння g .

5.2. *Послідовність виконання роботи*

Для дослідження використовується ТХГ CVG25 фірми Innalabs, зображений на знімку рис. 5.1.

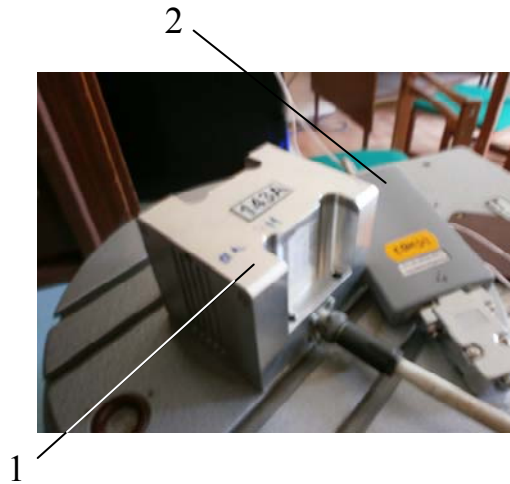


Рис. 5.1. Твердотільний хвильовий гіроскоп

На рис. 5.1 позначено:

- 1 – твердотільний хвильовий гіроскоп ;
- 2 – перетворюючий пристрій типу COM-USB;

1. Проведення вимірювань першого етапу калібрування (на МПУ або УПГ).

- 1.1. Встановити ТХГ (рис. 5.1) на платформі МПУ (УПГ).
- 1.2. Підключити ТХГ до блоку живлення постійного струму роз'ємом живлення та підключити перетворюючий пристрій типу COM – USB до USB порту комп'ютера.
- 1.3. Увімкнути живлення ТХГ тумблером блока живлення постійного струму.
- 1.4. Запустити програму CVGCom (див. рис. 5.2) за допомогою команди «Виконати» меню «Пуск» з ключем -d.

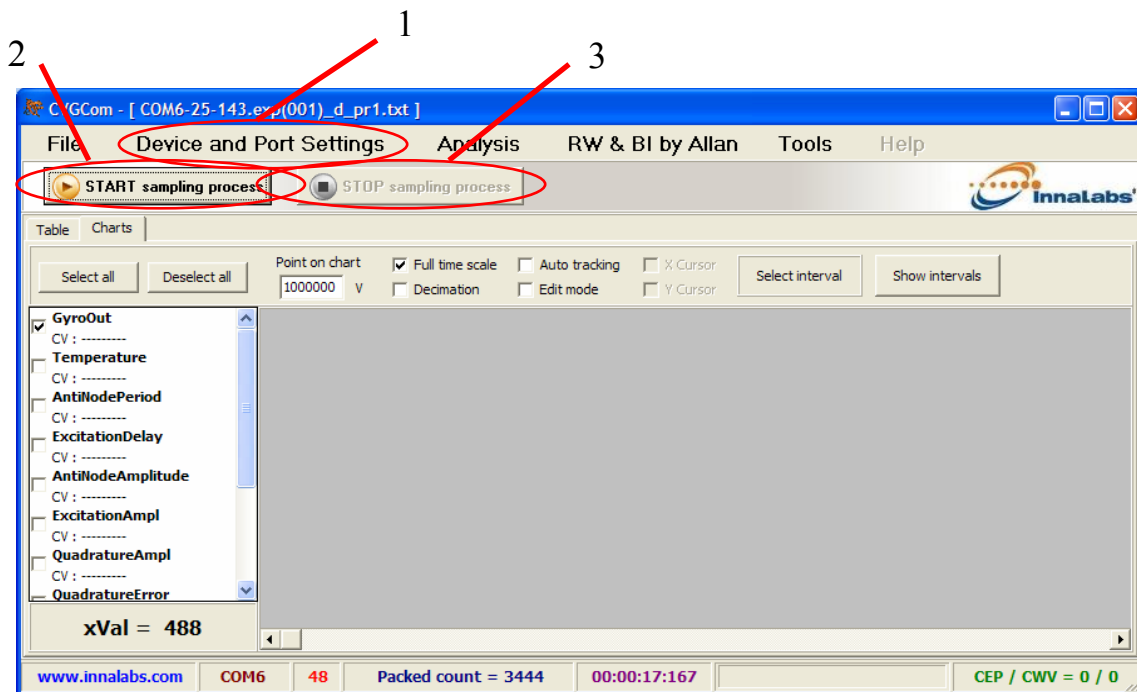


Рис. 5.2. Основне вікно програми CVGCom та кнопки керування

1 – “Device and port settings” (налаштування приладу і порта)

2 – “Start Sampling Process” (почати вимірювання)

3 – “Stop Sampling Process” (завершити вимірювання)

- 1.5. Натиснути кнопку 1 “Device and port settings” для переходу до налаштувань приладу. В результаті відкриється вікно рис. 5.3.
- 1.6. В пункті «Device type» обрати CVGx48. В полях «Serial Port» і «Device #» повинні автоматично ідентифікуватись номер порту, до якого підключений ТВГ та серійний номер приладу. Натиснути кнопку “Generate File Name”, а потім - кнопку “OK” у вікні рис. 5.3.
- 1.7. За допомогою маховика МПУ задати перше значення кутової швидкості. Через 3 секунди після початку обертання платформи натиснути кнопку “Start Sampling Process” у вікні програми (рис. 5.2).

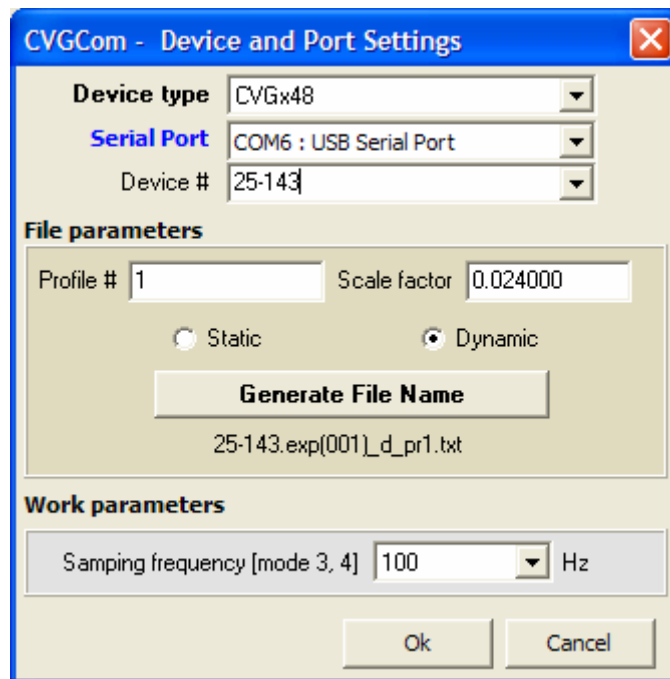


Рис. 5.3. Вікно програми CVGCom для налаштування приладу та створення файлу з даними вимірювання

1.8. Провести вимірювання вихідних сигналів ТХГ при обертанні платформи МПУ з наступними кутовими швидкостями: -40, -20, 0, 20, 40 град/с. Для кожного значення кутової швидкості створити окремий файл вимірювань, натискаючи кнопку “Generate File Name”, а потім – кнопку “ОК” перед кожним наступним вимірюванням. Кожного разу через 3 секунди після початку обертання платформи натискати кнопку “Start Sampling Process” для вимірювання сигналів. Для завершення кожного вимірювання натискати кнопку “Stop Sampling Process” у вікні рис. 5.2. В результаті відкриється діалогове вікно рис. 5.4, в якому треба натиснути кнопку “ОК” для завершення вимірювань. **Важливо: спочатку треба завершити вимірювання і тільки після цього зупинити поворотний стенд.**

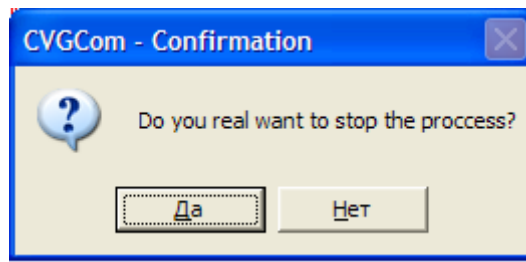


Рис. 5.4. Вікно “CVGCom confirmation” для завершення вимірювань сигналу ТХГ

Значення сигналів ТХГ при кожному значенні кутової швидкості обертання МПУ автоматично записуються в текстовий файл виду

25-143.exp(00N)_s_pr1.txt,

де N – порядковий номер експерименту. Доцільно після кожного вимірювання сигналу ТХГ для кожного значення кутової швидкості присвоювати файлу зі значеннями сигналів ТХГ назву, що містить кутову швидкість обертання МПУ та напрям обертання (+/-). Файли з вимірюваннями знаходяться в папці «25-143», яка поміщена в папку «Gyro_Data». Для осереднення даних та отримання осереднених значень сигналу використовується програма «CVG_Gyro_Mean.exe», яка при розміщенні в папці з тестовими файлами даних вимірювань автоматично створює файл з осередненим значенням сигналів для кожного з файлів та ідентифікує його з ім'ям файлу. Цей файл називається «means.dat».

2. Проведення вимірювань другого етапу калібрування (на ОДГ).

З метою зменшення кількості операцій в даній роботі обмежимося завданням положень ТХГ відносно вектора прискорення сили тяжіння, обертаючи ТХГ тільки навколо однієї осі X, без переустановлення ТХГ для обертання навколо осі Y.

2.1. Установити ТХГ (рис. 5.1) на платформу ОДГ, зорієнтувавши віссю X вздовж осі обертання валу (в напрямку від ОДГ).

2.2. Підключити ТХГ до блоку живлення постійного струму роз'ємом живлення та підключити перетворюючий пристрій типу COM – USB до USB порту комп'ютера.

- 2.3. Увімкнути живлення ТХГ тумблером блока живлення постійного струму.
- 2.4. Запустити програму CVGCom через команду «Виконати» меню «Пуск» з ключем -d (див. рис. 5.2).
- 2.5. Натиснути кнопку 1 «Device and port settings» для переходу до налаштувань приладу. В результаті відкриється вікно рис. 5.3.
- 2.6. В пункті «Device type» обрати CVGx48. В полях «Serial Port» і «Device #» повинні автоматично ідентифікуватись номер порту, до якого підключений ТХГ та серійний номер приладу. Натиснути кнопку «Generate File Name», а потім - кнопку «ОК» у вікні рис. 5.3.
- 2.7. За допомогою ручки ОДГ встановити ТХГ в перше положення відповідно табл. 3.1 (див. Лабораторна робота №3).
- 2.8. Виконати вимірювання сигналів ТХГ, натиснувши кнопку «Start sampling process» у вікні програми (рис. 5.2).
- 2.9. Повторити п.2.5 – п.2.8 тричі, встановлюючи ТХГ кожного разу в нове положення відповідно до табл. 3.1 (див. Лабораторна робота №3), обираючи зі списку положень відповідне положення. Для вимірювання сигналів кожного разу треба натискати кнопку «Start Sampling process», а для завершення - «Stop Sampling process».
- 2.10. Провести вимірювання вихідних сигналів ТХГ при різних значеннях кута повороту ТХГ відносно вектора прискорення сили тяжіння. Для кожного значення кута повороту створити окремий файл вимірювань, натискаючи кнопку «Generate File Name», а потім - кнопку «ОК» перед кожним наступним вимірюванням. Кожного разу натискати кнопку «Start Sampling Process» для вимірювання сигналів. В результаті повинен початися збір даних, який в програмі CVGCom може бути відображений як таблиця з числовими значеннями вихідних сигналів в вольтах або в графічному вигляді рис. 5.5, рис. 5.6. Перемикання між цими зображеннями здійснюється за допомогою закладок «Table» і «Charts» рис. 5.5, рис. 5.6. Для завершення кожного вимірювання на-

тискати кнопку “Stop Sampling Process” у вікні рис. 5.2. В результаті відкриється діалогове вікно рис. 5.4, в якому треба натиснути кнопку “OK” для завершення вимірювань. **Важливо: спочатку треба завершити вимірювання і тільки після цього міняти положення ТХГ відносно вектору прискорення сили тяжіння за допомогою ручки ОДГ.**

Значення сигналів ТХГ в кожному з положень автоматично записуються в текстовий файл виду

25-143.exp(00N)_s_pr1.txt,

де N – порядковий номер експерименту. Доцільно після кожного вимірювання сигналу ТХГ для кожного значення кута повороту ТХГ присвоювати файлу зі значеннями сигналів ТХГ назву, що містить кут повороту ОДГ відносно вектора прискорення сили тяжіння. Файли з вимірюваннями знаходяться в папці «25-143», яка поміщена в папку «.Gyro_Data». Для осереднення даних та отримання осереднених значень сигналу використовується програма «CVG_Gyro_Mean.exe», яка при розміщенні в папці з тестовими файлами даних вимірювань автоматично створює файл з осередненим значенням сигналів для кожного з файлів та ідентифікує його з ім'ям файлу. Текстовий файл називається «means.dat».

	GyroOut	Temperature	AntiNodePeriod	ExcitationDelay	AntiNodeAmplitude	ExcitationAmpl	QuadratureAmpl
663	-0.020585243	26.141712189	23.733621597	14.333653450	1.899964690	1.086271524	0.071447477
652	-0.024097458	26.139638901	23.733621597	14.333653450	1.899956942	1.086420178	0.071215354
641	-0.026642222	26.139638901	23.733621597	14.333653450	1.899930120	1.086960077	0.070892185
630	-0.024538258	26.124380112	23.733621597	14.333653450	1.899935246	1.086851716	0.071461737
619	-0.022465300	26.124380112	23.733621597	14.333653450	1.899954557	1.086460590	0.071064353
608	-0.023491915	26.124380112	23.733621597	14.333653450	1.899954557	1.086469650	0.070880637
598	-0.024506301	26.145767212	23.733621597	14.333653450	1.899935246	1.086846709	0.070930853
587	-0.024610613	26.145767212	23.733621597	14.333653450	1.899934053	1.086887121	0.070939854
576	-0.024361897	26.135190964	23.733621597	14.333653450	1.899955869	1.086434841	0.070998117

Рис. 5.5 Відображення вихідного сигналу ТХГ у числовому вигляді

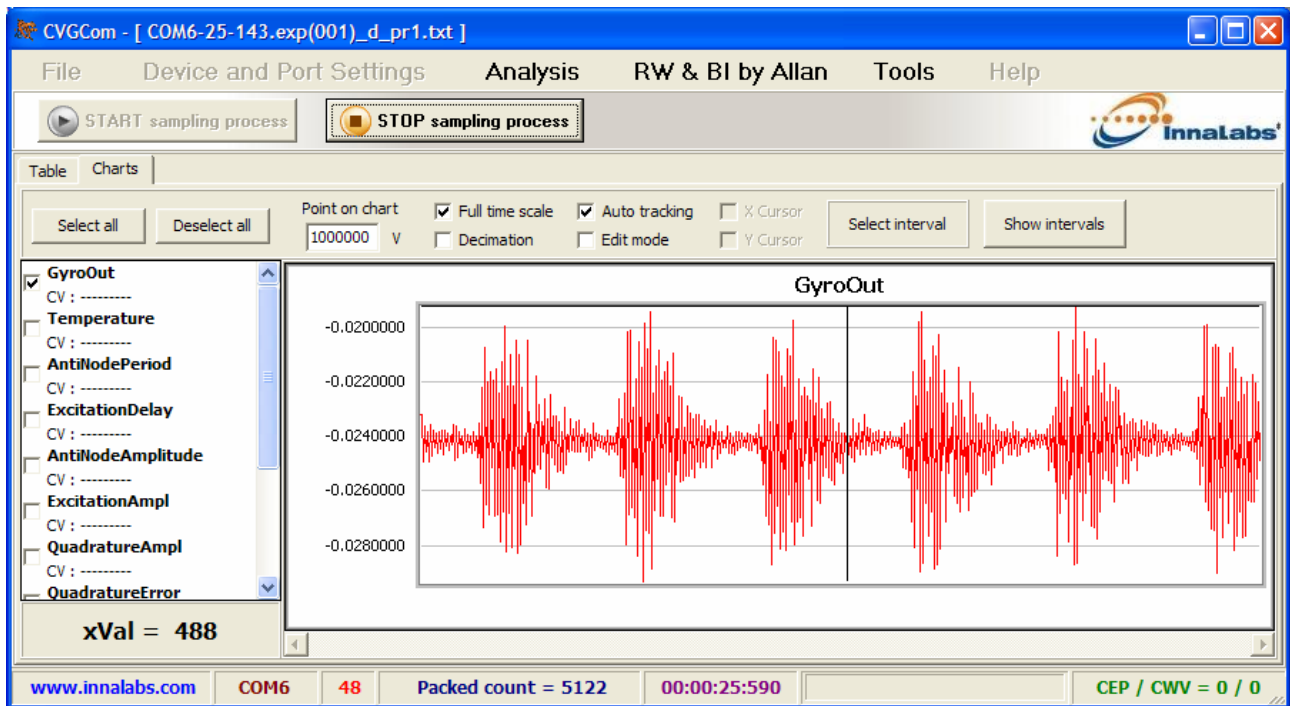


Рис. 5.5 Відображення вихідного сигналу ТХГ в графічному вигляді

3. Обробка вимірювань першого етапу калібрування.

- 3.1. Занести до табл. 5.1 результати вимірювань вихідного сигналу $U_{\omega zi}$ ТХГ для кожного i -го значення кутової швидкості обертання ТХГ на поворотному стенді. Вихідні дані взяти з файлу means.dat, створеного програмою CVG_Gyro_Mean на першому етапі калібрування.
- 3.2. Обчислити за формулами (3.6) параметри k_z , $U_{\omega z0\Sigma}$ моделі (3.5) вихідного сигналу ТХГ. Отриманий масштабний коефіцієнт k_z занести в табл. 5.3. **Обов'язково вказати розмірність цього коефіцієнта.**

4. Обробка вимірювань другого етапу калібрування.

- 4.1. Занести в табл. 5.2 результати вимірювання вихідного сигналу $U_{\omega zi}$ для кожного i -го положення ТХГ у відповідності до першої частиною табл. 3.1 (обертання навколо осі X – див. Лабораторна робота №3). Вихідні дані взяти з файлу means.dat, створеного програмою CVG_Gyro_Mean на другому етапі калібрування.

- 4.2. Обчислити за формулами (3.9) параметри моделі (3.7) вихідного сигналу ТХГ. При цьому взяти модуль вектора прискорення сили тяжіння $g = 9.8106 \text{ м/с}^2$. Отримані параметри калібрування занести до табл. 5.3.
- Обов'язково вказати розмірності для кожного параметра.**

В результаті виконання двох етапів калібрування ТХГ визначаються параметри вихідної моделі (3.3) вихідного сигналу ТХГ, вказані в табл. 5.3

5. Оцінка точності калібрування ТХГ на обертальному стенді.

- 5.1. Враховуючи значення обчислених параметрів калібрування (табл. 5.3), розрахувати за формулою (3.10) калібровані значення вихідного сигналу ТХГ $\omega_{\text{ТХГ}i}$, отримані при обертанні з кутовими швидкостями ω_{zi} , вказаними в табл. 5.1. Результати занести в табл. 5.4.
- 5.2. Обчислити похибку вимірювання кутової швидкості ТХГ при калібруванні, $\Delta\omega_i = \omega_{\text{ТХГ}i} - \omega_{zi}$ і занести в табл. 5.4.
- 5.3. Використовуючи дані з табл. 5.4, побудувати графік похибки вимірювання кутової швидкості ТХГ $\Delta\omega_i$ в залежності від заданої кутової швидкості ω_{zi} .

5.3. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Модель вихідного сигналу ТХГ, що ідентифікувалась при калібруванні.
3. Вихідні сигнали ТХГ при заданих значеннях кутової швидкості обертання на поворотному стенді (табл. 5.1).
4. Вихідні сигнали ТХГ в положеннях при калібруванні на ОДГ (табл. 5.2).
5. Розрахунок параметрів за формулами (3.6), (3.9).
6. Обчислені параметри калібрування ТХГ (табл. 5.3).
7. Розраховані калібровані значення вихідного сигналу ТХГ $\omega_{\text{ТХГ}i}$ і похибки вимірювання кутової швидкості ТХГ при калібруванні $\Delta\omega_i$ (табл. 5.4).

8. Графік похибки вимірювання кутової швидкості ТХГ $\Delta\omega_i$ в залежності від заданої кутової швидкості ω_{zi} .

Таблиця 5.1. Результати вимірювань вихідного сигналу ТХГ на поворотному стенді

Задане значення кутової швидкості ω_{zi} , град/с	Вихідний сигнал ТХГ $U_{\omega zi}$
-40	
-20	
0	
20	
40	

Таблиця 5.2. Результати вимірювань вихідного сигналу ТХГ на ОДГ

Номер положення ТХГ, і	Кут за шкалою ОДГ	Вихідний сигнал ТХГ $U_{\omega zi}$
Поворот навколо осі Х		
1	0°	
2	90°	
3	180°	
4	270°	

Таблиця 5.3. Результати калібрування ТХГ

Тип ТХГ	Результати калібрування			
	k_z	$U_{\omega z0}$	b_{zy}	b_{zz}

Таблиця 5.4. Перевірка точності калібрування ТХГ

Задане значення кутової швидкості ω_{zi} , град/с	Виміряне каліброване значення кутової швидкості $\omega_{ТХГi}$, град/с	Похибка вимірювання кутової швидкості ТХГ при калібруванні $\Delta\omega_i$, град/с
-40		
-20		
0		
20		
40		

5.4. Контрольні запитання

1. Що таке твердотільний хвильовий гіроскоп (ТХГ) і на якому принципі базується вимірювання кутової швидкості в ТХГ?
2. Принцип роботи ТХГ у режимі інтегруючого гіроскопу.
3. Що таке позиційне і параметричне збудження коливань резонатора ТХГ?
4. Пояснити модель (3.3) вихідного сигналу ТХГ у режимі ДКШ.
5. Пояснити розмірності кожного коефіцієнта у моделі вихідного сигналу (3.3).
6. В чому полягає задача калібрування ТХГ у режимі ДКШ?
7. В чому полягає суть методики калібрування ТХГ у режимі ДКШ, застосованої в даній роботі? Чому вона розділена на два етапи?
8. Коротко описати процедури калібрування ТХГ у режимі ДКШ, що були виконані під час лабораторної роботи.
9. Чому при калібруванні ТХГ у режимі ДКШ в даній лабораторній роботі визначені не всі параметри вихідної моделі (3.3) вихідного сигналу ДКШ, а тільки ті, які вказані в табл. 5.3?

6. Лабораторна робота №6.

Використання варіацій Аллана при дослідженні характеристик гіроскопів

Мета роботи

1. Ознайомлення з характеристиками шуму вимірювання гіроскопів.
2. Вивчення методики варіацій Аллана для оцінювання складових сигналу вимірювання гіроскопа.
3. Дослідження характеристик датчиків кутової швидкості (ДКШ) з використанням варіацій Аллана.
4. Зробити порівняльний аналіз характеристик всіх типів ДКШ, які досліджувались у попередніх лабораторних роботах.

6.1. Теоретичні відомості

6.1.1. Шум вимірювання та випадковий дрейф

В цій роботі, насамперед, досліджуються характеристики шуму вимірювання ДКШ.

По-перше, рівень шуму визначає поріг чутливості ДКШ, оскільки неможливо точно виміряти малу кутову швидкість якщо вона менше рівня шуму ДКШ. Для зниження порогу чутливості застосовують осереднення вихідних сигналів ДКШ (як це робиться, наприклад, при калібруванні) або фільтрують їх у інший спосіб. Недоліком і осереднення, і фільтрування є запізнювання, які вони вносять, зменшення швидкодії ДКШ.

Інша негативна особливість шуму вимірювання проявляється при використанні ДКШ в системах орієнтації і навігації, у яких вихідний сигнал ДКШ інтегрується. Інтегрування шумової складової сигналу ДКШ призводить до появи повільно мінливого *випадкового дрейфу* ДКШ. Англomовний термін – *random walk*, або скорчено ARW (angle random walk). Для прикладу на рис. 6.1 показані

вихідні сигнали трьох міромеханічних ДКШ курсовертикалі, яка була закріплена нерухомо, та результат визначення кутів орієнтації шляхом інтегрування сигналів ДКШ. Графіки зміни кутів і є випадковим дрейфом ДКШ. Відмітимо, що фільтрування сигналів ДКШ не може зменшити випадковий дрейф, а тільки згладжує його різкі зміни.

При дослідженні характеристик шуму ДКШ його часто апроксимують білим шумом з постійною інтенсивністю $S = \text{const}$. Якщо сигнал вимірюється у [Вольтах], то одиниця вимірювання інтенсивності [Вольт²/Гц]. Якщо калібрований сигнал ДКШ має розмірність [град/с], то інтенсивність його шуму вимірюється у [(град/с)²/Гц].

Випадковий дрейф ДКШ характеризують коренем квадратним з інтенсивності $N = \sqrt{S}$. Відповідно розмірність випадкового дрейфу дорівнює [град/с/ $\sqrt{\text{Гц}}$].

Часто враховують співвідношення для розмірностей $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$. Тоді розмірність випадкового дрейфу запишеться як [град/ $\sqrt{\text{с}}$]. У гіроскопах середньої і високої точності похибки, у тому числі випадковий дрейф, досить малі, тому в якості одиниць вимірювання похибок замість [град/с] використовують [град/годину]. Відповідно випадковий дрейф вимірюють не в [град/ $\sqrt{\text{с}}$], а в [град/ $\sqrt{\text{Г}}$]. Враховуючи, що 1 година = 3600 секунд, маємо $1 \sqrt{\text{години}} = 60 \sqrt{\text{секунди}}$. В результаті маємо співвідношення для розмірностей випадкового дрейфу гіроскопа:

$$1 \text{ [град/с/}\sqrt{\text{Гц}}] = 1 \text{ [град/}\sqrt{\text{с}}] = 60 \text{ [град/}\sqrt{\text{Г}}].$$



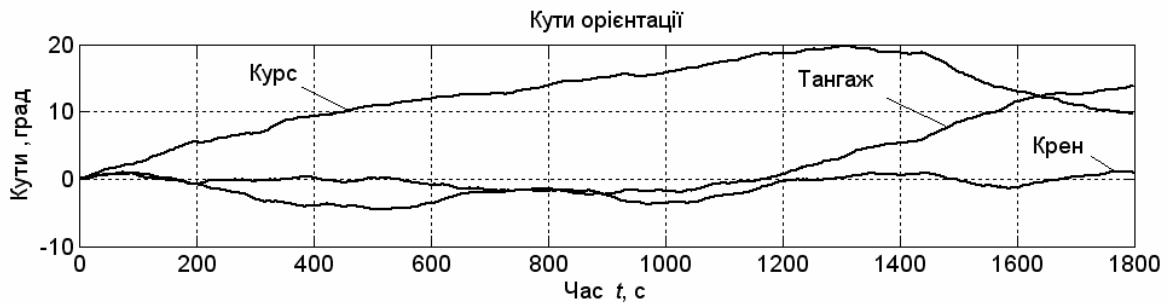


Рис. 6.1. Результат інтегрування сигналів ДКШ при наявності шуму

6.1.2. Варіації Аллана

Останнім часом для визначення складових шуму вимірювання ДКШ широко використовують метод варіацій (дисперсій) Аллана. Цей метод подібний до класичної вибіркової дисперсії, однак обчислюються не дисперсії відхилень центрованого випадкового процесу, а різниці сусідніх відхилень.

Нехай в результаті тесту отримано масив з N вимірів дискретних значень $U(t)$. Значення $U(t)$ поділяються на групи з M послідовних вимірів. Всього отримаємо $K = N/M$ груп. Позначимо через U_k середнє значення вимірів $U(t)$ у k -й групі.

Обчислення варіації Аллана σ_A^2 полягає у визначенні дисперсії різниці між середніми значеннями двох сусідніх груп, тобто дисперсії для $(U_{k+1} - U_k)$

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{2(K-1)} \sum_{k=1}^{K-1} (U_{k+1} - U_k)^2 \quad (6.1)$$

Вочевидь, середнє значення групи U_k залежить від розміру групи M , тобто $U_k = U_k(M)$. а дисперсія σ_A^2 залежить також від проміжку часу між двома сусідніми групами (часу кореляції) $\tau = M / f_S$, де f_S – частота опитування вимірюваної величини. В результаті вираз (6.1) для обчислення варіації Аллана матиме вигляд:

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2(K-1)} \sum_{k=1}^{K-1} [U_{k+1}(M) - U_k(M)]^2 \quad (6.2)$$

Фактично параметр τ є інтервалом усереднювання вимірних значень в групі розміром M .

В той же час існує однозначний зв'язок варіації Аллана з класичними характеристиками випадкового процесу в частотній області виду:

$$\sigma_A^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_U(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df, \quad (6.3)$$

де $S_U(f)$ - спектральна щільність вимірюваного сигналу $U(t)$.

Виходячи з відомих для гіроскопів інерціальних вимірювачів (у тому числі ДКШ) основних фізичних причин виникнення шумових складових і відповідних конкретних виразів для спектральної щільності, вираз для варіації Аллана $\sigma_A^2(\tau)$ можна апроксимувати наступним чином:

$$\sigma_A^2(\tau) = R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}, \quad (6.4)$$

де, R , K , B , N , Q – коефіцієнти випадкової швидкості дрейфу $\omega_{др}(t)$, які мають наступний зміст:

R – квазідетермінована зміна вхідної швидкості дрейфу $\omega_{др}(t) = R t$;

K – випадкове блукання швидкості, спектральна щільність якого

$$S_U(f) = \left(\frac{K}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{f^2};$$

B – нестабільність зміщення нуля, що описується спектральною щільністю виду фліккер-шуму

$$S_U(f) = \begin{cases} \frac{B^2}{2\pi f}, & f \leq f_0 \\ 0, & f > f_0 \end{cases}$$

N – випадкове блукання кута (випадковий дрейф гіроскопа), яке має постійну спектральну щільність

$$S_U(f) = N^2 \text{ (білий шум);}$$

Q – квантування вихідного сигналу, яке описується спектральною щільністю

$$S_{\omega}(f) = (2\pi f)^2 Q^2 \tau.$$

На практиці для аналізу залежності варіації Аллана $\sigma_A^2(\tau)$ від часу кореляції τ (тобто розміру групи M) і кількісної оцінки окремих складових зазвичай використовується побудований в логарифмічному масштабі графік виміру квадратного кореня $\sigma_A(\tau) = \sqrt{\sigma_A^2(\tau)}$ від інтервалу кореляції τ .

Для кількісної оцінки перелічених шумових складових може бути використано домінування окремих складових $\sigma_A^2(\tau)$ (6.4) на різних інтервалах τ , що проявляється в характерних нахилах графіка $\sigma_A(\tau)$, представленого в логарифмічному масштабі. З виразу (6.4) випливає, що різним шумовим складовим відповідають характерні нахили графіка варіації Аллана – як показано на рис. 6.2 і наведено у табл. 6.1.

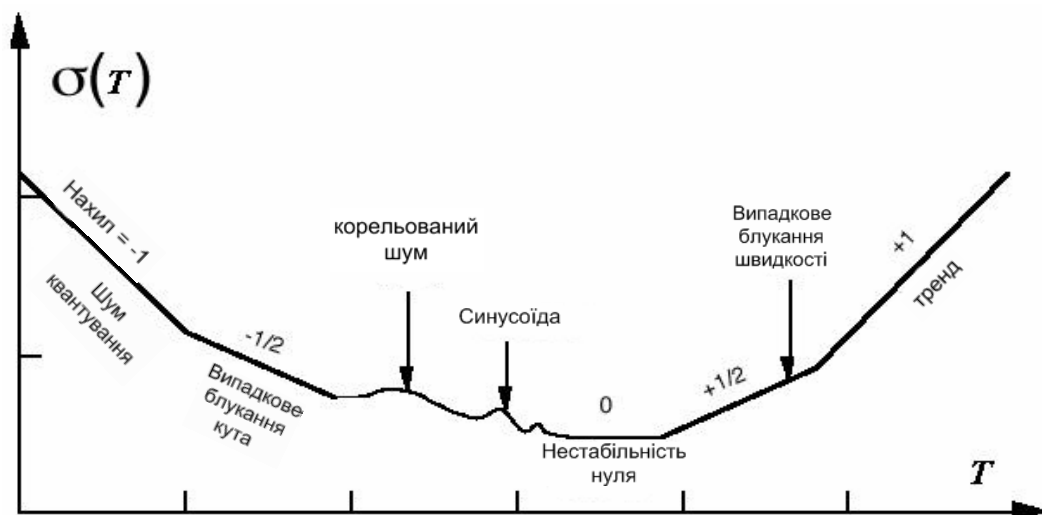


Рис. 6.2. Характерні нахили графіка варіації Аллана

Таблиця 6.1. Відповідність коефіцієнтів нахилу графіка варіації Аллана

R	K	B	N	Q
+1	+1/2	0	-1/2	-1

Отримані значення коефіцієнтів R, K, B, N, Q характеризують інтенсивність окремих шумових складових вихідного сигналу вимірювача.

На практиці отриманий графік $\sigma_A(\tau)$ апроксимують асимптотами:

1. Шум Q від квантування АЦП по Аллану визначається як значення асимптоти з нахилом «-1» в точці $\tau = \sqrt{3}$ с на осі абсцис.
2. Випадкове блукання N (випадковий дрейф гіроскопа) по Аллану визначається як значення асимптоти з нахилом «-1/2» при $\tau = 1$ с.
3. Нестабільність нуля B по Аллану визначається як значення дотичної з нахилом «0» в мінімальному значенні графіка варіації Аллана. Це значення необхідно розділити на 0.664, оскільки згідно виразу (4)

$$B = \frac{\sigma_A}{\sqrt{2 \ln 2 / \pi}} = \frac{\sigma_A}{0.664}.$$

Наприклад, у відповідності до графіка варіації Аллана, показаного на рис. 6.3, випадковий дрейф ДКШ становить $N = 0.02$ град/с/ $\sqrt{\Gamma_{ц}}$, а стабільність нуля $V = 0.0083 / 0.664 = 0.012$ град/с.

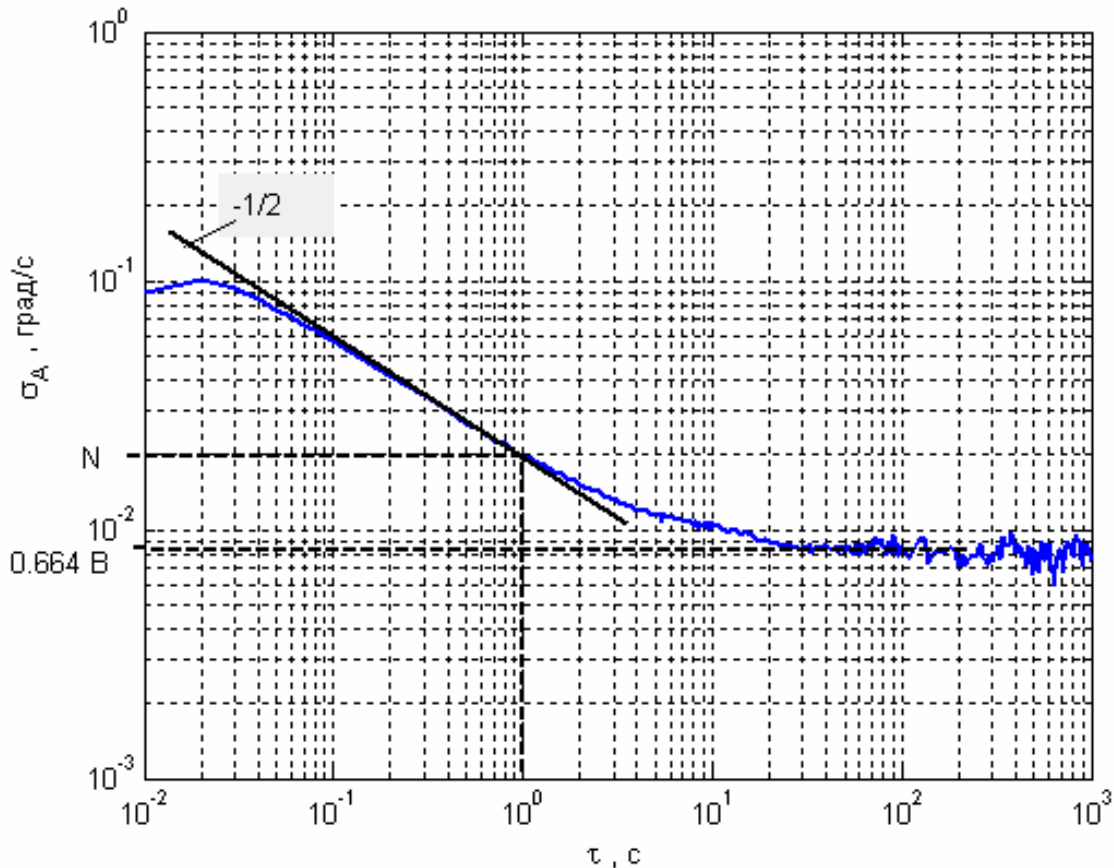


Рис. 6.3. Приклад графіка варіації Аллана і визначення шумових складових

6.2. Завдання до лабораторної роботи

1. Зробити пуски вказаних викладачем датчиків кутової швидкості на нерухомій основі протягом однієї години з частотою 100 Гц, результати записати у файли.
2. Використовуючи знайдені у попередніх лабораторних роботах масштабні коефіцієнти досліджуваних ДКШ, перерахувати вихідні сигнали ДКШ, виміряні в п.1, у град/с. Нульовий сигнал можна не враховувати.
3. Побудувати графіки варіацій Аллана для кожного з досліджуваних ДКШ.
4. Визначити випадкове блукання (випадковий дрейф) ДКШ по Аллану.

5. Визначити нестабільність нуля ДКШ по Аллану.
6. Навести отримані результати та графік варіації Аллана в протоколі лабораторної роботи.
7. Зробити порівняльний аналіз характеристик різних типів ДКШ, які досліджувалися при виконанні лабораторних робіт №3 – №6. Результати занести до наступної таблиці

	Тип ДКШ і фірма-виробник		
	ADXRS610 Analog De- vices	LCG50-00500- 100 Systron Donner	CVG-25 Innalabs
Масштабний коефіцієнт, код/(°/с)			
Чутливість до лінійного прискорення, (°/с)/(м/с ²)			
Випадковий дрейф, °/с/ $\sqrt{\text{Гц}}$			
Нестабільність нуля, °/с			

6.3. Контрольні запитання

1. Що таке випадковий дрейф (random walk) ДКШ?
2. Які одиниці вимірювання інтенсивності шуму ДКШ?
3. Які одиниці вимірювання випадкового дрейфу (random walk) ДКШ?
4. З якою метою використовується метод варіації Аллана?
5. Як визначити складові шуму вимірювання за графіком варіації Аллана?

Зміст

Передмова	3
1. Лабораторна робота №1. Експериментальне дослідження характеристик мікромеханічних акселерометрів.....	4
1.1. Теоретичні відомості.....	4
1.1.1. Модель вихідного сигналу акселерометра.....	5
1.1.2. Калібрування акселерометрів.....	6
1.2. Послідовність виконання роботи.....	11
1.3. Зміст звіту.....	15
1.4. Контрольні запитання.....	16
2. Лабораторна робота №2. Експериментальне дослідження характеристик трьохосного блока акселерометрів.....	17
2.1. Теоретичні відомості.....	17
2.1.1. Модель вихідних сигналів трьохосного блока акселерометрів.....	17
2.1.2. Калібрування трьохосного блока акселерометрів.....	18
2.1.3. Використання результатів калібрування акселерометрів в алгоритмах систем орієнтації і навігації.....	20
2.1.4. Визначення кутів нахилу об'єкта по сигналам акселерометрів.....	21
2.2. Послідовність виконання роботи.....	23
2.3. Зміст звіту.....	33
2.4. Контрольні запитання.....	35
3. Лабораторна робота №3. Експериментальне дослідження характеристик мікромеханічних датчиків кутової швидкості ADXRS610 фірми Analog Devices. 36	
3.1. Теоретичні відомості.....	36
3.1.1. Модель вихідного сигналу датчика кутової швидкості.....	36
3.1.2. Калібрування ДКШ.....	38
3.2. Послідовність виконання роботи.....	43
3.3. Зміст звіту.....	51
3.4. Контрольні запитання.....	52
4. Лабораторна робота №4. Експериментальне дослідження характеристик мікромеханічних датчиків кутової швидкості LCG50-00500-100 фірми Systron Donner.....	53
5. Лабораторна робота №5. Експериментальне дослідження характеристик твердотільного хвильового гіроскопа.....	55
5.1. Теоретичні відомості.....	55
5.2. Послідовність виконання роботи.....	56
5.3. Зміст звіту.....	63
5.4. Контрольні запитання.....	65
6. Лабораторна робота №6. Використання варіацій Аллана при дослідженні характеристик гіроскопів.....	66
6.1. Теоретичні відомості.....	66
6.1.1. Шум вимірювання та випадковий дрейф.....	66
6.1.2. Варіації Аллана.....	68
6.2. Завдання до лабораторної роботи.....	72
6.3. Контрольні запитання.....	73