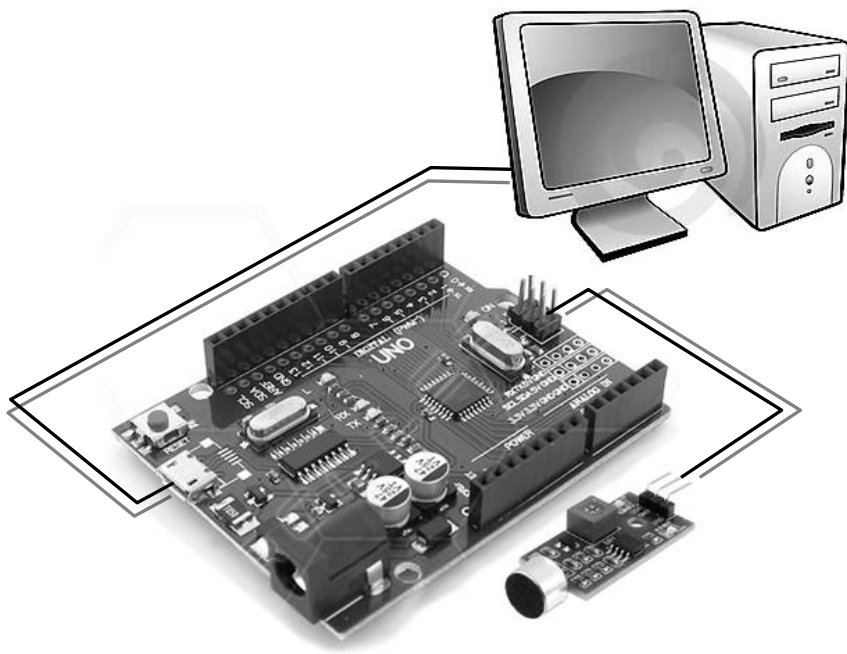




ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний авіаційний університет

**ДОСЛІДЖЕННЯ
МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
для студентів спеціальностей 151
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Київ 2020

УДК 621. 3. 049. 76(076 .5)
Д703

Укладачі: М.П. Василенко, М.П. Мухіна, В.М Синеглазов,
М.К. Філяшкін

Рецензент

О.К. Аблесімов - проф., заслужений діяч науки і техніки України.

*Затверджено методично – редакційною радою університету
(протокол №? від ???.???.2020 р.)*

Д703 Дослідження мікроелектромеханічних систем
Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт/Укл.:
М.П. Василенко, М.П. Мухіна, В.М.Синеглазов, М.К.Філяшкін
– К.: НАУ, 2019. – 115 с.
ISBN 978-966-97410-4-2

Містять скорочені теоретичні питання, описи лабораторних установок, вказівки та завдання на випробування зразків мікроелектромеханічних системи. Досліджуються точності характеристики основних типів мікроелектромеханічних датчиків. В ході виконання лабораторних робіт, студенти набувають практичних навичок з програмування мікроконтролерів та з проведені випробувань зразків мікромеханічних пристроїв, що дозволяє оцінити якість їх виготовлення та функціонування.

Для студентів вищих навчальних закладів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

УДК 621. 3. 049. 76(076 .5)

ISBN 978-966-97410-4-2

© М.П. Василенко, М.П. Мухіна,
В.М Синеглазов, М.К. Філяшкін.

Передмова

Аналіз сучасного стану техніки нових поколінь показує, що одним з найбільш глобальних науково-технічних напрямів, які бурхливо розвиваються і визначають нову революцію у сфері систем, реалізованих на мікрорівні, є мікросистемна техніка (МСТ) і створені на її базі мікроелектромеханічні системи (МЕМС).

Сьогодні МЕМС-пристрої застосовуються майже повсюдно. Мікромашини, механізми та прилади МСТ за вартістю, надійністю, ресурсом, габаритними показниками, енергоспоживанням, шириною та ефективністю застосування істотно перевершують традиційні аналоги. Тому впровадження сучасних мікросистемних технологій в поточну програму бакалаврів в українських університетах узгоджується з програмою спільного європейського проекту Curricula Development for New Specialization: Master of Engineering in Microsystems Design, який підтримується Європейським Союзом.

Дана навчально-методична розробка для лабораторного практикуму дає можливість студентам, що вивчають курс «Мікроелектромеханічні системи» паралельно з лекційними заняттями вивчити теоретичний матеріал і підготуватися до виконання лабораторних робіт з дослідження МЕМС. Лабораторні роботи виконуються на персональних комп'ютерах, до яких приєднується модуль Arduino з власним процесором і пам'яттю, який відіграє роль електронного конструктора зі зручною платформою для побудови систем автоматизації. Модуль Arduino у свою чергу з'єднаний з досліджуванним зразком МЕМС-пристрою.

В ході виконання лабораторних робіт, студенти набувають практичних навичок з програмування мікроконтролерів та з проведення випробувань зразків МЕМС-пристроїв, що дозволяє оцінити якість їх виготовлення та функціонування.

Методичні вказівки відповідають навчальній та робочій навчальній програмам дисципліни «Мікроелектромеханічні системи» і призначені для студентів факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій, що навчаються за спеціальністю «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Лабораторна робота 1

ДОСЛІДЖЕННЯ БАРОМЕТРИЧНОГО МІКРОМЕХАНІЧНОГО ВИСОТОМІРА

Мета роботи

Метою лабораторної роботи є набуття практичних навичок програмуванні та проведенні експериментальних досліджень інформаційних мікропроцесорних пристроїв, в дослідженні характеристик мікромеханічного датчика абсолютного тиску як вимірювача барометричної висоти

Методичні вказівки

Повторити такі теоретичні питання дисципліни:

- МЕМС-датчики тиску;
- стандартна атмосфера;
- гіпсометричні формули обчислення барометричної висоти.

Завдання на виконання лабораторної роботи

1. Зібрати схему лабораторної установки з дослідження МЕМС-датчика тиску BMP180.
2. Запрограмувати мікропроцесор на вимір барометричної висоти.
3. Зняти статичні характеристики вимірників висоти (МЕМС-датчика BMP180 та механічного висотоміра ВД-10). Порівняти їхні інструментальні похибки.
4. Дослідити вплив температурної компенсації на покази МЕМС датчика BMP180.
5. Дослідити рівень шумів МЕМС-датчика BMP180.

1.1. Скорочені теоретичні питання

Принципом дії будь-якого датчика тиску є перетворення тиску, що діє на чутливий елемент, в електричний сигнал. Чутливі елементи, які входять до складу датчиків тиску, є механічними пристроями, які деформуються або пересуваються під дією зовнішнього впливу, – саме це і фіксується в процесі вимірювань.

Першу групу чутливих елементів створюють пристрої, в яких тиск перетворюється в силу, яка переміщує математичну точку її прикладання. Найпоширенішими чутливими елементами цього типу є трубка Бурдона, яка «розгинається» під дією тиску, а також

сильфон і мембранна коробка, жорсткий центр яких здійснює поступальний рух.

Другу групу, яку найчастіше використовувану в МЕМС-датчиках, утворюють чутливі елементи, в яких тиск перетворюється в деформацію пружної мембрани. Тут тиск залишається розподіленою силою, а чутливим елементом стає вся поверхня мембрани, яка прогинається під дією тиску.

Крім чутливого елемента, наприклад, мембрани відомої площі A , до складу датчиків тиску обов'язково входить детектор, вихідний сигнал якого пропорційний прикладеній силі F .

$$P = \frac{dF}{dA}$$

Існує декілька методів перетворення отриманого відхилення мембрани або пластини в електричний сигнал, основними з яких є тензо- і п'єзорезистивний ефект. Існують також МЕМС датчики тиску, що побудовані на основі ємнісних, резонансних і індукційних перетворювачів.

Тензо-і п'єзорезистивні датчики тиску

Тензо- і п'єзорезистивний принципи вимірювання тиску, засновані на зміні питомого електричного опору матеріалу вразі його деформації під дією тиску. Тензорезистивний (п'єзорезистивний) ефект виникає під час деформації через зміну міжатомних відстаней, що у свою чергу спричиняє зміну структури енергетичних зон кристала. Останнє зумовлює зміну концентрації носіїв струму (електронів), їх ефективної маси та їх перерозподіл між енергетичними максимумами в зоні провідності і мінімумами у валентній зоні. Крім того, деформація впливає на процеси розсіювання носіїв.

Термін «тензорезистивний» зазвичай вживається стосовно сенсорів, у яких пружним елементом є металева мембрана, на яку наклеюється тензоперетворювач. Як тензоперетворювачі можуть використовуватися тонкоплівкові напівпровідникові тензорезистори, або пластини сапфіра з кремнієвими тензосхемами $\square \square \square$ структури КНС (кремній на сапфірі). Наприклад, у тензорезистивному датчику тиску (рис. 1.1, а) в епітаксialній плівці кремнію на підкладці із сапфіру, яка припаяна твердим припоєм до титанової мембрани, методом іонної імплантації або дифузійним методом формується вимірювальний міст Уїнстона з кремнієвих тензорезисторів.

Недоліки тензорезистивних сенсорів:

- низька чутливість (у межах 1%);
- значні гістерезисні явища і нестабільність (через неоднорідність конструкції і втому металу мембрани);
- сильний вплив температури (за рахунок різниці коефіцієнтів температурного розширення елементів сенсора і зміни електропровідності кремнію);
- нелінійність.

П'єзорезистивними зазвичай називають монокристалічні кремнієві сенсори (рис. 1.1, б), в яких пружним елементом слугує кремнієва мембрана, яка витравлена з монокристалічного кремнію і встановлена на діелектричну основу з використанням легкоплавкого скла або методом анодного зрощування. На мембрані методом

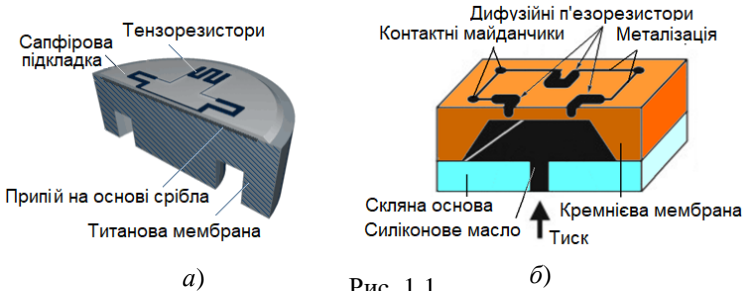


Рис. 1.1

дифузії замість тензорезисторів формують п'єзорезистори, які у свою чергу створюють міст Уїнстона.

Резистори формують на кремнієвій мембрані таким чином, щоб поздовжні і поперечні коефіцієнти тензочутливості були різних знаків, тоді і зміни опорів резисторів будуть протилежними. Одні з п'єзорезисторів формуються паралельно орієнтації решітки мембрани, а другі (див. рис. 1.1, б) – перпендикулярно.

Деформація і як наслідок зміни опорів п'єзорезисторів призводить до розбалансу моста Уїнстона (рис. 1.2). Розбаланс лінійно залежить від ступеня деформації резисторів і, відповідно, від прикладеного тиску. Вихідна напруга мостової схеми складає кілька сотень мілівольт, тому на виході датчиків, зазвичай, ставляться підсилювачі сигналів. Оскільки кремнієві п'єзорезистори володіють сильною температурною чутливістю, то необхідно при розробці датчиків на їх основі передбачати ланцюги температурної компенсації.

Для діапазону температур від 0 до 85 °С досить простого терморезистивного ланцюга R_T , реалізованої на тому ж кристалі (рис.

1.3), але для більш широкого діапазону температур, наприклад від -40 до $+125$ °С, знадобиться і більш складна схема компенсації.

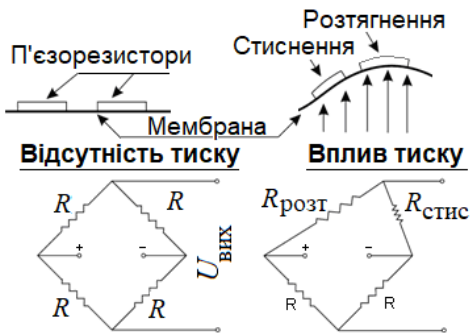


Рис. 1.2

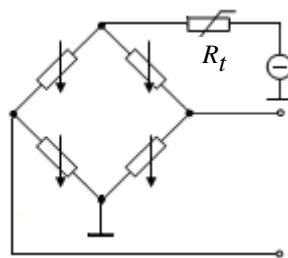


Рис. 1.3

Така додаткова компенсація реалізується зовнішніми схемами. Ці датчики, крім чутливих елементів додатково містять убудовані в кристал тонкоплівкові термістори, які калібровані за допомогою лазерної пригонки з тим щоб забезпечити відносно стабільний вихідний сигнал.

Оскільки монокристалічний кремній має абсолютні пружні властивості, у мембрані такого датчика відсутні гістерезис і повзучість навіть при високому тиску.

Недоліки п'єзорезистивних датчиків, окрім гістерезису, здебільшого такі самі, що і тензорезистивних датчиків, але виражені в менше.

Існує кілька способів виробництва кремнієвих датчиків тиску з однаковою п'єзочутливістю.

Існує кілька способів виробництва кремнієвих датчиків тиску з однаковою тензочутливістю.

Традиційний спосіб передбачає використання кремнієвої підкладки, в якій методом анізотропного травлення формується мембрана. Як жертвні шари застосовуються SiO_2 , для формування захисного шару з нижнього боку підкладки – SiN_4 . Кінцева товщина діафрагми дорівнює приблизно 30 мкм.

На мембрані створюється епітаксціальний шар n -типу для забезпечення ізоляції. Далі, методом іонної імплантації або дифузійним методом формуються п'єзорезистори.

У зоні підкладки навколо діафрагми формуються інші елементи схеми датчика, які, зокрема, використовуються для температурної

компенсації.

Мікромеханічні датчики тиску виготовляють двох видів: диференціальні та абсолютні. Базові корпуси датчиків абсолютного та диференціального тиску ідентичні. Розглянемо будову базового корпусу детальніше.

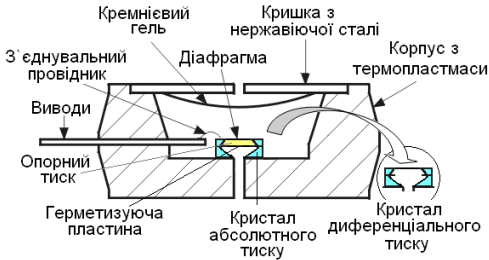


Рис. 1.4

диференціального та абсолютного тиску (див. рис. 1.4) полягає в тому, що останній не має отвору в нижній – герметизувальній кремнієвій пластині, а порожнина, витравлена над пластиною, містить вакуум – опорний тиск. Внутрішня частина корпусу заповнюється силіконовим гелем, який ізолює поверхню кристала та місця з'єднань, але дозволяє тиску впливати на діафрагму; так здійснюється захист пристрою від шкідливого впливу навколишнього середовища.

Як приклад на рис. 1.5 показано інтегральний п'єзорезистивний МЕМС-датчик вимірювання барометричного тиску BMP180. Кристал датчика тиску міститься на кремнієвому кристалотримачі, приклеєному до корпусу датчика.

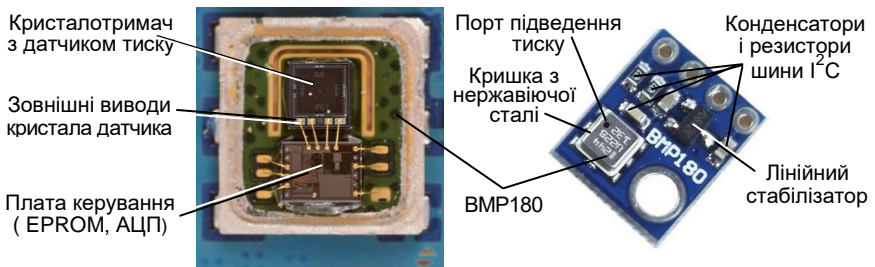


Рис. 1.5

Пластмасовий корпус з одним або двома портами підведення тиску закритий кришкою з нержавіючої сталі. У корпус впресовані зовнішні виводи, які за допомогою золотих провідків з'єднуються

з рамкою виводів кристалу датчика тиску.

Досліджуваний датчик тиску BMP180 є саме п'єзорезистивним MEMS-датчиком вимірювання барометричного тиску. На платі BMP180 (див. рис. 1.5) окрім датчика розташований лінійний стабілізатор напруги з конденсаторами і резистори підтяжки живлення шині I²C.

Датчик калібрується і має схему температурної компенсації. Індивідуальні калібрувальні коефіцієнти (11 коефіцієнтів) закладені у вбудовану EPROM пам'ять датчика.

Крім тиску, датчик може видавати інформацію про температуру навколишнього середовища. Датчик може працювати в декількох режимах:

- стандартний режим, включаючи режим зниженого енергоспоживання;
- режим високої та ультрависокої здатності.

Управління датчиком здійснюється від мікропроцесорного керуючого пристрою, у нашому випадку від Arduino контролера.

Після підключення датчика, необхідно встановити бібліотеки для роботи з датчиком BMP180. Деякі бібліотеки вже включені в середовище розробки Arduino.

Інші, наприклад, загальнодоступні алгоритми програмного забезпечення від розробника Bosch Sensortec можуть бути завантажені з різних ресурсів. У бібліотеці роботи з датчиком BMP180 знаходяться файли калібрування, температурної компенсації, а також деякі алгоритми розрахунку абсолютної висоти.

Після ініціалізації програмного забезпечення мікроконтролер зчитує калібрувальні коефіцієнти (рис. 1.6) з вбудованою



Рис. 1.6

EPROM пам'яті датчика BMP180. Далі вже в нескінченному циклі починається вимірювання тиску і температури. «Сирі» покази сенсора температури UT і тиску UP зчитуються з АЦП, через інтерфейс I^2C після чого за спеціальним алгоритмом (див. рис. 1.6), використовуючи калібрувальні коефіцієнти і значення температури (для реалізації температурної компенсації), обчислюються істинні значення температури t° та тиску P .

У стандартному режимі частота дискретизації становить 128 вимірювань в секунду. У цьому випадку досить виміряти температуру тільки один раз в секунду і використовувати це значення для всіх вимірювань тиску за той же період.

П'єзорезистивні МЭМС датчики тиску стали активно використовуватися в авіації, особливо на малих БПЛА, в якості вимірників атмосферного тиску, що є основою для розрахунку барометричної висоти польоту як функції статичного тиску $P_{ст}$.

Для обчислення аерометричних параметрів використовуються градувальні формули окремих аерометричних приладів. Зокрема до висоти 11 км абсолютна барометрична висота $H_{абс}$ може обчислюватися за гіпсометричною формулою

$$H_{абс} = \frac{T_0}{\beta} \left[\left(\frac{P_{ст}}{P_0} \right)^{\frac{\beta R}{g_0}} - 1 \right],$$

де $T_0 = 288,15$ К, $P_0 = 101325$ Па – стандартні значення температури та статичного тиску на рівні моря за СА-8I; $\beta = -6,5 \cdot 10^{-3}$ К/м – температурний градієнт, $R = 287,05287$ Дж/(кг·К) – питома стала повітря, $g_0 = 9,80665$ м/с² – відповідає прискоренню сили ваги на широті $45^\circ 32' 33''$.

Крім розглянутих принципів побудови датчиків тиску, існують й інші, наприклад резонансні, ємнісні, індукційні, оптичні датчики тиску, датчики тиску на основі поверхневих акустичних хвиль, магнітометричні датчики тиску тощо. Проте найбільш поширеними поки залишаються п'єзорезистивні та резонансні датчики тиску.

1.2. Опис лабораторної установки

До складу лабораторної установки входять:

- установка контролю анероїдно-манометричних приладів (УКАМП) з вакуумною помпою;
- барокамера (рис. 1.7), всередині якої розташований досліджуваний датчик тиску ВМР180;

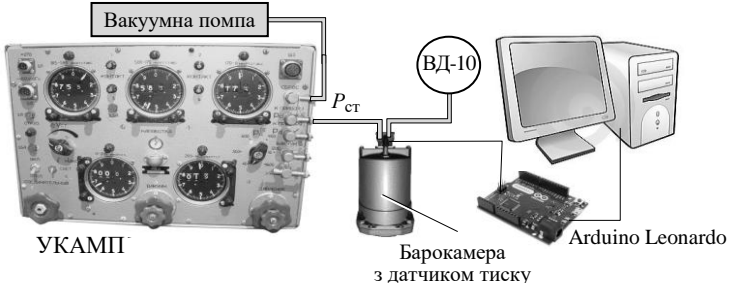


Рис. 1.7

- модуль Arduino Leonardo, що приєднаний до комп'ютера, а через герметичний рознімач барокамери до плати ВМР180;
- контрольний механічний двострілочний висотомір ВД-10.

Тиск, необхідний для перевірки, створюється вакуумною помпою. Кранами установки УКАМП магістраль вакууму може бути з'єднана з барокамерою та з контрольним висотоміром ВД-10 або з атмосферою.

1.2.1. Установка контролю анероїдно-манометричних приладів

Лицьова панель установки УКАМП показана на рис. 1.8, а на рис. 1.9 представлена функціональна схема установки.

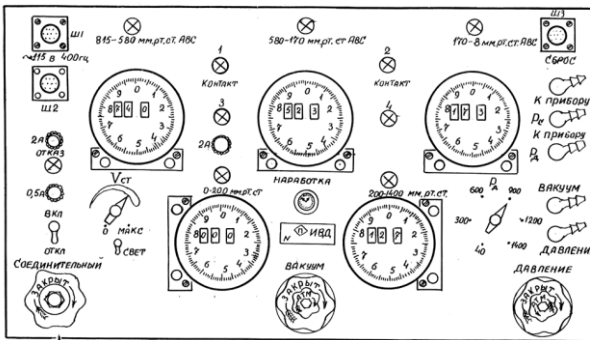


Рис. 1.8

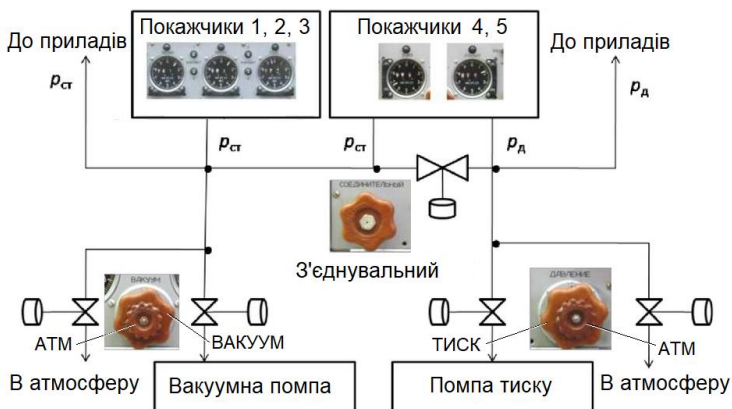


Рис. 1.9

УКАМП призначена для вимірювання статичного і надмірного (динамічного) тисків, які вводяться в випробовуваний прилад. Основними елементами УКАМП є три манометра абсолютного тиску, що розташовані у верхньому ряду і утворюють систему вимірювання статичного тиску, а також два диференційних манометра, що створюють систему вимірювання надмірного тиску (розташовані в нижньому ряду лицевой панели).

Висока точність вимірювання тисків досягається за рахунок зведення до мінімуму впливу моментів і сил тертя в механізмі приладу. Це досягається застосуванням синхронної системи стеження за положення рухомого центру чутливого елемента і розбиттям вимірюваних тисків на під-діапазони, кожен з яких контролюється своїм приладом.

Крім показчиків статичного і надмірного тисків, на лицевій стороні УКАМП розташовані:

- вимикач електроживлення установки;
- крани ДАВЛЕНИЕ, ВАКУУМ, СОЕДИНИТЕЛЬНЫЙ, АТМОСФЕРА (крани АТМОСФЕРА конструктивно поєднані з кранами ДАВЛЕНИЕ та ВАКУУМ);
- п'ять штуцерів ДАВЛЕНИЕ, ВАКУУМ, РД, Р, СБРОС;
- лампи підсвічування та сигналізації роботи показчиків;
- лампочки перевірки реле тисків (1, 2, 3, 4);
- перемикач запобіжного клапану P_d динамічної системи;

- регулятор Vст швидкості створення тиску або розрідження в системах, що перевіряються;
- лампочка ОТКАЗ і лічильник годин роботи установки.

Увага!! При роботі з апаратурою УКАМП необхідно виконувати такі вимоги:

- категорично забороняється подавати і скидати в УКАМП статичний і динамічний тиск при вимкненому живленні;
- категорично забороняється подавати в статистичну систему УКАМП тиск більш ніж 815 мм. рт. ст.;
- статичний і динамічний тиск в вимірювач необхідно подавати і скидати повільним обертанням ручок відповідних кранів.

Правила роботи з установкою УКАМП

Завдання значення статичного та динамічного тисків встановлюється повільним обертанням кранів ВАКУУМ, ДАВЛЕНИЕ і АТМОСФЕРА вимірювача УКАМП при відкритому крані СОЕДИНИТЕЛЬНЫЙ. Значення тиску, що задається, контролюється за показчиками абсолютного тиску УКАМП.

У роботі при проведенні досліджень датчика тиску ВМР180 необхідно буде змінювати абсолютний тиск. Зміна абсолютного тиску від тиску дня до 8 мм. рт. ст. здійснюється повільним відкриттям крана ВАКУУМ (велика ручка крану). Після встановлення необхідного тиску кран ВАКУУМ закрити. Для створення вакууму використовується вакуумна помпа. Вмикання та вимикання вакуумної помпи здійснюється вимикачем «Помпа», розташованим на вертикальній панелі лабораторної установки.

Для зміни показів показчиків від 8 мм. рт. ст. до тиску дня потрібно повільно відкривати кран АТМОСФЕРА крана ВАКУУМ (мала ручка крану). Після встановлення необхідного тиску кран АТМОСФЕРА необхідно закрити.

Розташований на вертикальній панелі лабораторної установки показчик висоти ВД-20 використовується як контрольний вимірник барометричної висоти.

1.2.2 Модуль Arduino

Arduino - це невелика плата з власним процесором і пам'яттю, що є електронним конструктором і зручною платформою для по-

будови простих систем автоматики і робототехніки. На платі є пара десятків контактів, до яких можна підключати всілякі зовнішні компоненти: лампочки, датчики, мотори тощо. У процесор Arduino можна завантажити програму, яка буде керувати всіма цими пристроями за заданим алгоритмом.

Програмна частина Arduino складається з безкоштовної програмної оболонки (IDE) для написання програм, їх компіляції та програмування апаратури.

Arduino може використовуватися як для створення автономних об'єктів автоматики, так і підключатися до програмного забезпечення на комп'ютері через стандартні дротові і бездротові інтерфейси.

У додатку до методичних вказівок детально описане середовище розробки Arduino.

1.3. Порядок виконання роботи

Підготовка до перевірки. Включити комп'ютер і перевірити під'єднання модуля BMP180, що знаходиться в барокамері до модуля Arduino Leonardo (рис. 1.10), а самого модуль Arduino Leonardo до комп'ютера за допомогою USB-кабелю.

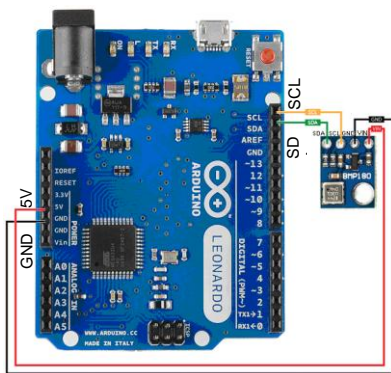


Рис. 1.10

При цьому підписані контакти шлейфу (GND, 5V, SDA, SCL), герметично вмонтованого в кришку барокамери, повинні бути підключені до відповідних PIN (штирок-контакт) Arduino. На модулі Arduino повинен світитися зелений світлодіод живлення, позначений PWR.

Запустіть середовище розробки Arduino. Двічі клацніть на ярлику програми для Arduino. Відкриється заготовка скетчу¹ «BMP185_LR» лабораторної роботи (рис. 1.11).

¹ Скетч – програма, що написана в середовищі Arduino.

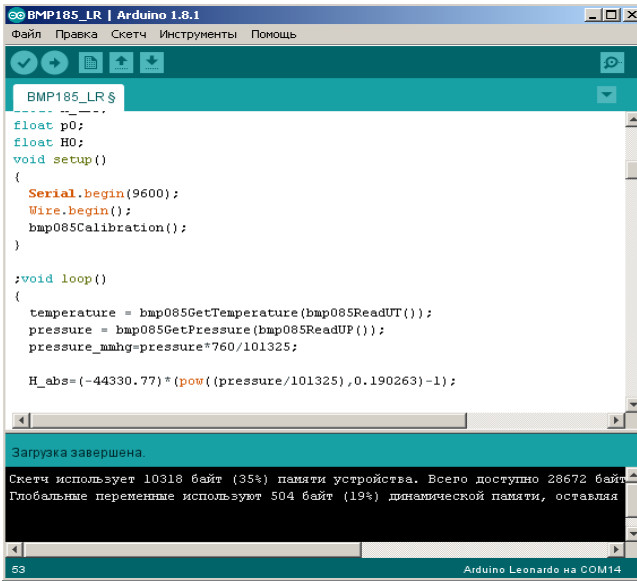


Рис.1.11

Ознайомитися у заготовці з програмою обчислення абсолютної висоти польоту.

$$H_{\text{абс}} = \frac{T_0}{\beta} \left[\left(\frac{P_{\text{ст}}}{P_0} \right)^{-\frac{\beta R}{g_0}} - 1 \right], \quad (1.1)$$

де $T_0 = 288,15$ К, $P_0 = 101325$ Па – стандартні значення температури та статичного тиску на рівні моря за СА-8I; $\beta = -6,5 \cdot 10^{-3}$ К/м – температурний градієнт, $R = 287,05287$ Дж/(кг·К) – питома стала повітря, $g_0 = 9,80665$ м/с² – відповідає прискоренню сили ваги на широті 45° 32' 33".

При написанні програми використані заздалегідь обчислені значення: $(T_0/\beta) = -44330,77$; $(-\beta \cdot R/g_0) = 0,190263$, тому в листингу програми формула (1.1) має вигляд:

$$H_{\text{абс}}=(-44330.77)*(pow((pressure/101325),0.190263)-1);$$

Повний лістинг програми лабораторної роботи приведений у додатку 1 до лабораторної роботи №1.

В програмі дослідження датчика BMP180 повинні бути встано-

влені такі параметри виведення інформації:

- закоментований блок виведення інформації про значення коефіцієнта B_6


```
/*Serial.print("koef B6= ");  
Serial.print( b6);  
Serial.println();  
Serial.println();*/
```

- закоментований блок виведення інформації про значення справжньої висоти, тиску та температури

```
/* Serial.print("Temperature= ");  
Serial.print(temperature * 0.1);  
.....  
Serial.print("Hist_izm= ");  
Serial.print(Hist_izm);  
Serial.println(" m"); */
```

- перед блоком виведення інформації про значення тиску, температури та справжньої висоти, повинний бути розкоментований рядок виведення інформації про абсолютну висоту польоту

```
Serial.println(H_abs).
```

Клацнувши кнопку  **Upload** панелі інструментів, скопіювати програму і "прошити" її в мікроконтролер Ардуїно.

Підготовка УКАМП. Перед початком роботи с УКАМП встановити всі органи управління УКАМП в початкове положення:

- крани ВАКУУМ, ДАВЛЕНИЕ, СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ, АТМОСФЕРА – закриті;

- вимикач ПИТАНИЕ – ОТКЛ.;

- перемикач - в крайнє праве положення;


- перемикач Рд - в положення 1200

1.3.1. Визначення похибок вимірників висоти.

Перед перевіркою необхідно визначити атмосферний тиск в лабораторії. Для чого відкрити кран «АТМ» і за показчиками УКАМП визначити атмосферний тиск у лабораторії.


Дані показчика УКАМП занести у таблицю 1.1 у стовпець «Тиск (мм. рт. ст.)». (див. додаток 2 до лабораторної роботи №1). Таблиця доступна в папці «ЛР ВМР», файл Microsoft Excel «ОТСЧЕТ_LR2». У таблиці за певними формулами занесений тиск перераховується в тиск (Па) і в $H_{абс}$ (дійсне) м – дійсне значення заданої абсолютної висоти.

Далі за допомогою кремальєри висотоміра ВД-10 встановити за барометричною шкалою тиск 760 мм рт. ст. При цьому стрілка ВД-10 покаже виміряну приладом абсолютну висоту в лабораторії, яку також слід занести у таблицю у стовпець « $H_{абс}$ (вим) – ВД-10».

Для зняття показань про вимірювану висоту МЕМС-датчиком тиску (модулем ВМР180) необхідно натиснувши на панелі інструментів Ардуіно кнопку  моніторингу послідовної шини, почати отримувати дані про абсолютну вимірювану висоту, що надходять від контролера Ардуіно на комп'ютер по послідовному інтерфейсу. Дані мають шумову складову $\pm 1...2$ м, тому необхідно, спостерігаючи за змінними значеннями висоти, обрати їх середнє значення. Середнє значення висоти занести у таблицю 1 у стовпець « $H_{абс}$ (вим) – ВМР180». Таблиця автоматично розрахує помилки кожного вимірника (ВМР і ВД-10). Похибки показів приладів визначаються як різниці між значеннями $H_{абс}$ (дійсне) і відповідними показами $H_{абс}$ (вим).

Закрити на УКАМП кран «АТМ».

Подальша перевірка висотомірів і визначення їх похибок проводиться на висотах до 3000 м, які відрізняються від абсолютної висоти в лабораторії на величини кратні 500 метрам (500, 1000, 1500, 2000...3000), контролюючи задавні висоти за шкалою ВД-10.

Для зміни висоти необхідно увімкнути вакуумну помпу і поступовим відкриттям і закриттям крана «Вакуум» по черзі задавати рекомендовані висоти, вносячи відповідні покази приладів, в таблицю 1. Пропоновані висоти задавати з великою точністю не обов'язково. Задавши чергову висоту, дочекатися поки не буде оголошено середнє значення показів ВМР180 (середнє значення показів ВМР180 визначається студентом-дослідником після натискання на панелі інструментів Ардуіно кнопку  моніторингу послідовної шини і спостереження у продовж певного часу за зашумленими значеннями абсолютної вимірюваної висоти) і тільки після цього фіксуються покази ВД-10 та дані показчика УКАМП про атмосферний тиск.

Дані про тиск заносяться в таблицю 1 в стовпець «Тиск (мм. рт. ст.)», а покази ВМР і ВД-10 – у стовпці « $H_{абс}$ (вим) – ВМР180» та « $H_{абс}$ (вим) – ВД-10». Похибки кожного вимірника (ВМР і ВД-10) розраховуються в таблиці 1 автоматично.

1.3.2. Дослідження впливу температурної компенсації.

Ручкою АТМОСФЕРА крану ВАКУУМ зрівняти тиск в статичній системі блоку УКАМП з атмосферним. Зафіксувати покази температури, тиску, висоти та значення коефіцієнта B6 (коефіцієнт температурної компенсації) датчика BMP180. Запам'ятати значення коефіцієнта B6.

Задати за шкалою ВД-10 висоту 1500 м. Знову зафіксувати покази температури, тиску, висоти та коефіцієнта B6.

Включивши фен спрямованим потоком гарячого повітря нагріти барокамеру з датчиком BMP180 до температури (40...50) °С. Зафіксувати покази температури, тиску, висоти та коефіцієнта B6. Упевнитися у роботі схеми термокомпенсування (середнє значення тиску та висоти практично не змінюються, при цьому значення B6 змінюється суттєво).

Ручкою АТМОСФЕРА крану ВАКУУМ зрівняти тиск в статичній системі блоку УКАМП з атмосферним. Зафіксувати покази температури, тиску, висоти і значення коефіцієнта B6 нагрітого датчика BMP180. Упевнитися у роботі схеми термокомпенсування.

Перепрограмувати датчик BMP180 на відсутність температурної компенсації, програмно встановивши значення коефіцієнта b6, яке було зафіксовано раніше при кімнатній температурі (формулу для розрахунку b6 «закоментувати»).

```
long x1, x2, x3, b3, b6, p;  
unsigned long b4, b7;  
//b6 = b5 - 4000;  
b6 = -370;  
Serial.print("koef B6= ");  
Serial.print( b6);  
Serial.println();
```

Знову задати за шкалою ВД-10 висоту 1500 м. Зафіксувати покази температури, тиску та висоти нагрітого датчика BMP180 з вимкненою схемою термокомпенсування. Упевнитися у наявності великих похибок вимірювання висоти.

Вимкнути джерело гарячого повітря, зрівняти тиск в статичній системі з атмосферним, скасувати внесені в програму датчика BMP180 зміни.

Оцінити помилки вимірювання висоти польоту і статичного тиску при наявності та відсутності термокомпенсування як різницю виміряних висот і тисків при кімнатній та підвищеній температурі.


1.3.3. Дослідження рівня шумів датчика BMP180.

В програмі дослідження датчика BMP180 «розкоментувати» формулу для розрахунку b_6 та «закоментувати» програмно встановлене значення коефіцієнта b_6 :


```
b6 = b5 - 4000;  
// b6 = -370;
```

Рядок виведення інформації про абсолютну висоту польоту `Serial.println(H_abs)` повинний бути розкоментований

Прискорити виведення інформації, змінивши після блоку виведення інформації значення `delay(500)`; на `delay(10)`;

Клацнувши кнопку  **Upload** панелі інструментів, скопіювати програму і "перезаши" її в мікроконтролер Ардуїно.

На комп'ютері запустити програму Microsoft Excel - програму для роботи з електронними таблицями, з метою фіксації результатів дослідження з подальшою їхньою візуалізацією.

Натиснувши на панелі інструментів Ардуїно кнопку  моніторингу, почати отримувати дані, що надходять від контролера Ардуїно на комп'ютер по послідовному інтерфейсу (у лівій нижній частині вікна моніторингу зняти галочку режиму "Автопрокрутка").

Через 3...4 сек виділити та скопіювати (`Ctrl_C`) покази H_{abs} з вікна моніторингу послідовної шини і вставити їх як стовпець в документ Microsoft Excel. Замінити в стовпці знак крапки на знак коми.

При оформленні звіту, використовуючи свої навички роботи з Microsoft Excel, побудувати за даними першого стовпця таблиці графік вимірюваних значень H_{abs} . (для побудови графіків використовувати об'єкт «Діаграма Microsoft Graph»).

На рис. 1.12 показаний приблизний вигляд такого графіку.



Рис. 1.12

Закрити вікно моніторингу послідовної шини.

Повторити попередній пункт дослідження рівня шумів датчика BMP180, але для даних про вимірюваний тиск, замінивши у строчці `Serial.println(H_abs)` «H_abs» на «pressure_mmhg».

Виділити та скопіювати покази «pressure_mmhg» з вікна моніторингу послідовної шини і вставити їх в другий стовпець документу Word. Не забудьте замінити в стовпці знак крапки на знак коми.

Виконати дослідження рівня шумів для даних про температуру. При виконанні цього пункту змінити у строчці після блоку виведення інформації значення `delay(10)` на `delay(1000)`, оскільки температура вимірюється тільки один раз в секунду. Відповідно очікувати накопичення даних у вікні моніторингу послідовної шини необхідно 2...3 хв.

Візуалізацію результатів дослідження можна також здійснювати з використанням програми побудови графіків математичних функцій Graph. Правила роботи з програмою наведені у додатку 2 до методичних вказівок.

Закрити вікно моніторингу послідовної шини. Скасувати усі зміни, які були внесені в програму дослідження датчика BMP180 для виконання цього пункту.

Зміст звіту

В результаті виконання лабораторної роботи кожен студент представляє акуратно оформлений звіт, який містить цифровий і графічний матеріал проведених досліджень. У звіті повинні бути висновки з кожного пункту роботи.

Додаток 1 до лабораторної роботи №1

Лістинг програми лабораторної роботи

```
#include <Wire.h> // Підключення бібліотеки Wire для роботи с Ардуіно
#include <Math.h> /* Підключення бібліотеки математики C++ (у даному
ескізі на наш погляд є зайвим) */
#define BMP085_ADDRESS 0x77 /* Вказується адреса датчика BMP085
пшини I2C Wire для роботи с Ардуіно */
const unsigned char OSS = 0; // Налаштування перенастроювання

/* Опис типу даних та коефіцієнтів калібрування */
int ac1; int ac2; int ac3;
unsigned int ac4;
unsigned int ac5;
unsigned int ac6;
int b1; int b2; int mb; int mc; int md;
/* b5 is calculated in bmp085GetTemperature(...), this variable is also used in
bmp085GetPressure(...)*
// so ...Temperature(...) must be called before ...Pressure(...).
long b5;
short temperature;
float pressure; float pressure_mmhg; float Hist; float Hist_izm; float H_abs;
float p0; float H0;
/* Функція setup(). Функція використовується для ініціалізації і установки
початкових значень змінних, визначення режимів роботи виводів, запуску
бібліотек, тощо.
Функція викликається тільки один раз, коли стартує скетч. */
void setup()
{
    Serial.begin(9600); // Задасмо швидкість передачі даних на комп'ютер
    Wire.begin(); /* Ініціалізує бібліотеку Wire, яка дозволяє Ардуіно
взаємодіяти з різними пристроями по інтерфейсу I2C */
    bmp085Calibration(); // Виклик функції калібрування
}
/* Функція loop () використовується для організації нескінченного циклу
дій, вимірювань і обчислень. */
void loop()
{
    temperature = bmp085GetTemperature(bmp085ReadUT());
    pressure = bmp085GetPressure(bmp085ReadUP());
    pressure_mmhg=pressure*760/101325;

    /* Обчислення абсолютної висоти польоту */
```

```

H_abs=(-44330.77)*(pow((pressure/101325),0.190263)-1);
        /* Виведенні інформації */
    Serial.print("Temperature= ");
    Serial.print(temperature * 0.1);
    Serial.println(" C");

    Serial.print("Pressure= ");
    Serial.print(pressure);
    Serial.println(" Pa");

    Serial.print("Pressure= ");
    Serial.print(pressure_mmhg);
    Serial.println(" mm. Hg.");

    Serial.print("Habs= ");
    Serial.print(H_abs);
    Serial.println(" m");

    //Serial.println(H_abs);
    delay(500);
}

        /* Функція калібрування bmp085 */
/* Функція обчислює калібрувальні коефіцієнти і зберігає їх як
глобальні змінні. Калібрувальні коефіцієнти необхідні для обчислення
температури й тиску. Ця функція викликається на початку програми */

void bmp085Calibration()
/* Зчитування коефіцієнтів */
{
    ac1 = bmp085ReadInt(0xAA);
    ac2 = bmp085ReadInt(0xAC);
    ac3 = bmp085ReadInt(0xAE);
    ac4 = bmp085ReadInt(0xB0);
    ac5 = bmp085ReadInt(0xB2);
    ac6 = bmp085ReadInt(0xB4);
    b1 = bmp085ReadInt(0xB6);
    b2 = bmp085ReadInt(0xB8);
    mb = bmp085ReadInt(0xBA);
    mc = bmp085ReadInt(0xBC);
    md = bmp085ReadInt(0xBE);
}

// Calculate temperature given ut.

```

```

// Value returned will be in units of 0.1 deg C
short bmp085GetTemperature(unsigned int ut)
{
    long x1, x2;
    x1 = (((long)ut - (long)ac6)*(long)ac5) >> 15;
    x2 = ((long)mc << 11)/(x1 + md);
    b5 = x1 + x2;
    return ((b5 + 8)>>4);
}

// Calculate pressure given up
// calibration values must be known
// b5 is also required so bmp085GetTemperature(...) must be called first.
// Value returned will be pressure in units of Pa.

long bmp085GetPressure(unsigned long up)
{
    long x1, x2, x3, b3, b6, p;
    unsigned long b4, b7;

    /* Місце зіпсування калібрування */
    b6 = b5 - 4000;
    // b6 = -370;
    /* Виведенні інформації про зіпсований коефіцієнт B6 */
    Serial.print("koef B6= ");
    Serial.print( b6);
    Serial.println();
    Serial.println();

    // Calculate B3
    x1 = (b2 * (b6 * b6)>>12)>>11;
    x2 = (ac2 * b6)>>11;
    x3 = x1 + x2;
    b3 = (((((long)ac1)*4 + x3)<<OSS) + 2)>>2;

    // Calculate B4
    x1 = (ac3 * b6)>>13;
    x2 = (b1 * ((b6 * b6)>>12))>>16;
    x3 = ((x1 + x2) + 2)>>2;
    b4 = (ac4 * (unsigned long)(x3 + 32768))>>15;

    b7 = ((unsigned long)(up - b3) * (50000>>OSS));
    if (b7 < 0x80000000)

```



```

    p = (b7<<1)/b4;
else
    p = (b7/b4)<<1;

x1 = (p>>8) * (p>>8);
x1 = (x1 * 3038)>>16;
x2 = (-7357 * p)>>16;
p += (x1 + x2 + 3791)>>4;

return p;
}

// Read 1 byte from the BMP085 at 'address'
char bmp085Read(unsigned char address)
{
    unsigned char data;

    Wire.beginTransmission(BMP085_ADDRESS);
    Wire.write(address);
    Wire.endTransmission();

    Wire.requestFrom(BMP085_ADDRESS, 1);
    while(!Wire.available())
        ;

    return Wire.read();
}

// Read 2 bytes from the BMP085
// First byte will be from 'address'
// Second byte will be from 'address'+1
int bmp085ReadInt(unsigned char address)
{
    unsigned char msb, lsb;

    Wire.beginTransmission(BMP085_ADDRESS);
    Wire.write(address);
    Wire.endTransmission();

    Wire.requestFrom(BMP085_ADDRESS, 2);
    while(Wire.available()<2);
    msb = Wire.read();
    lsb = Wire.read();
}

```

```

    return (int) msb<<8 | lsb;
}

// Read the uncompensated temperature value
unsigned int bmp085ReadUT()
{
    unsigned int ut;

    // Write 0x2E into Register 0xF4
    // This requests a temperature reading
    Wire.beginTransmission(BMP085_ADDRESS);
    Wire.write(0xF4);
    Wire.write(0x2E);
    Wire.endTransmission();

    // Wait at least 4.5ms
    delay(5);

    // Read two bytes from registers 0xF6 and 0xF7
    ut = bmp085ReadInt(0xF6);
    return ut;
}

// Read the uncompensated pressure value
unsigned long bmp085ReadUP()
{
    unsigned char msb, lsb, xlsb;
    unsigned long up = 0;

    // Write 0x34+(OSS<<6) into register 0xF4
    // Request a pressure reading w/ oversampling setting
    Wire.beginTransmission(BMP085_ADDRESS);
    Wire.write(0xF4);
    Wire.write(0x34 + (OSS<<6));
    Wire.endTransmission();

    // Wait for conversion, delay time dependent on OSS
    delay(2 + (3<<OSS));

    // Read register 0xF6 (MSB), 0xF7 (LSB), and 0xF8 (XLSB)
    Wire.beginTransmission(BMP085_ADDRESS);
    Wire.write(0xF6);

```

```

Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom(BMP085_ADDRESS, 3);

// Wait for data to become available
while(Wire.available() < 3);
msb = Wire.read();
lsb = Wire.read();
xlsb = Wire.read();

up = (((unsigned long) msb << 16) | ((unsigned long) lsb << 8) | (unsigned
long) xlsb) >> (8-OSS);
return up;
}

```

Додаток 2 до лабораторної роботи №1

Таблиця 1.1

Пропо- новані висоти (м)	Тиск (мм. рт. ст.)	Тиск (Па)	Набс (дійсна) (м)	Набс (вим) (м)		Похибка (м)	
				BMP180	ВД-10	BMP180	ВД-10
0	760,0	101325	0,0	-10,0	-10,0	-10,0	-10,0
500	715	95325,5	511,8	500,0	500,0	-11,8	-11,8
1000	674,1	89872,6	1000,2	1000,0	1002,0	-0,2	1,8
1500	633	84393,0	1515,7	1500,0	1530,0	-15,7	14,3
2000	600	79993,4	1949,7	1967,0	1980,0	17,3	30,3
2500	550	73327,3	2645,5	2610,0	2690,0	-35,5	44,5
3000	520	69327,6	3088,0	3070,0	3079,0	-18,0	-9,0
3500	490	65327,9	3551,7	3500,0	3600,0	-51,7	48,3
4000	470	62661,5	3873,7	3900,0	3910,0	26,3	36,3
4500	435	57995,2	4465,0	4500,0	4495,0	35,0	30,0

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО МАГНІТОМЕТРА

Мета роботи

У лабораторній роботі досліджується технічні характеристики магнітометра НМС5883L у якості цифрового компаса, здійснюється його калібрування, оцінюються фактори, що погіршують вимірювання магнітного поля Землі, а також визначаються статичні характеристики цифрового компаса.

Методичні вказівки

Повторити такі теоретичні питання дисципліни:

- Датчики Холла.
- Магніторезистивні датчики.
- Цифрові МЕМС-компаси.

Завдання на виконання лабораторної роботи

1. Провести калібрування магнітометра НМС5883L.
2. Зняти статичні характеристики магнітометра.
3. Дослідити вплив горизонтальності МЕМС- компаса на його точності характеристики
4. Дослідити спотворення магнітного поля та відповідних показів МЕМС- компаса під впливом твердого² та м'якого³ заліза.

2.1. Скорочені теоретичні питання

2.1.1. Датчики магнітного поля

Принцип дії датчиків магнітного поля заснований на фізичних ефектах, які виникають в матеріалах, що знаходяться в магнітному полі при русі в них заряджених частинок. Практичне застосування в датчиках магнітного поля в основному знайшли ефект Холла і магніторезистивний ефект. Обидва ефекти обумовлені зміною траєкторії руху заряджених частинок в магнітному полі.

² Залізо, яке зберігає магнетизм після припинення дії магнітної сили.

³ Залізо, яке залишається намагніченим тільки до тих пір, поки на нього діє магнітна сила.

Датчики Холла

На основі ефекту Холла працюють датчики, які виявляють магнітне поле і видають електричну напругу, пропорційну його інтенсивності.

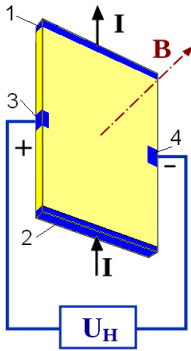


Рис. 2.1

Датчики класифікуються залежно від сфери застосування на автомобільні, індустріальні та загального застосування і, в залежності від призначення, розрізняються за конструктивними, електричними характеристиками і робочому діапазону температур. Однак, незважаючи на відмінності, всі прилади мають схоже функціонально закінчене ядро. Це елемент Холла і схема обробки сигналу

На рис. 2.1 показано схематичне представлення елемента Холла. Смугова пластина з певного матеріалу⁴, заданої геометрії через контакти 1 і 2 проводить струм I у поздовжньому напрямку і піддається впливу магнітного поля B , що діє перпендикулярно пластині. Виникає різниця потенціалів, що виникає при цьому на краях пластинки в поперечному напрямку (під впливом магнітного поля викривляється траєкторія руху носіїв струму, і вони зміщуються до краю пластини), і яка отримала назву напруга Холла U_H знімається з контактів 3, 4. Напруга Холла, пропорційно добутку індукції магнітного поля B і струму I , а також залежить від типу матеріалу пластини, її геометрії (ефективної площі активної зони) і температури.

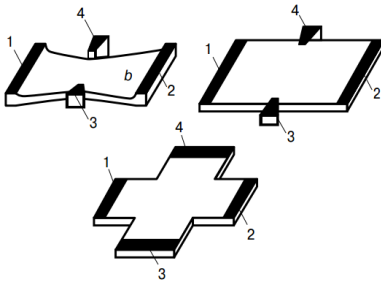


Рис. 2.2

Ефективна площа датчика Холла обмежується кінцями електродів. За рахунок зміни розмірів і геометрії датчики можуть бути оптимізовані для виконання різних функцій. Три найпоширеніші форми пластин датчиків Холла зображено на рис. 2.2. Хрестоподі-

⁴ При виготовленні елементів Холла найчастіше використовуються: InSb – антимонід індію, GaAs – арсенід галію і InAs – арсенід індію.

бний симетричний датчик і датчик з геометрією метелика мають високу чутливість до магнітних полів, а прямокутний датчик – підвищену напругу Холла.

Умовно всі датчики Холла можна розділити на дві групи: з лінійним і логічним виходом.

Датчики з лінійним виходом зазвичай застосовуються для визначення невеликих переміщень і побудови більш складних датчиків.

Лінійні датчики магнітного поля на ефекті Холла складаються з напівпровідникового елемента Холла, стабілізатора живлення, диференціального підсилювача і вихідного каскаду (рис. 2.3, а). дна напруга цих датчиків знаходиться в лінійній залежності (рис. 2.3, б) від величини магнітного поля, яке в робочій області може бути як позитивним, так і від'ємним.

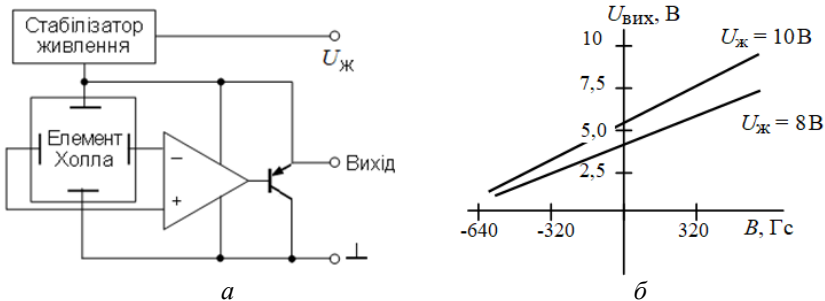


Рис. 2.3

Датчик Холла SS495A як один з представників лінійних датчиків магнітного поля, показано на рис. 2.4. Цей датчик виконаний в мініатюрному корпусі ТО-92 з трьома виводами. Висока температурна стабільність приладу забезпечується вбудованою схемою температурної компенсації, елементи якої проходять лазерну підгонку в процесі виробництва.

Датчики Холла з логічним виходом ються для визначення наявності будь-якого феромагнітного об'єкту в поле "зору" датчика. На відміну від лінійних датчиків магнітного поля вихід цих приладів, залежно від величини прикладеного магнітного поля, набуває лише двох станів: високий рівень або низький.



Рис. 2.4

Для побудови сенсорних систем визначення положення, відстані, кута повороту, вібрації, переміщення на базі вище розглянутих датчиків - як лінійних, так і з логічним виходом - необхідне джерело зовнішнього магнітного поля. Зазвичай для цього використовують постійні магніти, які закріплюються на контрольованих



Рис. 2.5

об'єктах. Так, компанія *Honeywell* з метою логічного завершення лінійки сенсорів Холла випускає кілька типів постійних магнітів у різному конструктивному виконанні (рис. 2.5). Точні габарити, діапазон робочих температур, залежність величини магнітного

поля від відстані та рекомендації щодо застосування докладно відображені в технічній документації на вироби.

Конкурентами датчиків Холла є магніторезистивні датчики, які відрізняються максимально високою чутливістю, в той час як датчики Холла володіють більш лінійною вихідною характеристикою.

Магніторезистивні датчики

Магніторезистивний ефект (магнетоопір) виявляється в зміні електричного опору матеріалу в магнітному полі. У найпростіших уявленнях причиною магніторезистивного ефекту є викривлення траєкторій і спін-залежне розсіювання носіїв струму в магнітному полі, що спричиняє до зміну величини провідності матеріалу.

Натепер для побудови датчиків магнітного поля найчастіше застосовують анізотропний магніторезистивний ефект (АМР). АМР найкраще проявляється при виготовленні чутливого елемента датчика у вигляді тонкої смужки з геометричними розмірами, які задовольняють умови:

$$d < b \ll L,$$

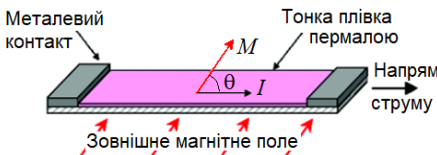


Рис. 2.6

де d – висота; b – ширина; L – довжина смужки.

Принцип дії датчиків на основі АМР (рис. 2.6) полягає в здатності довгої пермалоевої (NiFe) плівки змінювати свій опір залежно

від взаємної орієнтації струму I , що протікає через плівку, і напрямку її вектора намагніченості M . Зовнішнє магнітне поле повертає вектор намагніченості плівки M на кут θ . Величина θ залежить від напрямку і величини цього поля. При цьому змінюється електроопір плівки $R = R_0 + \Delta R \cdot \cos(2\theta)$.

Для побудови датчика чотири ідентичних магніторезистивні плівки з'єднуються за мостовою схемою і утворюють плечі моста (рис. 2.7). Плівки формуються осадженням тонкого шару пермаллоя на кремнієву пластину.

У вихідному стані, відразу після виготовлення або в результаті впливу руйнівного магнітного поля величиною понад 15 ... 20 Гс, магнітну структуру плівок моста не визначено. Це пояснюється хаотичною орієнтацією і взаємною компенсацією магнітних доменів, які її утворюють (рис. 2.8, а).

Такий стан датчика не придатний для вимірювання через його нульову чутливість. Для примусового формування осі вектора намагнічування (так званої легкої осі) мостового магніторезистивного датчика використовується спеціальну вбудовану плоску котушку SET/RESET (установлення /скидання) (рис. 2.7, 2.9). Подача короткого установлювального імпульсу струму 2 ... 5 А тривалістю 1 ... 2 мкс через цю котушку формує сильне магнітне поле, яке орієнтує магнітні домени всіх плівок сенсора в одному напрямку (рис. 2.8, б), визначаючи тим самим напрямок вектора намагнічування. Ця процедура повертає прилад в режим максимальної чутливості і відновлює усі його характеристики, які зберігаються до чергового потрапляння сенсора в сильне магнітне поле. Напрямок легкої осі завжди вказується в технічній документації на прилад (рис. 2.10).

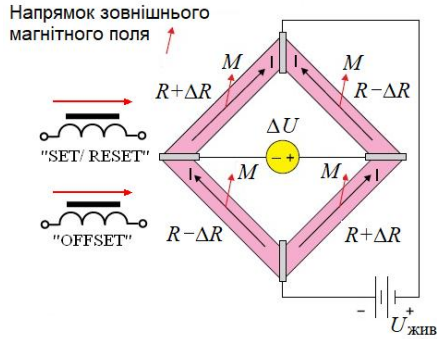


Рис. 2.7



Рис. 2.8

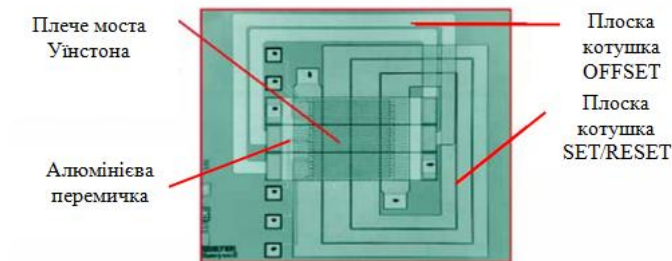


Рис. 2.9

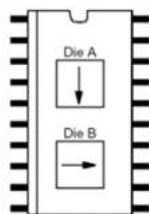


Рис. 2.10

Друга котушка OFFSET (рис. 2.7, 2.9) призначена для компенсації впливу паразитних магнітних полів, створених, наприклад, будь-яким феромагнітним об'єктом або металевими предметами.

Під час вимірювання на міст подається напруга, і через магніторезистори починає протікати струм. Під час впливу на вимірювальний міст зовнішнього магнітного поля H , вектор намагніченості починає обертатися або змінювати кут. При цьому в двох протилежно розташованих резисторах моста вектор намагніченості зміщується у напрямку струму, що викликає збільшення їх опору (див. рис. 2.7). В останніх двох протилежно розташованих резисторах моста вектор намагніченості зміщується проти напрямку струму, у результаті опір їх зменшується. Таким чином, вихідна напруга моста змінюється залежно від напруженості прикладеного магнітного поля..

На практиці, для збільшення чутливості датчика кожне плече моста формують з декількох магніторезистивних плівок, паралельно орієнтованих на підкладці, послідовно з'єднаних між собою за допомогою алюмінієвих перемичок і захищених зверху шаром нітриду танталу (див. рис. 2.9).

АМР-датчики можуть використовуватися там, де використовуються датчики Холла. Однак більшість АМР-датчиків призначені для роботи у лінійному режимі. На основі одновісних датчиків розробляють сучасні безконтактні МЕМС-датчики вимірювання різних параметрів об'єктів: датчики наближення; датчики швидкості та частоти обертання; вимірники кутів повороту; вимірники струму; вимірники повітряних зазорів тощо, а дво- і тривісні сенсори здебільшого використовують для побудови МЕМС-датчиків курсу за магнітним полем Землі (електронних компасів).

2.1.2. Електроні компаси

Магнітне поле Землі (МПЗ) може бути апроксимувати дипольної моделлю, зображеною на рис. 2.11, магнітна вісь якої становить кут близько $11,5^\circ$ з віссю обертання Землі. Лінії магнітного поля орієнтовані практично вертикально в центрах північної та південної півкуль, і горизонтальні на екваторі. Причому у всіх випадках вони вказують на Північний магнітний полюс.

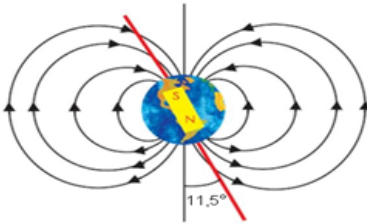


Рис. 2.11

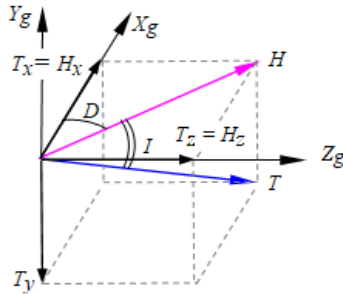


Рис. 2.12

Магнітне поле Землі характеризується напруженістю T , тобто величиною і напрямком сили, що діє в даній точці на одиничну масу. У навколосемному просторі значення T змінюються залежно від координат місцеположення від $5 \cdot 10^{-5}$ Тл на широті 50° до $3,1 \cdot 10^{-5}$ на екваторі.

Напрямок вектора напруженості МПЗ визначається трьома складовими по осях X_g , Y_g і Z_g у прямокутній системі координат (рис. 2.12), пов'язаній із Землею. Також магнітне поле Землі можна описати горизонтальною складовою напруженості H , магнітним схиленням D (кутом між H і площиною географічного меридіана) і магнітним нахилом I (кутом між T і площиною горизонту). Напрямок горизонтальної складової напруженості МПЗ H називають напрямком магнітного меридіана. Саме горизонтальні компоненти МПЗ використовуються в навігації для визначення курсу.

В існуючих бортових системах навігації для вимірювання магнітного курсу, як правило, використовують індукційні компаси на основі ферозондів. Однак таким датчикам притаманні порівняно значні масогабаритні параметри, а також наявність карданних, кренових і віражних помилок через особливості поплавкового підвісу чутливого елемента в корпусі з рідиною для утримання його в горизонті.

Для побудови електронних компасів на основі ефекту Холла або магніторезистивного ефекту розроблено компасні набори, засновані на сукупності високочутливих датчиків магнітного поля і МЕМС-акселерометрів (визначення горизонтальності об'єкта), якими керує мікропроцесорна система.

У найпростішому випадку, коли магнітометр розташовується паралельно поверхні землі без нахилу відносно осей Z_g і X_g для обчислення магнітного курсу ψ_m використовують дві (за віссю X та за віссю Z) складові вектора МПЗ, що вимірюються магнітометром у системі координат пов'язаної з об'єктом – $(H_x = T_x)$ та $(H_z = T_z)$, а потім обчислюють курс за найпростішою тригонометричною формулою:

$$\psi_m = \arctg \frac{H_z}{H_x}$$

Але якщо магнітометр розташовується під певним кутом до поверхні землі, то у формулі (10.1) необхідно враховувати нахил магнітометра за креном і тангажем. Для цих цілей до складу компасного набору входить МЕМС-акселерометр. Використовуючи тривісний акселерометр як інклінометр, вимірюють кути крену γ і тангажа ϑ об'єкта. Перераховуючи показання тривісного магнітометра із системи координат пов'язаної з об'єктом в земну систему координат, обчислюють магнітний курс за формулою:

$$\psi_m = \arctg \frac{H_{zg}}{H_{xg}} = \frac{T_z \cos \gamma + T_y \sin \gamma}{T_x \cos \vartheta - T_y \cos \gamma \sin \vartheta + T_z \sin \gamma \sin \vartheta} \quad (2.1)$$

За відомого значення магнітного схилення можна також визначити справжній географічний курс об'єкта.

Одним з лідерів на ринку датчиків магнітного поля, лінійку яких складають МЕМС-компаси та датчики для споживчої електроніки, є японська компанія *Asahi Kasei Microsystems (AKM)*.

Яскравим представником продукції фірми *AKM* є *AK8973S* – бренд датчиків магнітного поля, самий малогабаритний тривісний МЕМС-компас. Завдяки застосуванню монтажу *SoC*, розміри мікросхеми доведені до $2,5 \times 2,5 \times 0,5$ мм. Електронний компас є монолітним кремнієвим датчиком магнітного поля на основі трьох взаємно перпендикулярних (рис. 2.13, *a*) датчиків Холла з круговим феритовим концентратором, який фокусує силові лінії МПЗ в область розташування датчиків Холла, збільшуючи їхню магнітну

чутливість в 2...6 разів.. Електронні схеми підсилювача і логічних схем формуються на тому самому кристалі. Під концентратором (рис. 2.13, б) по периферії розміщено вісім спарених тонкоплівкових елементів Холла, які формують датчик Холла (чотири комірки хрестоподібної форми з фазовим зсувом в 90°), виготовлених із застосуванням МВЕ-технології⁵.

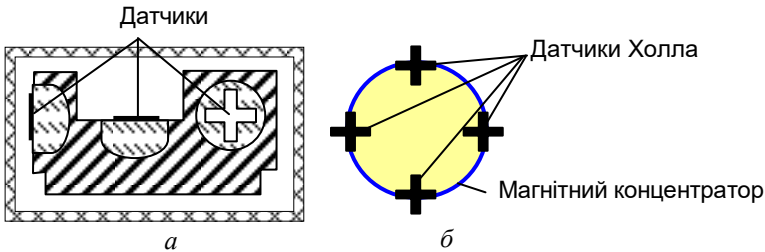


Рис. 2.13

Альтернативою цифровим компасам *Asahi Kasei* є компасні набори *Honeywell* та цифрові компаси *STMicroelectronics*, що побудовані на основі дво- і тривісних магніторезистивних датчиків магнітного поля, а також МЕМС-акселерометрів для компенсації нахилу. Після калібрування електронні компаси на магніторезисторних датчиках можуть досягати точності, що перевищує один градус.

Датчики *Honeywell* та *STMicroelectronics* за принципом своєї дії, методу зв'язку з керувальним пристроєм і навіть за структурою регістрів не сильно відрізняються один від одного. Так, наприклад, HMC5883L (рис. 2.14) за своїми характеристиками дуже схожий на магнітометр у складі інерціальної системи LSM303 компанії *STMicroelectronics*.



Рис. 2.14

Характеристики магнітометра HMC5883L

- Діапазон, Гс от -8 до +8
- Точність, мГс 230
- Чутливість: Мін., LSB/Гс 5

⁵ МВЕ-технологія забезпечує епітаксії (нарощування) тонких плівок напівпровідникових з'єднань у надвисокому вакуумі на поверхні підкладки.

• Чутливість: Макс., LSB/Гц	1370
• Роздільна здатність: Мін., мГц	0.73
• Роздільна здатність: Макс., мГц	4.35
• Нелінійність, %	0.1
• Напруга живлення, В	от 2.16 до 3.6
• Струм споживання, мА	0.1
• T_A , °С	от -30 до +85
• Вага, г	2

HMC5883L, від компанії Honeywell, являє собою багатокристалний модуль для поверхневого монтажу, розроблений для вимірювання слабковираженого електромагнітного поля. HMC5883L виконаний на основі новітнього магніторезистивного датчика серії HMC118X з високою роздільною здатністю і спеціалізованої інтегральної схеми, яка включає підсилювальний каскад, ланцюг автоматичного розмагнічування, схему компенсації і 12-бітний АЦП, що забезпечує роботу компаса з точність $1^\circ \dots 2^\circ$. Цифровий послідовний інтерфейс I2C дозволяє з легкістю підключити модуль до будь-якого зовнішнього мікроконтролера. HMC5883L доступний в компактному 16-вивідному корпусі LCC, розміром $3.0 \times 3.0 \times 0.9$ мм. Цільовий областю застосування компаса є мобільні телефони, планшетні комп'ютери, ноутбуки, інерційні і супутникові системи навігації, персональні навігаційні пристрої.

Магнітометр складається з двох частин – чутливого елемента і електронного вимірювального блока. Для виготовлення чутливих елементів таких магнітометрів використовують AMR-технологію (осадження тонкого шару пермалою на кремнієву пластину). Нелінійна характеристика сенсорного елемента виправляється алгоритмами вбудованої цифрової частини магнітометра, тобто без перекриття пермалоєвої плівки низькоомними срібними смужками.

Структурну схему магнітометра виробництва *STM* показано на рис. 2.15. Основу схеми складає трикомпонентний пристрій вимірювання магнітного поля Землі. Дані, що містять інформацію про поточний азимут, надходять на ASIC пристрою перетворення. За рахунок високої чутливості АМР-сенсорів магнітного поля може спостерігатися ефект залишкової намагніченості магнітометра.

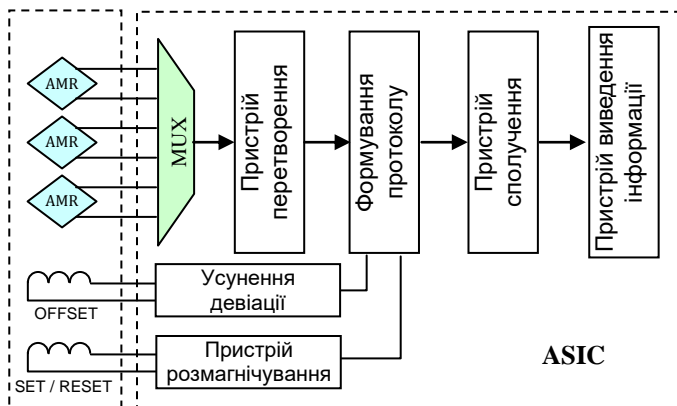


Рис. 2.15

Для запобігання спотворенням показань магнітометра залишкова намагніченість знімається пристроєм розмагнічування, який подає імпульс розмагнічування через котушку SET/RESET. При цьому котушка SET/RESET виконує не тільки функцію примусового формування осі вектора намагнічування, а також інвертує передавальну характеристику датчика шляхом її дзеркального відображення відносно двох зсувів, тобто змінює напрямок осі вектора намагнічування на протилежний.

Інвертування необхідно для реалізації двоступеневої методики вимірювання величини магнітного поля, яка усуває вплив температурного дрейфу елементів АМР-моста та схеми оброблення сигналу, а також похибок, що викликані нелінійністю та міжосьовим ефектом, а також запобігає втраті слабого сигналу на фоні сильних паразитних полів.

Кожен цикл вимірювання складається з такої послідовності:

- генерація імпульсу Set убудованими котушками розмагнічування та запам'ятовування вихідної напруги моста U_{set} ;
- генерація імпульсу Reset та запам'ятовування результату (U_{reset});
- обчислення вихідного значення $U_{вих} = (U_{set} - U_{reset})/2$, що виключає початковий зсув і температурні ефекти як самого АМР-моста, так й зовнішньої схеми оброблення сигналу;
- переміщення обчисленого значення у вихідний регістр.

Після перетворення по каналу даних цифровий сигнал надходить на пристрій формування протоколу, конструктивно виконаний

на базі мікроконтролера. Формувач протоколу є пристроєм, який виконує функцію узгодження та формування даних для подальшого оброблення інформації.

Зчитування інформації відбувається в момент надходження сигналу дозволу на формувач протоколу, комутований пристроєм перетворення в той момент часу, коли пристрій перетворення готовий до видачі інформації.

Інформація про поточний курс, що закодована в біти даних, далі надходить на пристрій сполучення. У пристрої сполучення сигнал перетворюється в послідовний код, який і видається на пристрій виведення інформації.

Після зчитування даних з вихідних регістрів трьох осей магнітометра розраховується арктангенс магнітного курсу з урахуванням показів акселерометра відповідно до формули (2.1).

У разі застосування магнітометрів на об'єктах, де наявні додаткові магнітні поля, наприклад на літаку, на датчик діють завади, які спотворюють його показання – з'являється магнітна девіація (похибка показань магнітного компаса).

Спотворення від магнітних матеріалів «залізо, нікель, сталь, кобальт і т. ін.», які створюють додаткові магнітні поля можна уявити як суму магнітного поля Землі та магнітного поля транспортного засобу. У цьому випадку для визначення магнітного поля Землі необхідно заздалегідь скомпенсувати додаткове магнітне поле транспортного засобу.

Магнітне поле транспортного засобу спотворює розподіл магнітного поля у місті розташування магнітометра, перетворюючи його з кола в еліпс і зміщуючи його центр (рис. 2.16, а).

Для компенсації додаткового магнітного поля транспортного засобу (для усунення девіації) використовується котушка OFFSET (див. рис. 2.15). Котушка OFFSET розміщена поруч з АМР-мостом і має визначену геометрію. Котушка здатна згенерувати магнітне поле в тому ж напрямку, що і додаткове поле. Для цього необхідно пропустити через неї струм певної величини і полярності. Магнітне поле транспортного засобу і поле, що формується котушкою OFFSET, додаються один до одного з урахуванням знака і сприймаються мостом АМР-сенсора як єдине ціле.

Для внесення компенсації у виміряні значення горизонтальних складових магнітного поля Землі $X_{\text{вим}}$, $Y_{\text{вим}}$ необхідно визначити два коефіцієнти масштабування X_M і Y_M , що перетворюють еліпс у коло, і дві коригувальні величини $X_{\text{кор}}$ і $Y_{\text{кор}}$, які повертають центр окружності в точку початку координат (рис. 2.16, б).

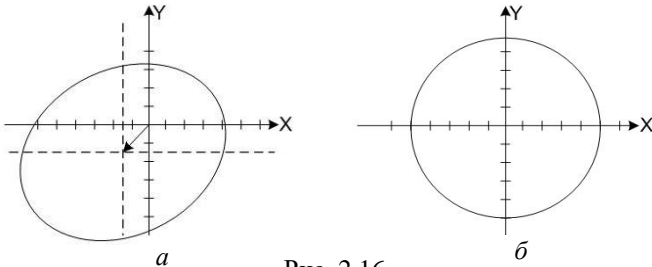


Рис. 2.16

Найпростіший метод калібрування полягає в такому:

– рухомий об'єкт зі встановленим на ньому компасом повертається на 360° у горизонтальній площині;

– визначаються максимальні X_{max} , Y_{max} і мінімальні X_{min} , Y_{min} показання компасу за осями X і Y ;

– за допомогою чотирьох таких виразів визначаються коефіцієнти X_M , Y_M і $X_{\text{кор}}$, $Y_{\text{кор}}$:

$$\begin{aligned} X_M &= \max \left[1, \frac{Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \right]; & Y_M &= \max \left[1, \frac{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}{Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}} \right]; \\ X_{\text{кор}} &= - \left[\frac{X_{\text{max}} + X_{\text{min}}}{2} \right] X_M; & Y_{\text{кор}} &= - \left[\frac{Y_{\text{max}} + Y_{\text{min}}}{2} \right] Y_M. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Знайдені коригувальні величини використовують для розрахунку справжніх значень горизонтальних складових магнітного поля Землі:

$$X = X_M X_{\text{изм}} + X_{\text{кор}}; \quad Y = Y_M Y_{\text{изм}} + Y_{\text{кор}},$$

або для формування коригувального магнітного поля котушок OFFSET.

Існують і інші принципи вимірювання магнітного поля, наприклад, на основі магнітного резонансу, з використанням індукційних датчиків магнітного поля, датчиків на основі ефекту Виганда тощо. Але ці принципи вимірювання поки не знайшли свого застосування в MEMS- магнітометрах.

2.2. Опис лабораторної установки

До складу лабораторної установки входять (см. рис 2.17):

- поворотний стіл з кронштейном и з закріпленням на ньому магнітометрі НМС5883L;
- приєднаний до плати магнітометра НМС5883L модуль Arduino, який у свою чергу з'єднаний з комп'ютером;
- зразки твердого та м'якого заліза.

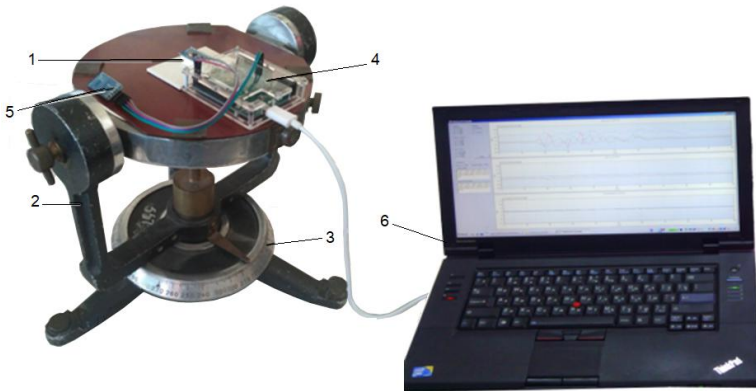


Рис. 2.17

Магнітометр *1* встановлений на кронштейні *2*, який дозволяє розгорнути магнітометр на необхідні кути крену і тангажа, а сам кронштейн змонтований на поворотному столі *3*, який у свою чергу дозволяє задавати курсову орієнтацію магнітометра. Кути повороту столу контролюються за шкалою точного відліку з ціною поділу $0,2^\circ$. На поворотному столі також розміщується модуль Arduino Leonardo *4*, приєднаний шлейфом до плати магнітометра, а також до комп'ютера *6*. Обмін інформацією між модулем Arduino і комп'ютером може забезпечуватися і через бездротову персональну мережу Bluetooth на основі модуля HC-06 (див. *5* на рис. 2.17).

Апаратна частина Arduino (*4* на рис. 2.17) являє собою мікроконтролер, змонтований на друкованій платі, який використовується в якості платформи для розробки електронних пристроїв. Більшість плат Arduino забезпечені мінімально необхідним набором обв'язки для нормальної роботи мікроконтролера (стабілізатор живлення, кварцовий резонатор, ланцюжки скидання і т. п.). Мікроконтролери для Arduino відрізняються наявністю попередньо прошитого в них завантажувача. За допомогою цього завантажувача користувач за-

вантажує розроблювану програму в мікроконтролер без використання традиційних окремих апаратних програматорів. Завантажувач з'єднується з комп'ютером через інтерфейс USB.

Існує кілька версій платформ Arduino. Остання версія Leonardo базується на мікроконтролері ATmega32u4. Версія Uno, як і попередня версія Duemilanove побудована на мікроконтролері Atmel ATmega328.

Програмування ведеться через власну програмну оболонку (IDE). У цій оболонці є текстовий редактор, менеджер проектів, препроцесор компілятор і інструменти для завантаження програми в мікроконтролер. Оболонка написана на Java на основі проекту Processing, працює під Windows, Mac OS X і Linux.

Мова програмування пристроїв Ардуіно заснована на C++, яка проста в освоєнні, і тому на даний момент Arduino - це, мабуть, найзручніший спосіб програмування пристроїв на мікроконтролерах.

У додатку до методичних вказівок детально описане середовище розробки Arduino.

2.3. Порядок і методика виконання лабораторної роботи

Підготовка до перевірки. Включити комп'ютер і запустити середовище розробки Arduino (файл «sketch_LR_magnitometr2»). Подивитися у програмі до якого PIN Arduino повинні бути підключені контакту плати магнітометра

(GND-GND, VCC-3.3V,
SDA-2, SCL-3)

і перевірити їх дійсне під'єднання до магнітометра HMC5883L, який встановлений на кронштейні поворотного стола, до модуля Arduino.

При цьому уважно подивитися (рис. 2.18) через які контакти шлейфу, проходять: лінія живлення (VIN), лінія зазем-

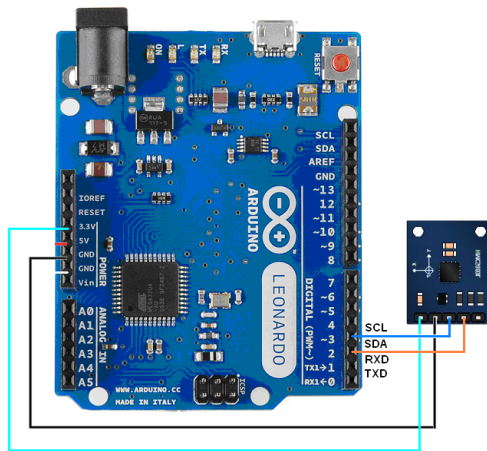


Рис. 2.18

лення (GND), лінії (SDA) та (SCL). На модулі Arduino повинен світитися зелений світлодіод живлення, позначений PWR.

Увага: Модуль не рекомендується підключати безпосередньо до підключеної до електроживлення платі мікроконтролера, необхідно відключити електроживлення в момент підключення модуля, першим повинен бути підключений вивід GND модуля, в іншому випадку, це може вплинути на нормальну роботу модуля.

Ознайомитися з лістингом «`sketch_LR_magnitometr2`», який наведено у додатку до лабораторної роботи №2.

2.3.1. Калібрування магнітометра HMC5883L

В програмі «`sketch_LR_magnitometr2`» «закоментувати» строку виводу інформації про значення курсу:

```
//Serial.println(kurs);
```

та строку розрахунку горизонтальної складової магнітного поля по осі Y , що враховує нахил магнітометра відносно горизонту:

```
//y_kal=(y_m*(double)y+y_kop)*cos(tet)-((double)z)*sin(tet);
```

Встановити


```
x_m = 1; y_m = 1; x_kop = 0; y_kop = 0.
```

«Розкоментувати» строку виведення інформації про величину складових магнітного поля по осях X та Y :

```
Serial.print(x); Serial.print(" | "); Serial.println(y);
```

Клацнувши кнопку **Upload** панелі інструментів, скопіювати програму і "прошити" її в мікроконтролер Ардуіно.

Для візуалізації результатів роботи програми в роботі використовується програма побудови графіків математичних функцій Graph. Програма дозволяє не тільки будувати графіки різних функцій, але і задавати ряди чисел (точок), по якій автоматично будується графік. Саме ця можливість програми використовується в лабораторних роботах для фіксації результатів дослідження з подальшою їхньою візуалізацією.

Натиснувши на панелі інструментів Ардуіно кнопку  моніторингу послідовної шини, почати отримувати дані про розподіл магнітного поля по осях X та Y в районі поворотного столу, що надходять від контролера Ардуіно на комп'ютер. Плавно зробити повний оберт поворотного столу на кут $\pm 360^\circ$.

У програмі примусовим завданням з клавіатури (клавіша «1») за формулою (2.2) здійснюється автоматизований розрахунок калібрувальних коефіцієнтів, який слід починати після повного оберт

поворотного столу з закріпленим на ньому магнітометрі НМС5883L. У процесі обертання програмно визначаються максимальні та мінімальні значення показів магнітометра за осями X та Y

```
if (x < x_min) x_min = x;  
if (x > x_max) x_max = x;  
if (y < y_min) y_min = y;  
if (y > y_max) y_max = y;
```

які слугують вхідною інформацією для виконання розрахунків.

Здійснивши оберт поворотного столу натиснути на клавіатурі комп'ютера клавішу «1», а потім у вікні монітора (верхній правий кут) клацнути кнопку «Отправить». Впевнитися, що програма розрахувала калібрувальні коефіцієнти (значення калібрувальних коефіцієнтів з'являються у вікні моніторингу).

Після чого зняти галочку режиму “Автопрокрутка” у лівій нижній частині вікна моніторингу. Клацнувши мишкою у вікні виділити (Ctrl_A) та скопіювати (Ctrl_C) усі покази «x» | «y» з вікна моніторингу послідовної шини і вставити їх у попередньо відкритий документ Microsoft Word.

Використовуючи свої навички роботи з Microsoft Word перетворити отримані данні у таблицю зі двома стовпцями. Значення калібрувальних коефіцієнтів включати у таблицю непотрібно.

Для візуалізації даних магнітометра відкрити програму побудови графіків математичних функцій Graph. Відкриється вікно інтерфейсу програми (рис. 2.19).

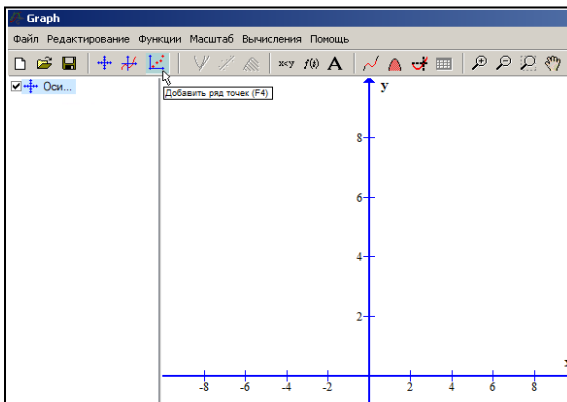


Рис. 2.19

У вікні інтерфейсу клацнути кнопку «Добавить ряд точек»,

внаслідок чого відкривається вікно налаштувань двовірного графіка (рис. 2.20). Для побудови графіка необхідно скопіювати стовпці

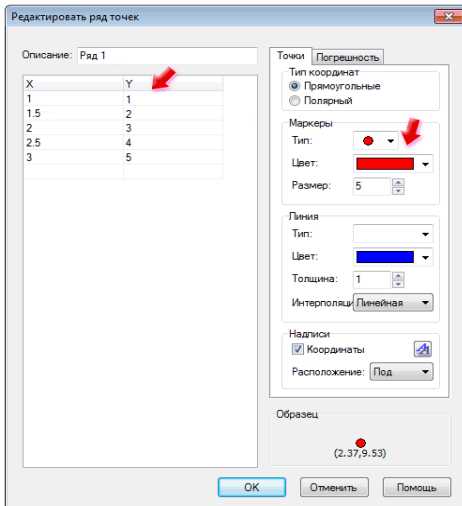


Рис. 2.20

таблиці документа Microsoft Word і вставити їх в стовпці X та Y вікна налаштувань. Тут же вибираємо тип координат, зокрема прямокутні; тип, колір і розмір маркерів (є круглі, квадратні, трикутні тощо). Точки можна з'єднати лінією, у налаштуваннях задається її тип, колір, товщина і інтерполяція (лінійна, одновимірний кубічний сплайн, полукосінус). Крім того, біля кожної точки можна відобразити її координати, їх розташування вибирається в списку, що випадає. Можна також змінити назву графіка - «Ряд 1».

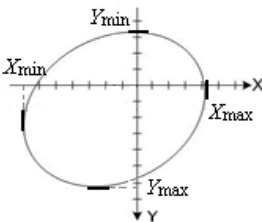


Рис. 2.21

На побудованому графіку можна перевірити максимальні та мінімальні значення показів магнітометра за осями X та Y.

На рис. 2.21 виділені області розшуку екстремальних значень цих значень. Скопіювати побудований еліпс і занести його зображення в звіт з лабораторної роботи.

В програмі Ардуїно замість

$$x_m=1; y_m=1; x_kor=0; y_kor=0;$$

підставити розраховані значення X_M , Y_M , $X_{кор}$, $Y_{кор}$ відповідно.

Клацнувши кнопку **Upload** панелі інструментів, перекомпілювати програму і "прошити" її в мікроконтролер Ардуїно.

Знову обертаючи поворотний стіл на кут $\pm 360^\circ$, за вище наведеною методикою побудувати графік розподілу магнітного поля у місті розташування магнітометра, який повинний вже мати форму кола з центром у початку координат. Скопійовану фігуру занести у звіт з лабораторної роботи.

2.3.2. Зняття статичних характеристик магнітометра

У програмі Ардуіно:

- «закоментувати» строку виведення інформації про величину складових магнітного поля по осях X та Y ;
- «розкоментувати» строку виведення інформації про значення курсу.

Клацнувши кнопку **Upload** панелі інструментів, перекомпілювати програму і "перепрошити" її в мікроконтролер Ардуіно. Натиснувши на панелі інструментів Ардуіно кнопку моніторингу послідовної шини, почати отримувати інформацію про поточний курс, яка надходить від контролера Ардуіно на комп'ютер по послідовному інтерфейсу

Таблиця 1

Значення магнітного курсу	Покази магнітометра
0	
30	
60	
90	
120	
150	
...	

Обертаючи поворотний стіл, через кожні 30° знімати покази магнітометра, заносючи їх в таблицю 1. Для зменшення похибок магнітометра необхідно проводити додаткові девіаційні роботи, суть яких викладається в дисципліні «Авіаційні прилади та бортові інформаційні системи».

2.3.3. Дослідження впливу горизонтальності магнітометра на його точності характеристики

Нахилити горизонтальну платформу кронштейна, змонтованого на поворотному столі, на кут 15° . Обертаючи поворотний стіл в межах 30° , через кожні 5° знімати покази магнітометра, заносючи їх в другу колонку таблиці 2. Переконатися в суттєвому погіршенні точностних характеристик МЕМС-компаса.

Таблиця 2

Значення магнітного курсу	Покази магнітометра	
	без врахування нахилу	з врахуванням нахилу
0		
5		
10		
15		
20		
25		
30		

Зробити висновок про необхідність врахування нахилу магнітометра по крену і тангажу відносно горизонтального положення. Для цих

цілей до складу компасного набору зазвичай входить МЕМС акселерометр (на платі НМС5883L акселерометр відсутній, а врахування горизонтальності здійснюється від датчиків навігаційної системи, до складу якої входить НМС5883L).

В програмі Ардуіно:

- «закоментувати» строку розрахунку горизонтальної складової магнітного поля Землі по осі Y:

```
//y_kal=y_m*(double)y+y_kop;
```

- «розкоментувати» строку розрахунку цієї складової магнітного поля Землі з урахуванням нахилу на кут 15°:

```
y_kal=(y_m*(double)y+y_kop)*cos(tet)-((double)z)*sin(tet);
```

Кут нахилу закладений у програмі Ардуіно у вигляді:

```
tet=15*PI/180.
```

Перекомпілювати програму і "перепрошити" її в мікроконтролер Ардуіно. Повторити експеримент, обертаючи поворотний стіл в межах 30° і заносючи покази магнітометра в третю колонку таблиці 2. Переконайтеся, що навіть при відсутності калібрування осі Z, точності характеристик МЕМС-компаса практично відновлюються.

Зміст звіту

В результаті виконання лабораторної роботи кожен студент представляє акуратно оформлений звіт, який містить цифровий і графічний матеріал проведених досліджень. У звіті повинні бути висновки з кожного пункту роботи.

Додаток до лабораторної роботи №2

Лістинг програми «sketch_LR_magnitometr2»

```
#include <Wire.h> // Підключення бібліотеки Ардуіно для роботи с I2C
#define address 0x1E //0011110b, I2C 7bit address of HMC5883

void setup()
{
    Serial.begin(9600); //Завдання швидкості передачі даних на комп'ютер
    Wire.begin(); // Ініціалізація бібліотеки Ардуіно (Wire)

    // Призначення для HMC5883 коректного режиму роботи
    Wire.beginTransmission(address); // Відкриття зв'язку з HMC5883
    Wire.write(0x02); //select mode register
    Wire.write(0x00); //continuous measurement mode
    Wire.endTransmission(); //Завршення зв'язку з HMC5883
}

void loop()
{
    int i,x,y,z; //triple axis data
    double katet,abcis,kurs,kurs_cp;
    double tet, x_max, x_min, y_max, y_min,
    x_m, y_m, x_kop, y_kop, x_kal, y_kal;

    //Tell the HMC5883 where to begin reading data

    Wire.beginTransmission(address);
    Wire.write(0x03); //select register 3, X MSB register
    Wire.endTransmission();

    //Read data from each axis, 2 registers per axis
    Wire.requestFrom(address, 6);
    if(6<=Wire.available())
    {
        x = Wire.read()<<8; //X msb
        x |= Wire.read(); //X lsb
        z = Wire.read()<<8; //Z msb
        z |= Wire.read(); //Z lsb
        y = Wire.read()<<8; //Y msb
        y |= Wire.read(); //Y lsb
    }
}
```



```

// Визначення значень Min / Max
if (x < x_min) x_min = x;
if (x > x_max) x_max = x;
if (y < y_min) y_min = y;
if (y > y_max) y_max = y;

x_m=0;
y_m=0;
x_kop=0;
y_kop=0;

x_kal=x_m*(double)x+x_kop;
y_kal=y_m*(double)y+y_kop;

Serial.print(x_kal);Serial.print("|");Serial.println(y_kal);

////////////////////////////////////
//////////Розрахунок калібрувальних коефіцієнтів
if (Serial.available())// Перевірка, наявності сигналу на розрахунок
{
val = Serial.read(); // Читання інформації з клавіатури

/* Якщо з клавіатури задається 1 (val=1), то виконується розрахунок */
if (val == '1')
{
y_m=(x_max-x_min)/(y_max-y_min);
if (y_m<=1) y_m=1;
x_m=(y_max-y_min)/(x_max-x_min);
if (x_m<=1) x_m=1;
x_kop=x_m*(-(x_max+x_min)/2);
y_kop=y_m*(-(y_max+y_min)/2);
Serial.print("y_m = "); Serial.print(y_m);
Serial.print(" x_m = "); Serial.println(x_m);
Serial.print(" y_kop = "); Serial.print(y_kop);
Serial.print(" x_kop = "); Serial.println(x_kop);
}
else
x_m=x_m;
y_m=y_m;
x_kop=x_kop;
y_kop=y_kop;
}
}

```

```

//tet=15*PI/180;
//y_kal=(y_m*(double)y+y_kop)*cos(tet)-((double)z)*sin(tet);
abcis=sqrt(sq(x_kal)+sq(y_kal));
katet=y_kal;
kurs = acos((katet/abcis));
if(x_kal < 0) kurs = 2*PI-kurs;

kurs = round(kurs*180/PI); // переводим радианы в градусы
kurs =360-kurs;

//kurs = atan2(y, x);
//if(x > 0) kurs += 2*PI;

//Serial.print(x_kal);Serial.print(" |");Serial.println(y_kal);
// Serial.println(" ");
Serial.println(kurs);
//Serial.println(" ");

// Зазвичай робимо затримку додатка 66 мс при циклу
// для запуску на 15 Гц (полоса за замовчуванням для НМС5883L).
// Однак, оскільки ми маємо велику затримку на послідовному порту
(104 мс при 9600),
// то дозволимо йому працювати з природною швидкістю.
// delay(66);
}

// Виведення даних через послідовний порт.
void Output(int RoundDegreeInt)
{
//Serial.println();
Serial.println(RoundDegreeInt);*/
delay(180);
}

```

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА ВІДСТАНІ

Мета роботи

У лабораторній роботі досліджується технічні характеристики ультразвукового датчика відстані, оцінюються фактори, що погіршують ультразвукове вимірювання відстані, а також визначаються статичні характеристики вимірника.

Методичні вказівки

Повторити такі теоретичні питання дисципліни:

- МЕМС мікрофони;
- ультразвук та його застосування;
- ультразвукові датчики відстаней.

Завдання на виконання лабораторної роботи

1. Дослідити технічні характеристики далекоміра HC-SR04.
2. Дослідити вплив різноманітних факторів на точнісні характеристики далекоміра HC-SR04.
3. Оцінити можливості сканування підстилаючого рельєфу ультразвуковим датчиком відстані.

3.1. Скорочені теоретичні питання

3.1.1. МЕМС-мікрофони

Самим типовим електроакустичним датчиком є мікрофон. Мікрофон – це електроакустичний прилад для перетворення звукових (механічних) коливань в електричні. Існують різні версії мікрофонів: вугільні, електромагнітні, електродинамічні, конденсаторні, електретні, п'єзоелектричні та транзисторні мікрофони. Але найважливішу роль в еволюції мікрофонних технологій відіграли конденсаторні та електретні конденсаторні мікрофони.

У конденсаторному мікрофоні жорстко натягнута мембрана, яка є одночасно рухомою обкладкою електричного конденсатора, під впливом звукового тиску може коливатися відносно нерухомої обкладки. Під час коливань мембрани ємність конденсатора змінюється з частотою звукового тиску, що діє на мембрану, у зв'язку, з чим в електричному колі виникає змінний струм тієї ж частоти, а

на опорі навантаження виникає падіння напруги, яке і є вихідним сигналом мікрофона. Для того щоб конденсатор міг функціонувати як мікрофон, на нього необхідно подати напругу зміщення.

Електретні конденсаторні мікрофони (Electret Condenser Microphone – ECM) (рис. 3.1), фактично це ті ж конденсаторні, але постійна напруга для них забезпечується не звичайним джерелом, а електричним зарядом мембрани, виготовленої з електрети – діелектрика, здатного зберігати поляризацію тривалий час. Тому ECM дуже простий: він являє собою металевий корпус, у якому міститься постійно заряджена рухома діафрагма, яка отримує звук через апертури (отвори) в паралельній їй жорсткій обкладці, що є центральною частиною корпусу. Для підсилення вихідного сигналу в корпусі також розміщується польовий транзистор (Field Effect Transistors – FET).

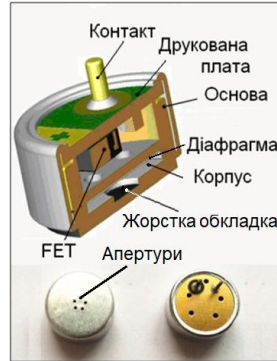


Рис. 3.1

Проблеми, що асоційовані з розробкою і використанням аудіосистем на основі ECM, зводяться до трьох основних: шуми, розмір і ручне збирання (монтаж).

Тому з початку 1980-х, у зв'язку з розвитком МЕМС-технологій, з'явилися перші розробки, і технологія МЕМС-мікрофонів.

Можна вирізнити такі переваги, які відрізняють МЕМС-мікрофони від ECM:

- висока функціональність;
- малий розмір;
- низька ціна.

За принципом роботи МЕМС-мікрофони є конденсаторними мікрофонами, а структурно і функціонально схожі, наприклад, з МЕМС-датчиками тиску.

МЕМС-мікрофон (рис. 3.2, а) складається з нерухомої конденсаторної обкладки, нанесеної на жорстку пластину основи, і рухомої діафрагми (мембрани), яка відіграє роль другої конденсаторної обкладки (деякі конструкції МЕМС-мікрофонів (рис. 3.2, б) передбачають дві нерухомі обкладки, між якими міститься рухома мембрана). Нерухома обкладка (рис. 3.2, а) доповнена кільцем, яке під-

тримує мембрану, що дозволяє зберігати рознесення між собк-ладкою і мембраною постійним.

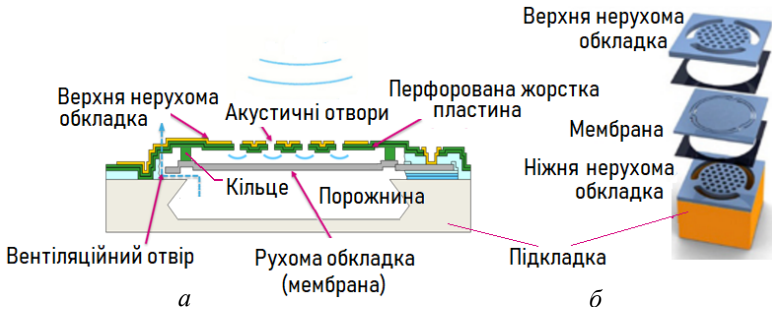


Рис. 3.2

Під мембраною витравлюється порівняно велика порожнина, яка являє собою акустичний резонатор, з обов'язковим вентиляційним отвором. Вентиляційний отвір дозволяє витікати повітря, стисненому в нижній порожнині, щоб мембрана могла здійснювати вільні коливання.

Щоб мінімізувати вплив тиску повітря на нерухому обкладку, а також для забезпечення акустичного демпфування повітря в повітряному зазорі нерухома обкладка перфорується акустичними отворами.

Основна відмінність між ЕСМ і кремнієвим МЕМС-мікрофоном полягає в тому, як підтримується заряд на підкладці. Кремнієвий мікрофон після виготовлення не має заряду. Використовуючи напругу 12 В, заряд закачується в підкладку за допомогою CMOS-схеми. Мікросхема підтримує цей заряд, коли мікрофон активований. В ЕСМ заряд підкладки формується у процесі виготовлення. Якщо з якої-небудь причини заряд зменшиться або зникне, то динамічний відгук мікрофона швидко деградуватиме. Найчастіше деградація спричиняється перегрівом. Тому ЕСМ не експлуатують за температури понад 85 °С і не можуть припаюватися шляхом автоматичного поверхневого монтажу. Натомість МЕМС-мікрофони під час поверхневого монтажі здатні протистояти високим температурам паяння – до 260 °С, тому їх монтаж можна здійснювати в автоматичному режимі. Для ЕСМ аналогічні технології виробництва не застосовують, тому їх ручне складання підвищує ціну виробництва.

Крім використання в МЕМС-мікрофонах, акустичні сенсори

знаходять й інші застосування. Акустичні датчики застосовуються в автомобільній індустрії (датчики крутильного моменту і тиску в шині), медицині (хімічні датчики) і у багатьох інших сферах (як датчики вологості, температури тощо). Нарешті акустичні датчики широко використовуються для вимірювання відстаней – в акустичних далекомірах.

3.1.2. Ультразвукові датчики відстаней

Ультразвукові хвилі є акустичними хвилями, частота яких (понад 20 кГц) лежить за межами чутності людського вуха. Однак сигнали цих частот сприймаються деякими тваринами. А деякі види ссавців, таких як кажани і дельфіни, використовують принцип ехолокації ультразвуку (УЗ) для виявлення перешкод і орієнтування в просторі. Цей само принцип – принцип ехолокації покладено в основу побудови УЗ датчика відстані.

Ультразвукові датчик відстані складається з таких основних елементів: передавача (випромінювача), приймача (мікрофона) і перетворювача. Роль мікрофонів і випромінювачів у сфері УЗ виконують пристрої, які називаються трансдуктори. Оскільки звук з високою частотою розсіюється в навколишньому середовищі менше, то це зумовлює променевий характер поширення УЗ хвилі, тобто УЗ легше фокусувати і відповідно отримувати більш концентроване, вузьке і напрямлене випромінювання. А чим вужча діаграма головного пелюстка (рис. 3.3) випромінювача, тим вища чутливість датчика. Малий же період коливань дозволяє випромінювати УЗ у вигляді імпульсів і здійснювати в середовищі точну часову селекцію сигналів, що поширюються у просторі. Перевагами УЗ-датчиків є велика відстань виявлення (до 10 м) і можливість виявляти будь-які об'єкти, що відбивають звук, незалежно від їх форми та кольору.



Рис. 3.3

Принцип випромінювання і приймання УЗ-сигналів лежить в основі УЗ-датчиків відстані. Трансдуктор-випромінювач датчика випромінює короткий УЗ-імпульс. Зіткнувшись з об'єктом, частина енергії імпульсу відбивається. У разі УЗ-хвиль відбита енергія розсіюється в просторі. Це означає, що незалежно від напрямку пада-

ючого променя, усі відбиті промені майже рівномірно розподіляються всередині широкого просторового кута, який може досягати значення 180° . Відбиту від об'єкта енергію вже як «відлуння» вловлює трансдуктор-приймач датчика. Знаючи швидкість поширення звуку в навколишньому середовищі $V_{зв}$ і час T , заміряний таймером датчика, розраховується відстань до об'єкта:

$$D = \frac{T \cdot V_{зв}}{2} \quad (3.1)$$

Для генерації будь-яких механічних хвиль, включаючи УЗ-хвилі, потрібно організувати обернено поступальний рух поверхні, під час якого створюються зони розрядження і стиснення робочого середовища: газового (повітряного), рідинного або твердого. Для збудження УЗ-хвиль найчастіше застосовуються п'єзоелектричні перетворювачі (рис. 3.4), які працюють в режимі зворотного п'єзоелектричного ефекту і безпосередньо перетворюють електричну енергію в механічну. Для створення сфокусованих УЗ-пучків поверхні металевої мембрани п'єзоелектричного випромінювального елемента надається конусоподібна форма.

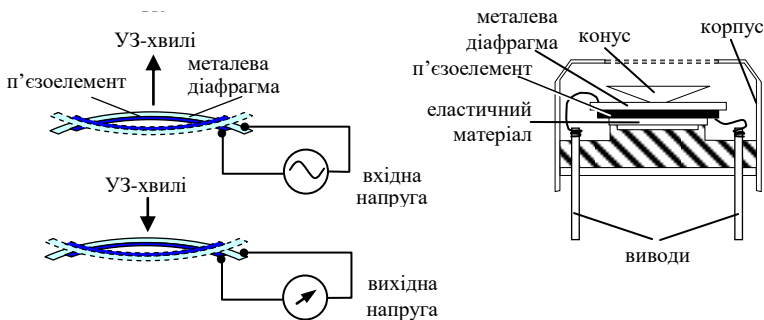


Рис. 3.4

Вхідна напруга, що прикладена до п'єзокерамічних елементів, змушує його згинатися, збуджуючи тим самим УЗ-хвилі. Оскільки п'єзоелектрик є зворотним ефектом, вплив УЗ-хвиль на той же керамічний елемент призводить до появи на його поверхні електричних зарядів. Інакше кажучи, елемент може працювати і як випромінювач, і як мікрофон. Типова робоча частота випромінювального п'єзоелемента становить близько 32 кГц. Для підвищення ефективності частота генератора, який задає робочу частоту, має дорівнювати резонансній частоті керамічного елемента. Дотриманням цієї

умови вдається реалізувати кращу чутливість і ефективність елемента. Швидкість переміщення УЗ-хвилі в повітрі становить 340 м/с за температури 20°C, тобто для виявлення об'єкта на відстані 1 м потрібно 3 мс.

У разі роботи схеми в імпульсному режимі для передавання і приймання сигналу можна використовувати один і той же п'єзоперетворювач. Для безперервного режиму роботи потрібні два п'єзоелементи. Ультразвуковий далекомір HC-SR04 (рис 3.5) є зразком далекоміра з безперервним режимом роботи.

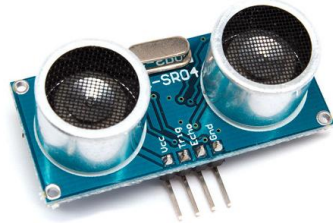


Рис. 3.5

Далекомір HC-SR04 складається з генератора ультразвуку, 2-х трансдукторів (випромінювача і приймача) і підсилювача-формування вихідного сигналу (рис. 3.6).

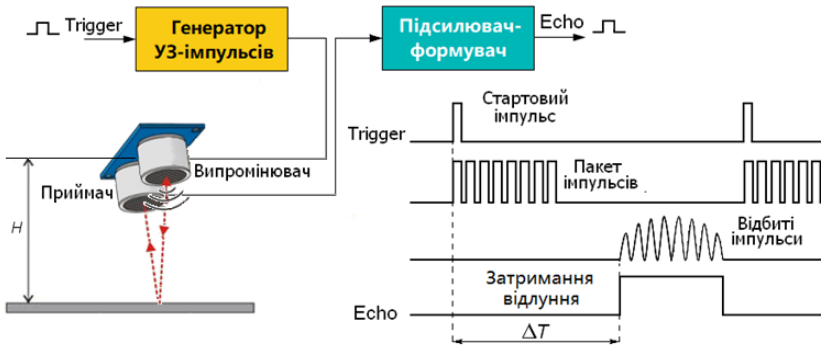


Рис. 3.6

Коли на вхід генератора УЗ-імпульсів приходять стартовий імпульс «Trigger» тривалістю 10 мкс, електронна схема далекоміра генерує пакет з 8 імпульсів УЗ-частоти (40 кГц), що надходить на випромінювач і запускає лічильник, убудований в мікроконтролер. Відбившись від поверхні, УЗ імпульси сприймаються приймачем далекоміра і надходять на підсилювач-формування, на виході якого формується імпульс Echo (відлуння) з логічним рівнем і команда зупинення лічильника. Наступний імпульс може бути випромінюваний, тільки після зникнення відлуння від попереднього. Цей час називається періодом циклу. Рекомендований період між імпуль-

сами має бути не меншим за 60 мс.

Знаючи час надходження відбитого імпульсу і швидкість звуку, в зовнішньому пристрої обчислюється відстань, яка пройдена звуковою хвилею через інтервал часу між фронтами пускового імпульсу і відлуння за формулою (3.1).

На рис. 3.7 показана діаграма спрямованості головного пелюстка випромінювача далекоміра HC-SR04.

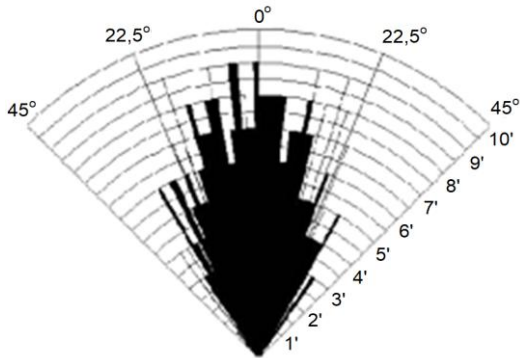


Рис. 3.7

Основні технічні характеристики ультразвукового далекоміра HC-SR04

- напруга живлення: 5 В;
- споживаний струм: 15 мА;
- діапазон виміру: від 2 см до 4 м;
- роздільна здатність: 0,3 см;
- робочий кут спостереження до 30°;
- ефективний кут вимірювання (вимірювання з максимальною точністю) до 15°;
- максимальна частота опитування датчика: 20 Гц;
- частота ультразвуку: 40 кГц;
- вага 8,28 грам;
- розміри: 45×20×15 мм.

Фактори, що погіршують УЗ-вимірювання відстані:

1. Великі кути між площиною поверхні відображення і віссю головного пелюстка випромінювача. У випадках, коли цей кут відрізняється від 90 °, відбита хвиля відхиляється від осі датчика, що знижує максимальну дистанцію виявлення. Чим більша відстань між об'єктом і датчиком, тим сильніше виявляється цей ефект;

2. Звуковбирні поверхні відображення можуть призвести до не-

правильних вимірювань унаслідок поглинання (ослаблення) сигналу.

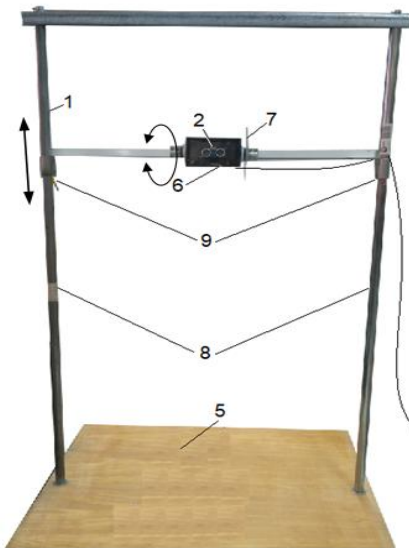
3. Висока вологість (дощ, сніг) викликає паразитний сигнал-відлуння, оскільки сигнал може частково відбиватися від крапель (сніжинок).

4. Сильні потоки повітря можуть пришвидшити або навпаки уповільнити звукову хвилю.

5. Коли поверхня відображення випромінює велику кількість тепла, виникають різні температурні області, які змінюють швидкість поширення хвилі, що призводить до неточності роботи датчика.

3.2. Опис лабораторної установки

До складу лабораторної установки (рис 3.8) входять:



- вимірювальний кронштейн 1 із закріпленим на ньому УЗ датчиком відстані 2;
- приєднаний до комп'ютера 4 і до УЗ датчика відстані модуль Arduino Leonardo 3;
- набори зразків матеріалів поверхонь віддзеркалення;
- макети профілів поверхонь віддзеркалення.

Рис. 3.8

3.2.1. Вимірювальний кронштейн.

Вимірювальний кронштейн (див. рис 3.8) монтується на вимірювальний стіл 5 за допомогою болтів і призначений для закріплення датчика ультразвукового далекоміра HC-SR04 на монтажному майданчику 6 та забезпечення можливості змін і вимірювань його кутового і просторового положення в процесі проведення досліджень.

Зміна кутової орієнтації осі головного пелюстка випромінювача забезпечується можливістю монтажного майданчика із закріпленням датчиком далекоміра повертатися відносно своєї осі в межах кутів $\pm 90^\circ$. Відлік кута повороту монтажного майданчика відносно своєї осі проводиться за круговою шкалою 7 зі стрілкою.

Зміна лінійного положення сонара відносно горизонтальної поверхні відбиття (відносно вимірювального стола) забезпечується можливістю монтажного майданчика датчика переміщатися за основними стійками 8 кронштейна з подальшою її фіксацією стопорами 9 в потрібному положенні. Відлік лінійного положення монтажного майданчика відносно горизонтальної поверхні відбиття проводиться за шкалами, нанесеним на основних стійках кронштейна.

3.2.2 Модуль и середовище розробки Arduino

Апаратна частина Arduino (рис. 3.9) являє собою мікроконтролер, змонтований на друкованій платі, який використовується як платформа для розробки електронних пристроїв. Більшість плат Arduino забезпечені мінімально необхідним набором об'язки для нормальної роботи мікроконтролера (стабілізатор живлення, кварцовий резонатор, ланцюжки скидання тощо).



Рис. 3.9

Мікроконтролери для Arduino відрізняються наявністю попередньо прошитого в них завантажувача. За допомогою цього завантажувача користувач завантажує розроблювану програму в мікроконтролер без використання традиційних окремих апаратних програматів. Завантажувач з'єднується з комп'ютером через інтерфейс USB.

Середовище розробки Arduino складається з вбудованого текстового редактору програмного коду, області повідомлень, вікна виведення тексту (консолі), панелі інструментів з кнопками часто використовуваних команд і декількох меню. Для завантаження програм і зв'язків середовище розробки підключається до апаратної частини Arduino.

У додатку до методичних вказівок детально описане середовище розробки Arduino.

3.2.3 Набори зразків матеріалів і профілів поверхонь віддзеркалення

В якості зразків матеріалів поверхонь віддзеркалення в роботі використовуються: папір з різною поверхневою структурою; зразки тканини; паперу; пластику.

Як зразки профілів поверхонь використовуються профілі різної форми (див рис. 3.10).

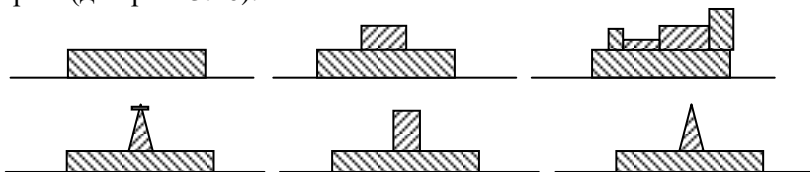


Рис. 3.10

3.3. Порядок і методика виконання лабораторної роботи

Підготовка до перевірки. Включити комп'ютер і запустити середовище розробки Arduino. Відкриється заготовка лабораторної роботи «sketch_НC-SR04». Подивитися у програмі до якого PIN повинні бути підключені контакту (Echo) і (Trig):

```
# define echo Pin4 // Echo Pin  
# define rig Pin2 // Echo Trigger Pin
```

Перевірити під'єднання далекомір HC-SR04, який встановлений на вимірювальному кронштейні, до модуля Arduino Leonardo, а самого модуля Arduino Leonardo до комп'ютера за допомогою USB-кабелю. При цьому уважно подивитися (рис. 3.11) через які контакти шлейфу, проходять:

лінія живлення (VIN), лінія заземлення (GND), лінія (Echo) і лінія (Trig). На модулі Arduino повинен світитися зелений світлодіод живлення, позначений PWR.

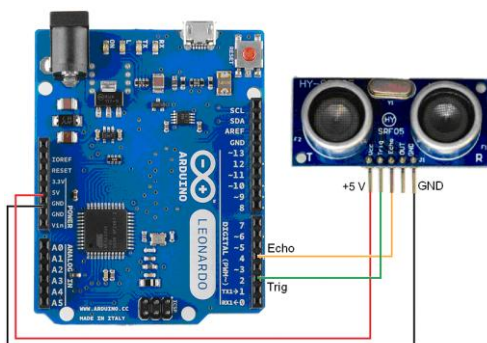


Рис. 3.11

Увага: Модуль не рекомендується підключати безпосередньо до підключеної до електро-

живлення платі мікроконтролера, не обхідно відключити електроживлення в момент підключення модуля, першим повинен бути підключений вивід GND модуля, в іншому випадку, це може вплинути на нормальну роботу модуля.

Ознайомитися з лістингом «sketch_HC-SR04», який наведено у додатку до лабораторної роботи №3.

3.3.1. Визначення робочого і ефективного кута спостереження датчика HC-SR04

Підняти монтажний майданчик випромінювача на 80 см. відносно вимірювального столу кронштейна. Клацнувши кнопку *Upload* панелі інструментів Ардуіно перекомпілювати програму і "прошити" її в мікроконтролер (рекомендується). Підключивши моніторинг послідовної шини, почати змінювати нахил монтажної площадки, спостерігаючи за даними про висоту, що надходять від Ардуіно на комп'ютер. Зафіксувати кут нахилу, як *ефективний кут спостереження*, при якому дані про висоті починають змінюватися.

Продовжувати збільшувати кута нахилу й зафіксувати кут при якому дані про висоту починають суттєво викривлюватися. Цей кут вважається *робочим кутом спостереження*.

Повторити дослідження нахилиючи монтажну площадку в інший бік. Зафіксувати ефективний та робочий кути спостереження. Занести ці дані в звіт з лабораторної роботи.

3.3.2. Дослідження впливу звукопоглинальних властивостей різноманітних матеріалів на точність вимірювання відстані.

Для дослідження звукопоглинальних властивостей поверхні відбиття на точність вимірювання відстані встановити монтажний майданчик випромінювача на висоту приблизно 80 см. Відносно вимірювального столу. Дані про вимірювану відстань будуть заноситися в заготівку таблиці книги Microsoft Excel «Звіт» з папки LR3. Відкрийте цей файл, а в ньому лист «Відбивні властивості».

Як зразки при дослідженнях використовуються: папір, тканина і пластик. Для зняття показань перший зразок – зразок паперу вкладається на вимірювальний стіл і включається монітор порту. Спостерігаючи, 3 ... 4 с. за показами датчика відстані, відключити в моніторі параметр «Автопрокрутка» (віконце в нижній лівій частині вікна монітора). Потім, клацнувши у вікні монітора, виділіть всі

(Ctrl_A) і скопіювати (Ctrl_C) вміст вікна. Закрийте монітор порту.

Вставте (Ctrl_V) скопійовані дані в стовпець А таблиці відкритого Excel документа. У відповідь на попередження про біАбіументвідність даних відповісти продовженням. Виділивши стовпець А, командою «Замінити Все» замінити «точку» в форматі даних на «кому». В результаті на діаграмі заготовки Excel документа з'явиться графік вимірної відстані до зразка.

Повторити дослідження для двох інших зразків: для тканини і для пластика, вставляючи дані про вимірних відстанях в стовпці В і С відповідно. В результаті на діаграмі Excel з'явиться ще два графіка вимірних відстаней до зразків (див. рис. 3.12). Скопіюйте діаграму і вставте її в звіт по лабораторній роботі.

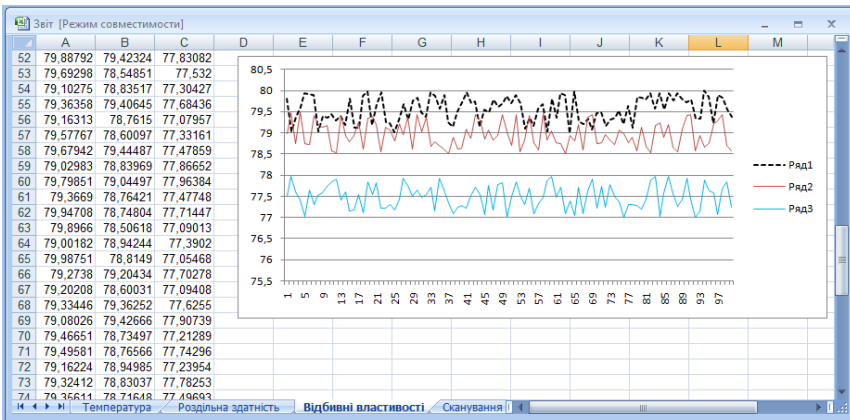


Рис. 3.12

Оцінити як звукопоглинальні властивості різноманітних біматеріалів впливають на похибку вимірювання відстані.

Візуалізацію результатів дослідження цього та наступних пунктів можна здійснювати з використанням програми побудови графіків математичних функцій Graph. Правила роботи з програмою Graph наведені у додатку 2 до методичних вказівок.

3.3.3. Дослідження роздільної здатності датчика HC-SR04

Методика проведення вимірювань залишається такою же, як і в попередньому пункті. Для дослідження роздільної здатності датчика використовуються два об'єкти: перший діаметром 3 см. і висотою 4 см. – другий діаметром 1,5 см. і висотою 3 см.

Встановіть монтажний майданчик випромінювача відносно вимірювального столу кронштейна на висоту ≈ 50 см. Перекомпілювати і "перепрошити" програму в мікроконтролер (рекомендується). Дані вимірювань будуть заноситися в таблицю книги Microsoft Excel «Звіт» на аркуші «Роздільна здатність».

Для оцінювання роздільної здатності датчика відстані виконати такі пункти досліджень:

- a. Виміряти відстань до вимірювального столу кронштейна і занести ці дані в стовпець **A** таблиці книги Microsoft Excel «Звіт» на аркуші «Роздільна здатність» як рівень відліку.
- b. На вимірювальний стіл встановити перший об'єкт діаметром 3 см і провести вимірювання. Занести дані про виміри в стовпець **B** таблиці.
- c. Повторити вимірювання для другого об'єкта діаметром 1,5 см і занести дані про виміри в стовпець **C** таблиці.

Звернути увагу, що на побудованій діаграмі другий об'єкт не спостерігається. Скопіювати діаграму і вставити її в звіт з лабораторної роботи.

Встановити монтажний майданчик випромінювача відносно вимірювального столу кронштейна на висоту 18 ... 20 см.

Повторити пункти *a, b, c* попередніх вимірювань, але результати вимірювань заносити в стовпці **D, E, F** таблиці книги «Звіт» на аркуші «Роздільна здатність». Звернути увагу, що на побудованій діаграмі спостерігаються вже два об'єкти вимірювань. Скопіювати діаграму і вставити її в звіт з лабораторної роботи.

3.3.4. Оцінка впливу температури поверхні відбиття на точність вимірювань дальності

Методика проведення вимірювань залишається такою же, як і в попередніх пунктах досліджень.

Встановивши монтажний майданчик випромінювача відносно вимірювального столу кронштейна на висоту приблизно 50 см і розмістивши на ньому металеву пластину, виміряти відстань до її поверхні. Занести ці дані в стовпець **A** таблиці книги Microsoft Excel «Звіт» на аркуші «Температура».

Використовуючи фен, нагрівати зразок протягом 1 хв., Після чого повторити вимір відстані до поверхні зразка. Занести дані вимірювання в стовпець **B** таблиці книги Microsoft Excel «Звіт» на аркуші «Температура».

Давши протягом 2 ... 3 хв поверхні відбиття охолонути, знову виміряти відстані до поверхні зразка. Занести дані вимірювання в стовпець С таблиці книги Microsoft Excel «Отчет1» на аркуші «Температура».

За побудованими графіками оцінити вплив температури на точність вимірювання відстані. Скопіювати діаграму і вставити її в звіт з лабораторної роботи.

3.3.5. Оцінка можливостей сканування підстиляючого рельєфу ультразвуковим датчиком відстані

Методика проведення вимірювань залишається такою ж, як і в попередніх пунктах досліджень. Монтажна майданчик випромінювача розміщується на висоті 50 см відносно вимірювального стола.

На вимірювальному столі поза зоною видимості датчика помістити зразок профілю *I* з прикріпленою до нього ниткою (див. рис. 3.13).

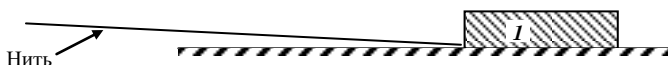


Рис. 3.13

Запустивши монітор порту, повільно протягнути зразок профілю через зону видимості датчика відстані. Скопіювати проведені вимірювання і вставити їх в стовпець А таблиці книги Microsoft Excel «Отчет1» на аркуші «Сканування».

Змінити досліджуваний профіль рельєфу, встановивши на клейку стрічку зразка профілю *I* додатковий елемент (рис. 3.14). Запустивши монітор порта, повільно протягнути новий зразок профілю через зону видимості датчика відстані. Скопіювати проведені вимірювання і вставити їх в стовпець В таблиці книги Microsoft Excel «Отчет1» на аркуші «Сканування».

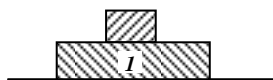


Рис. 3.14

Ще раз змінити досліджуваний профіль рельєфу, встановивши на клейку стрічку зразка профілю *I* ряд додаткових елементів різної висоти (рис. 13). Запустивши монітор порту, повільно протягнути новий зразок профілю через зону видимості датчика відстані. Скопіювати проведені вимірювання і вставити їх в стовпець С таблиці книги Microsoft Excel «Отчет1» на аркуші «Сканування».



Рис. 3.15

За побудованими графіками діаграми оцінити можливості сканування підстилаючого рельєфу ультразвуковим датчиком відстані. Скопіювати діаграму і вставити її в звіт з лабораторної роботи. Очистити таблицю даних листа «Сканування».



Рис. 3.16

Сформувавати профіль рельєфу, встановивши на клейку стрічку зразка профілю 1 елемент конусоподібної форми (рис. 3.16). Запустивши монітор порту, повільно протягнути новий зразок профілю через зону видимості датчика відстані. Скопіювати проведені вимірювання і вставити їх в стовпець А таблиці книги Microsoft Excel «Отчет1» на аркуші «Сканування». Звернути увагу, що на графіках діаграми об'єкт конусоподібної форми не спостерігається.

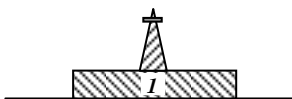


Рис. 3.17

Одягнувши на елемент конусоподібної форми «шапочку» (рис. 3.17), повторити дослідження. Скопіювати проведені вимірювання і вставити їх в стовпець С таблиці книги Microsoft Excel «Отчет1» на аркуші «Сканування». Звернути увагу, що на графіках діаграми даний об'єкт вже відображається. Скопіювати діаграму і вставити її в звіт з лабораторної роботи.

Зміст звіту

В результаті виконання лабораторної роботи кожен студент представляє акуратно оформлений звіт, який містить цифровий і графічний матеріал проведених досліджень. У звіті повинні бути висновки з кожного пункту роботи.

Додаток до лабораторної роботи №3

Лістинг програми лабораторної роботи

```
/* Распінування ультразвукового сенсора відстані  
(інформація про клемах підключення HC-SR04 до Ардуіно) */  
#define echoPin 3 // Echo Pin  
#define trigPin 2 // Trigger Pin  
  
/* Опис типу даних */  
// Цлочислові константи  
int maximumRange = 400; // Максимальна дистанція  
int minimumRange = 0; // Мінімальна дистанція  
  
//Числові дані з плаваючою комою.  
float T, distance; // Час приходу луна-сигналу і відстань  
  
/* Функція setup()  
Функція використовується для ініціалізації і установки початкових  
значень змінних, визначення режимів роботи виводів, запуску бібліотек,  
тощо.  
Функція викликається тільки один раз, коли стартує скетч. */  
void setup()  
{  
Serial.begin(9600); // Задаємо швидкість передачі даних на комп'ютер  
pinMode(trigPin, OUTPUT); // Ініціюємо як вихід  
pinMode(echoPin, INPUT); Ініціюємо як вхід  
}  
  
void loop()  
/* Функція loop () використовується для організації нескінченного циклу  
дій, вимірювань і обчислень. */  
{  
digitalWrite(trigPin, LOW);  
delayMicroseconds(2);  
/* Виставляємо і утримуємо 2 мкс вході мікроконтролера логічний нуль,  
щоб забезпечити «чистий» наступний імпульс (дублюємо зняття сигналу з  
входу мікроконтролера)*/  
  
digitalWrite(trigPin, HIGH);  
delayMicroseconds(10);  
/* Подаємо і утримуємо 10 мкс логічну одиницю на вході  
мікроконтролера (10 мкс це та мінімальна тривалість імпульсу, після якої  
генерується ультразвукової сигнал.) */
```

```

digitalWrite(trigPin, LOW); // Знімаємо сигнал зі входу мікроконтролера

T = pulseIn(echoPin, HIGH); // Вимірювання часу приходу луна-
сигналу в мкс
/* Функція pulseIn () зчитує і повертає довжину сигналу в мікросекундах
заданому порту.*/

distance = T*0.017; /* Розрахунок відстані до об'єкта в см з урахуванням
швидкості звуку рівною 34000 см/с і з переведенням часу T з мкс в секунди */

if (distance >= maximumRange || distance <= minimumRange)
/* Якщо дистанція більше максимальної або менше мінімальної
виводиться інформація «Поза зоною». В іншому випадку виводиться
виміряне значення дистанції */
{
Serial.println("Вне зоны действия");// Виводиться інформація «Поза
зоною»
}
else
{
Serial.println(distance); // Виводиться виміряне значення дистанції
}
delay(60); // Встановлюємо період опитування 60 мілісекунд
}

```

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ДАТЧИКА КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ

Мета роботи

Метою лабораторної роботи є набуття практичних навичок в проведенні експериментальних досліджень інформаційних мікропроцесорних пристроїв на прикладі інерціального вимірювального модуля MPU-6050, до складу якого входить датчик кутової швидкості і який є головним об'єктом експериментальних досліджень.

Методичні вказівки

Повторити такі теоретичні питання дисципліни:

- принципи побудови МЕМС-датчиків кутової швидкості;
- числові методи інтегрування.

Завдання на виконання лабораторної роботи

1. Провести калібрування датчика кутової швидкості у складі мікросхеми MPU-6050 (GY-521).
2. Оцінити рівень шумів датчика кутової швидкості та акселерометра.
3. Зняти статичні характеристики МЕМС датчика кутової швидкості.
4. Дослідити варіанти отримання інформації про кутову орієнтацію мікросхеми MPU-6050.

4.1. Скорочені теоретичні питання

Мікромеханічні гіроскопи (ММГ) відносяться до так званих вібраційних гіроскопів (датчиків кутової швидкості), які містять вібраторну деталь – вимірювальну масу (ВМ), що реагує на обертання об'єкта.

Принцип роботи таких гіроскопів ґрунтується на тому, що під час обертання віброуючої в одній площині ВМ, наприклад, стрижня (рис. 12.1) в ортогональній цим вібраціям площині з'являються знакозмінні сили Коріоліса, які вигинають стрижень в площині дії цієї сили, тобто в цій площині викликаються вторинні вібраційні коливання.

Детектування параметрів вторинної вібрації дозволяє визначити кутову швидкість обертання основи.

За виглядом руху вимірювальної маси (ВМ) у режимах первинних і вторинних вібрацій розрізняють ММГ LL-типу, RR-типу і LR-типу. У датчиках LL-типу ВМ здійснює поступальні переміщення, у гіроскопах RR-типу – обертальні переміщення, а в мікро-механічних гіроскопах LR-типу – різні комбінації поступальних і обертальних переміщень. Кожний тип ММГ додатково характеризується набором різних класифікаційних ознак.

Балкові та стрижневі гіроскопи

В основі принципу дії балкових гіроскопів LL-типу лежить поведінка довгого вібрального стрижня під дією обертання. Консольну балку (рис. 4.1, а) змушують коливатися за допомогою п'єзоелементів у напрямку осі Y . Під час обертання балки відносно осі Z під дією сили Кориоліса збуджуються коливання уздовж осі X . Вони реєструються іншими п'єзоелементами. Конструкції балок можуть бути різними. Наприклад, у *стрижневих* гіроскопах компанії «Елма» використовується триполюсний вібратор – сталевий стрижень у пружному двосторонньому підвісі з поперечним перерізом у вигляді рівностороннього трикутника (рис. 4.1, б).

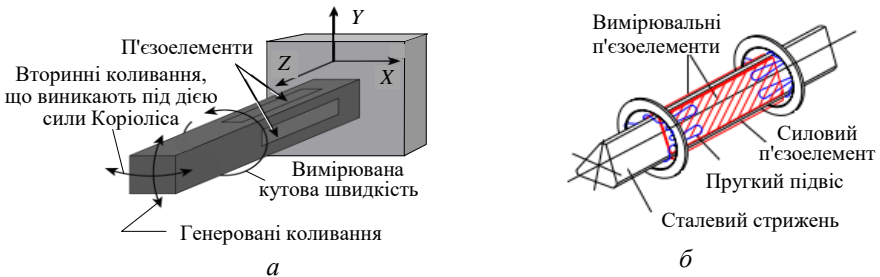


Рис. 4.1

До класу стрижневих ММГ також належать біморфні вібраційні гіроскопи, в яких коливальна система (резонатор) являє собою послідовний біморф – пару склеєних п'єзоелектричних пластини,

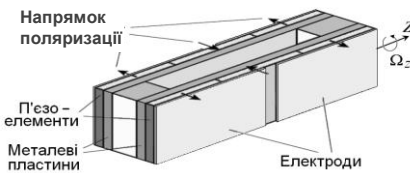


Рис. 4.2

що поляризовані в протилежних напрямках. Кожна з пластин (рис. 4.2) складається з трьох частин з протилежними напрямками поляризації.

До пластин прикладається напруга, одна пластина починає стискатися, друга розтягуватися

протифазі, у результаті виникають протифазні коливання. Під час обертання біморфа відносно осі Z в ньому під дією сили Коріоліса збуджуються вторинні коливання пластин.

Хоча первинні коливання пластин відбуваються в протифазі, сигнали їх генерації синфазні. Вторинні ж коливання, викликають додаткові протифазні сигнали на електродах, різниця яких пропорційна кутовій швидкості обертання. Таким чином, за допомогою диференціальної схеми можна виділяти ці сигнали. При цьому використовуються ті самі електроди, що і для генерації первинних коливань.

Гіроскопи-камертони

Однією з конструкцій гіроскопа є гіроскоп, резонатор якого має дві ВМ, які здійснюють коливання рівній амплітуді, але в протилежних напрямках. Такий ММГ відноситься до камертонного типу – *tuning fork* (TF).

Базова запатентована конструкція TF-гіроскопа, який належить до двомасових гіроскопів LR-типу, являє собою (див. рис. 4.3) рамку з двома осциляторами⁶,

які коливаються у протифазі (зустрічно) уздовж осі X . Рухомі маси осциляторів підвішені на гнучких рамках відносно підкладки. Маси за допомогою електростатичних приводів гребінчастої структури здійснюють вібраційний рух (двигуни зближують робочі тіла осциляторів, а мікропружини повертають їх назад). Вектори швидкостей вібрацій V паралельні площині підкладки і перебувають у протифазі один до одного. Із появою кутової швидкості Ω_Y навколо вимірювальної осі рухомі маси осциляторів під дією сил Коріоліса F_1 і F_2 почнуть здійснювати разом з рамкою кутові коливання (тому такий гіроскоп вважається гіроскопом LR-типу). Зміни

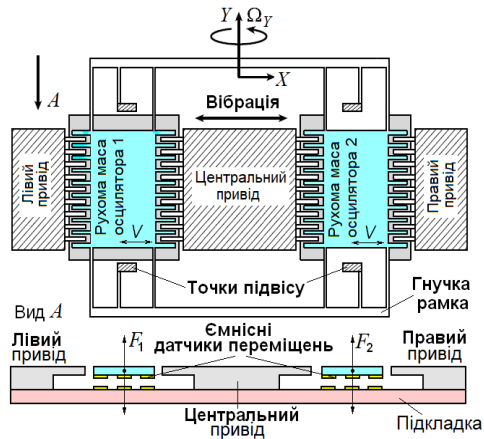


Рис. 4.3

⁶ Осцилятор - система, яка здійснює коливання

положень осциляторів (один осцилятор буде підніматися, другий – опускатися і навпаки) вимірюються ємнісними датчиками переміщень..

Обкладинки ємнісних датчиків переміщення, розташовані на рухомих масах (знизу) і на підкладці зафіксують переміщення, які можна детектувати і визначити кутову швидкість обертання Ω_z .

Технологія виготовлення такого гіроскопа ґрунтується на травленні кремнієвої пластини. Для отримання кінцевої структури застосовується реактивне іонне травлення та дифузія бору. Потім структура анодним зварюванням прикріплюється до підкладки зі скла марки Pyrex, на якій розміщуються електроди.

Принцип дії гіроскопів відомої мікроелектронної компанії *Analog Devices* аналогічний принципу побудови TF-гіроскопів. Основний елемент гіроскопа серії ADXRS, що є варіацією гіроскопа-камертона, – це закріплена на гнучких підвісах відносно анкерів, скріплених з підкладкою, рамка, усередині якої вздовж осі X здійснює поступальні коливальні рухи чутлива маса (рис. 4.4, *a*). Коливання чутливої маси збуджуються, як і в базовій патентованій конструкції TF-гіроскопа (рис. 4.3), за допомогою електростатичних приводів гребінчастої структури (рис. 4.4, *б*).

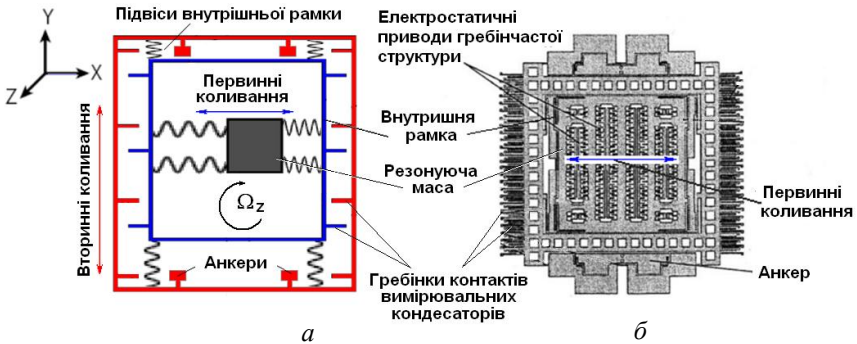


Рис. 4.4

Коли підкладка нерухома (або рухається прямолінійно та рівномірно), внутрішня рамка не коливається. Якщо ж почати обертати таку структуру навколо осі Z з кутовою швидкістю Ω_z , (див. рис. 4.4, *a*), то під дією сили Коріоліса виникнуть вимушені коливання рамки уздовж осі Y .

На зовнішній поверхні рамки та на підкладці розташовані гребінки контактів, які утворюють систему вимірювальних конденса-

торів. Під час коливань рамки відносно підкладки відстані між зубцями гребінки змінюються, відповідно змінюється й ємність.

Проблема компенсації лінійних прискорень і вібрацій корпусу в приладах серії ADXRS вирішена за рахунок розміщення на одній підкладці двох однакових структур, аналогічних, зображеним на рис. 4.4, б. Зовнішній вигляд кристала гіроскопа IMEMS серії ADXRS за великого збільшення показано на рис. 4.5.

У цих структурах, як і в запатентованій конструкції TF-гіроскопа, генеруються строго протифазні коливання. Виміряні сигнали, що знімаються з ємностей обох структур, надходять у диференціальну схему. При цьому сигнали, викликані коливаннями під впливом прискорення Коріоліса, будуть складатися, а викликані синфазними складовими, що зумовлені лінійними прискореннями та вібраціями, – відніматися.

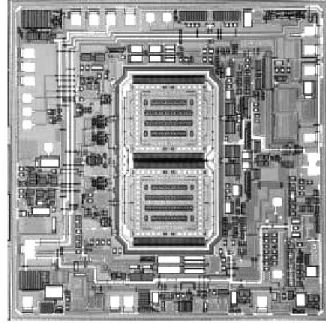


Рис. 4.5

Для збудження коливань чутливих елементів використовують або зовнішнє джерело (генератор) високочастотних сигналів, або резонансний ефект. Сигнали з формувачів високочастотних сигналів надходять на керування електростатичними приводами.

Вочевидь, що для оброблення сигналів з вимірювальних ємностей, потрібні прецизійні підсилювачі, кореляційні методи оброблення і т. ін. Технологія IMEMS (Integrated Micro Electro Mechanical System), що застосовується при виробництві гіроскопів серії ADXRS фірми *Analog Devices*, поєднує на одному кристалі всі електронні компоненти, які необхідні для формування вихідного сигналу, з двома структурами чутливих елементів гіроскопа.

Гіроскопи сім'ї ADXRS – це одновісні прилади з лінійним аналоговим виходом (напруга на виході змінюється за лінійним законом залежно від кутової швидкості).

Компанія *Analog Devices* також випускає групу гіроскопів ADIS, базою для яких є серія ADXRS, але з розширеними функціональними можливостями: із вбудованими АЦП, із засобами термокомпенсації тощо. Подібні гіроскопи були використані в системах управління та наведення реактивних снарядів ВМФ США.

Гіроскопи з диском-вібратором

У 1994 році був продемонстрований прототип гіроскопа (рис.4.6, а), котрий являв собою нікелевий диск діаметром 1мм – обід з вісьмома напівкруглими спицями, жорстко закріпленими в центрі на полікремнієвій підкладці.

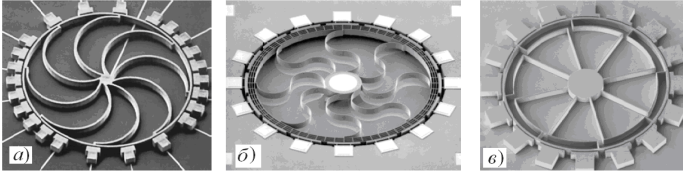


Рис. 4.6

Із зовнішнього від обода боку з невеликим проміжком розташовуються збуджувальні, вимірювальні і коригувальні електроди. Під дією напруги, що прикладається до збуджувальних електродів генерується основна мода коливань⁷ (наприклад, уздовж осі X) – диск починає витягуватися вздовж осі X і стискатися уздовж осі Y (рис.4.7, де V_x, V_y – лінійні швидкості первинних і вторинних коливань відповідно; F_K – сила Коріоліса).

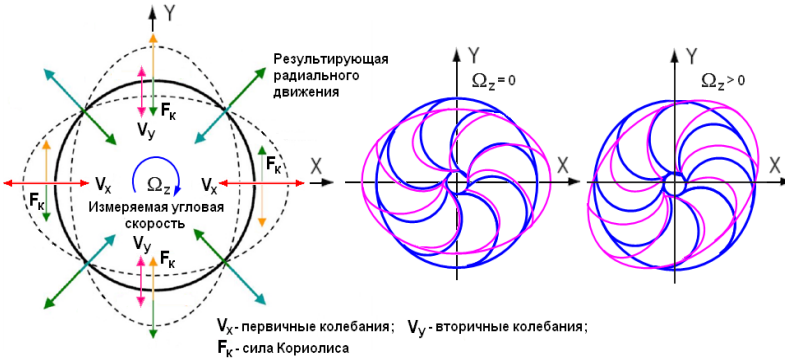


Рис. 4.7

Якщо підкладка (а з нею і диск) починає обертатися навколо осі Z , сила Коріоліса прагне викликати коливання в напрямку осі Y . Виникає вимірювальна мода коливань і головна вісь еліпса зміщується на 45° .

⁷ Розподіли, які повторюються при одному повному проході резонатора, є найбільш стабільними і називаються власними модами або модами резонатора

Амплітуда цих коливань $A_{\text{ММГ}}$ пропорційна кутовій швидкості вращення Ω_z :

$$A_{\text{ВМ}} = 4 \frac{K_{\omega} Q}{\omega_0 A_0} \Omega_z,$$

де $K_{\omega} \approx 0,37$ – кутове підсилення кільцевої структури (константа, яка визначається геометрією і є високостабільною до змін температури); Q – добротність резонатора; ω_0 – резонансна частота коливань; A_0 – амплітуда в основній моді (без обертання). Ці амплітуди реєструють за допомогою ємнісних датчиків із зовнішнього боку обода у відповідних точках.

Така конструкція має ряд істотних особливостей. Перш за все завдяки симетричній структурі резонансні частоти в основній і вимірювальній модах однакові. Крім того, вузлові точки обох мод збігаються. Такий резонатор має високу добротність, отже, і потенційно велику роздільну здатність вимірювання кутової швидкості. Він мало сприйнятливий до ударів і вібрацій. Крім того, неминучі виробничі дефекти резонатора, наприклад, асиметрію, можна усунути за допомогою електроніки, використовуючи спеціальні електроди налаштування.

Згодом була розроблена технологія створення подібних структур на полікремнії (рис. 4.6, б), а в 2002 р. був представлений ММГ з монокристалічного кремнію на скляній підкладці (рис. 4.6, в).

Подібний принцип застосований у гіроскопі з резонатором у вигляді восьмикінцевої

зірки, утвореної суперпозицією двох квадратів (рис. 4.8). Така конструкція дозволяє використовувати для вимірювань кутової швидкості коливальні моди вищих порядків, а також забезпечує більш точне електронне балансування резонатора.

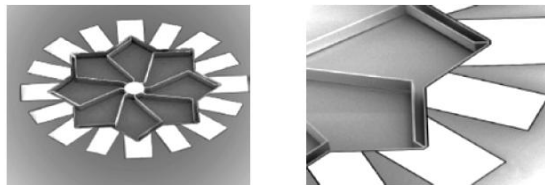


Рис. 4.8

Обертальні вібраційні мікроскопи RR-типу

Роботи з розробки обертальних вібраційних ММГ почалися у 1990 році в лабораторії Ч. Дрейпера. Конструктивну схему RR-гіроскопа, яка є базовою, зображено на рис. 4.9.

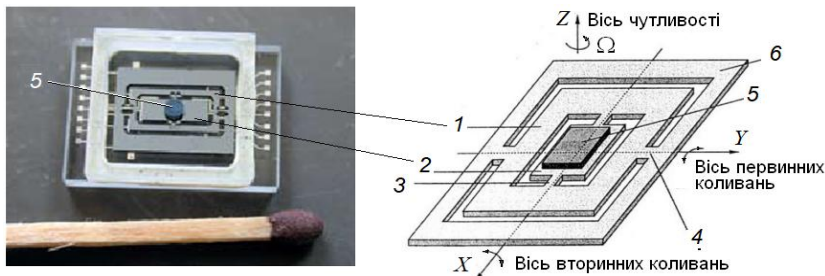


Рис. 4.9

Вона утворена з'єднанням двох рамок, виконаних у вигляді зовнішнього 1 і внутрішнього 2 плоских елементів, з'єднаних між собою і з основою 6 за допомогою торсіонів 3 і 4, осі яких взаємно перпендикулярні. Для збільшення інерційності на внутрішньому елементі розташована додаткова маса 5. За допомогою електростатичних датчиків сили зовнішньому елементу 1 надаються первинні кутові коливання відносно осі Y . Ці коливання через торсіони 3 передаються і на внутрішній елемент, надаючи йому коливальний кінетичний момент. Під час обертання приладу зі швидкістю Ω відносно осі Z виникають сили Коріоліса, які змушують коливатися внутрішній елемент відносно осі X – осі вторинних коливань. Амплітуда вторинних коливань, яка вимірюється розташованим під внутрішнім елементом ємнісим перетворювачем, пропорційна вимірюваній кутовій швидкості.



Рис. 4.10

Існує безліч варіацій такого методу. Наприклад, прилади з дисковими резонаторами, які здійснюють крутильні коливання у площині паралельній підкладці. Такі прилади являють собою резонатори у вигляді диска (рис. 4.10), закріплено-

го на торсіонах.

За допомогою системи розгону, наприклад, гребінчастих приводів, диск приводиться в крутильні коливання з частотою f_1 навколо осі, перпендикулярної його площині. Під час обертання приладу з кутовою швидкістю Ω навколо осі, що лежить в його площині, унаслідок дії сил Кориоліса виникають вторинні крутильні коливання з частотою f_2 , але вже навколо осі перпендикулярної до напрямку вектора кутової швидкості Ω .

Унаслідок цього один край диска починає підніматися, а інший – опускатися залежно від поточного напрямку коливань збудження. Інформації знімається електростатичними датчиками, які являють собою конденсатори, одні обкладинки яких містяться на нижній поверхні диска, а другі на підкладці – під диском.

Амплітуда цих коливань пропорційна кутовій швидкості Ω . Зазвичай для підсилення корисного сигналу частоту f_2 вторинних коливань вибирають дещо більші частоти f_1 .

Інерціальні вимірювальні модулі

Успіхи в розвитку технологій МЕМС привели до мініатюризації і радикального здешевлення інерціальних датчиків, які вимірюють прискорення об'єкта та його кутові швидкості з метою подальшого розв'язання завдань інерціальної навігації. А це, у свою чергу, викликало лавиноподібне зростання попиту на них у багатьох галузях – від промисловості, транспорту та військової техніки до побутових приладів та індустрії розваг. Виробники, виходячи з потреб ринку, почали пропонувати комплексні рішення – інерціальні вимірювальні модулі, які містять три осі гіроскопа, три осі акселерометра, а також мають можливість інтеграції в цей же блок електронного компаса – магнітометра, барометра та навіть приймача супутникової системи навігації.

Вирішенню таких завдань найбільшою мірою відповідає концепція вимірювального модуля із шістьма ступенями вільності, що реалізована, наприклад, фірмою *Silicon Sensing* в моделі DMU02 (рис. 4.11).

Ця відносно недорога збірка побудована на трьох гіроскопах CRG20 і тривісному акселерометрі, має цифровий інтерфейс SPI і діапазон вимірювань $\pm 300^\circ/\text{с}$ для каналу гіроскопа і $\pm 6g$ для каналу акселерометра.



Рис. 4.11

Компанія *Analog Devices* також анонсувала аналогічний інтегрований модуль ADIS16350, до складу якого входять тривісний гіроскоп і тривісний акселерометр.



Рис. 4.12

Базова модель МТІ голландської компанії *Xsens* (рис. 4.12) являє собою безплатформну інерціальну навігаційну систему середнього класу точності. Вона містить три гіроскопи, три акселерометри і три магнітометри. До складу приладу також входить мікроконтролер, здатний вирішувати завдання орієнтації та навігації.

Піонером у галузі багатовісного інерціального детектування можна назвати компанію *InvenSense*, яка першою представила компонент IMU-3000 – процесор оброблення сигналів, викликаних рухом – **Digital Motion Processor (DMP)**.

Наступними рішеннями від *InvenSense* став блок оброблення руху MPU (**Motion Processing Unit**), що застосовується в модулях MPU-6000, MPU-6050, які являють собою апаратно-програмну реалізацію дев'ятивісного сенсорного рішення без центрального процесора в корпусі типу QFN розмірами $4 \times 4 \times 0,9$ мм. У даній лабораторній роботі досліджується модуль MPU-6050, який практично ідентичний MPU-6000, але підтримує тільки I2C-комунікацію.

Модуль MPU-6050 (GY-521) (рис. 4.13) об'єднує на одному кремнієвому кристалі процесор DMP, тривісний осьовий акселерометр, тривісний гіроскоп, а також датчик температури з цифровим виходом для реалізації схеми температурної компенсації.

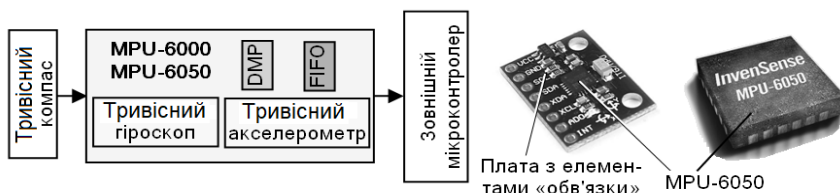


Рис. 4.13

Інтеграція в систему зовнішнього тривісного магнітометра дозволяє реалізувати в процесорі DMP дев'ятивісний алгоритм Motion Fusion і деякі функції інерціальної навігації (матриці обертання, кватерніони, кути Ейлера) без використання зовнішнього процесора.

Дані про сенсорні елементи MPU-6050 не розголошуються. Можливо тут використовується багатокомпонентний гіроскоп-акселерометр, здатний одночасно вимірювати складові кутової швидкості та прискорення.

Алгоритм Motion Fusion забезпечує програмне злиття даних від API-інтерфейсів (інтерфейс програмування додатків), керування датчиком, калібрування зміщення. Спеціальна програма мовою команд DMP записується в пам'ять щоразу після подачі живлення. Це займає близько секунди. Програма фільтрує показання акселерометра і гіроскопа. Дані передаються в буфер системної комунікації FIFO (**F**irst-**I**n, **F**irst-**O**ut).

Характеристики MPU-6050:

Живлення:

- напруга 3,7 – 5,5 В;

- струм до 10 мА;

Максимальна частота інтерфейсу I2C 400 кГц;

Діапазони гіроскопа: ± 250 , ± 500 , ± 1000 , и ± 2000 °/с;

Діапазони акселерометра: ± 2 , ± 4 , ± 8 и ± 16 g;

16 біт виведення даних;

Резонансна частота 27 кГц;

Шум $0,005$ (°/с)/ $\sqrt{\text{Гц}}$;

Розмири 20×16 мм.

Натепер найбільш досконалим продуктом компанії *InvenSense* є перший у світі дев'ятивісний датчик MPU-9255 (рис. 4.14), що включає в себе тривісний гіроскоп, тривісний акселерометр, тривісний компас і цифровий процесор (DMP).

Під час виробництва MPU-9255 використано гібридну технологію (кілька кристалів розміщуються на одній підкладці і з'єднуються за допомогою мікрозварювання). Модуль MPU9255 включає два кристала. На одному з них реалізовані MEMС-гіроскоп і MEMС-акселерометр. Другий кристал – це тривісний магнітометр виробництва компанії *Asahi Kasei Microdevices Corporation*.

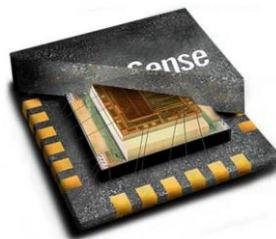


Рис. 4.14

4.2. Опис лабораторної установки

До складу лабораторної установки (рис 4.15) входять: малогабаритна поворотна установка МПУ-1 (1), на якій змонтований поворотний кронштейн 2 із закріпленим на ньому модулем МПУ-6050 3 та приєднаний до плати МПУ-6050 модуль Arduino 4, який у свою чергу з'єднаний з комп'ютером.

Поворотний кронштейн дозволяє рукоятками 11, 12 розгортати встановлений на ньому модуль МПУ-6050 на необхідні кути крену і тангажа, а поворотна установка МПУ-1 дозволяє задавати кутову швидкість обертання модулю МПУ-6050 відносно певної осі, заданої поворотним кронштейном. Кути повороту кронштейну контролюються за шкалами точного відліку 6 з ціною поділу $0,2^\circ$, а кутова швидкість обертання стола 10 установки

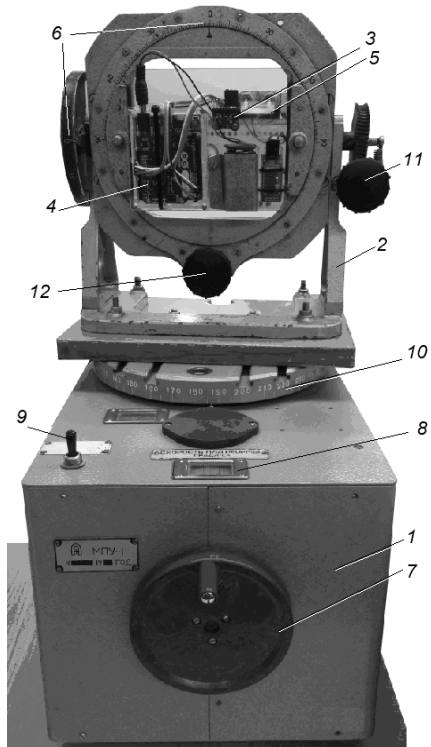


Рис. 4.15

МПУ з кронштейном на якому встановлений модуль МПУ-6050 задається обертанням маховика 7 у відповідну сторону. Величина кутової швидкості обертання контролюється за відліковим лімбом 8 у межах від $0,03$ до $150^\circ/\text{с}$, а напрям обертання задається відповідним положенням перемикача 9.

Обмін інформацією між модулем Arduino і комп'ютером забезпечується через довгий шлейф USB або через бездротову персональну мережу Bluetooth на основі модуля HC-06 (див. рис. 4.6, а). При цьому в якості джерела живлення для Arduino використовується зовнішній блок живлення на 9 В (див. рис. 4.6, б).

Апаратна частина Arduino (рис. 4.6, а) являє собою мікроконтролер, змонтований на друкованій платі, який використовується в якості платформи для розробки електронних пристроїв. Більшість плат Arduino забезпечені мінімально необхідним набором об'язки для нормальної роботи мікроконтролера (стабілізатор живлення, кварцовий резонатор, ланцюжки скидання і т. п.). Мікроконтролери для Arduino відрізняються наявністю попередньо прошитого в них завантажувача. За допомогою цього завантажувача користувач завантажує розроблювану програму в мікроконтролер без використання традиційних окремих апаратних програматорів. Завантажувач з'єднується з комп'ютером через інтерфейс USB.

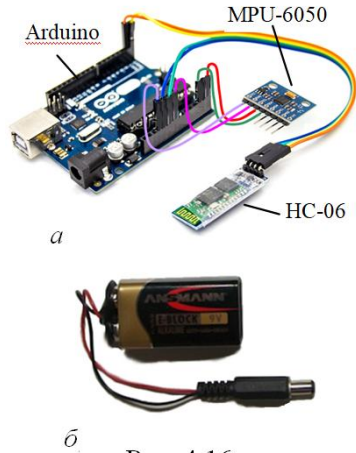


Рис. 4.16

Програмна частина Arduino складається з безкоштовної програмної оболонки (IDE) для написання програм, їх компіляції та програмування апаратури.

Arduino може використовуватися як для створення автономних об'єктів автоматики, так і підключатися до програмного забезпечення на комп'ютері через стандартні дротові й бездротові інтерфейси.

У додатку до методичних вказівок детально описане середовище розробки Arduino.

4.3. Порядок і методика виконання лабораторної роботи

Підготовка до перевірки. Включити комп'ютер і запустити середовище розробки Arduino. Відкриється заготовка лабораторної роботи - скетч «MPU6050m3».


Ознайомитися з лістингом скетчу «MPU6050m3», який наведено у додатку 1. Перевірити під'єднання чипа «MPU6050m3», який встановлений на поворотному кронштейні, до модуля Arduino. Встановити перемикач джерела живлення Arduino (5 на рис. 4.15) у нижнє положення. На модулі Arduino повинен світитися зелений світлодіод живлення, позначений PWR.

4.3.1. Калібрування датчика кутової швидкості

В роботі з метою спрощення досліджень здійснюється перевірка тільки одного каналу датчика кутової швидкості – каналу крену (осі OX).

Для калібрування цієї осі датчика кутової швидкості в програмі «MPU6050m3» «розкоментувати» строку виведення інформації про значення кутової швидкості w_x , задати $w_x_dreif = 0$.

Клацнувши кнопку **Upload** панелі інструментів, скопіювати програму і "прошити" її в мікроконтролер Ардуіно.

Натиснувши на панелі інструментів Ардуіно кнопку моніторингу послідовної шини , почати отримувати дані про кутову швидкість ω_x , що надходять від контролера Ардуіно на комп'ютер по послідовному інтерфейсу.

Спостерігаючи, 25 ... 30 сек за показами кутової швидкості, відключити в моніторі параметр «Автопрокрутка» (віконце в нижній лівій частині вікна монітора). Потім, клацнувши у вікні монітора, виділити всі (Ctrl_A) і скопіювати (Ctrl_C) вміст вікна. Закрийте монітор порту.

Відкривши Microsoft Excel, вставити в нього як стовпець скопійовані дані. Замінити в стовпці знак крапки на знак коми. Використовуючи свої навички роботи з Microsoft Excel, побудувати за даними таблиці Excel графік значень ω_x .

Якщо на графіку є викиди, які у декілька разів перевищують середнє значення ω_x , (див. рис. 4.17), то вважати це похибками побудови графіку і замінити їх значення в таблиці на величину 1,88.

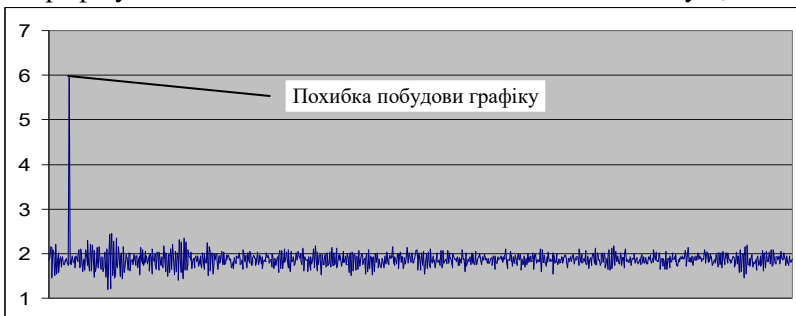


Рис. 4.17

Скопіювати побудований графік і вставити його у звіт з лабораторної роботи.

Розрахувати середнє значення даних стовпця таблиці Excel, яке є систематичною складовою дрейфу датчика кутової швидкості за віссю X . Занести цю величину у звіт.

В програмі «MPU6050m3» задати w_x_dreif рівною величині розрахованого дрейфу датчика кутової швидкості. Скопіювати програму і "перепрошити" її в мікроконтролер Ардуїно.

Повторити експеримент з оцінювання середнього значення дрейфу датчика кутової швидкості. Якщо середнє значення дрейфу буде перевищувати за модулем $0,0999^\circ/\text{сек}$, то отримане значення додати до w_x_dreif і знову повторити експеримент.

Зафіксувати середнє значення дрейфу датчика кутової швидкості. Скопіювати підсумковий графік експерименту (рис. 4.18) і вставити його у звіт з лабораторної роботи.

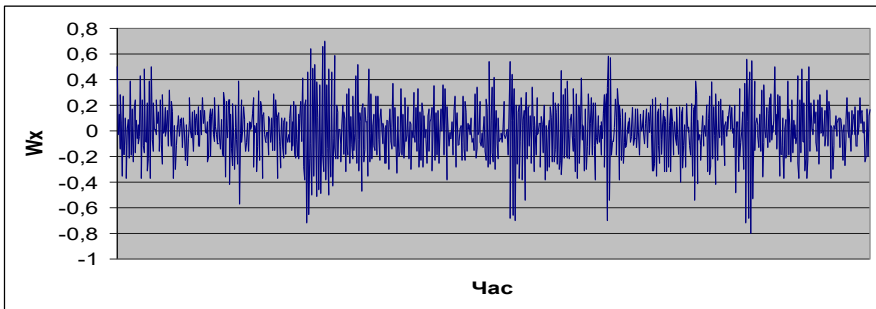


Рис. 4.18

Візуалізацію результатів дослідження цього та наступних пунктів роботи можна також здійснювати з використанням програми побудови графіків математичних функцій Graph. Правила роботи з програмою Graph наведені у додатку 2 до методичних вказівок.

4.3.2. Оцінювання впливу температури на покази датчика кутової швидкості модуля MPU-6050

Для оцінювання впливу температури на покази датчика кутової швидкості запустити моніторинг послідовної шини та почати отримувати дані про кутову швидкість ω_x , одночасно використовуючи фен здійснити нагрівання модуля протягом 20 ... 30 сек.

Використовуючи раніше застосовану методику, скопіювати отримані дані та побудувати за ними в Excel графік значень ω_x , який зазвичай має вигляд (рис. 4.19).

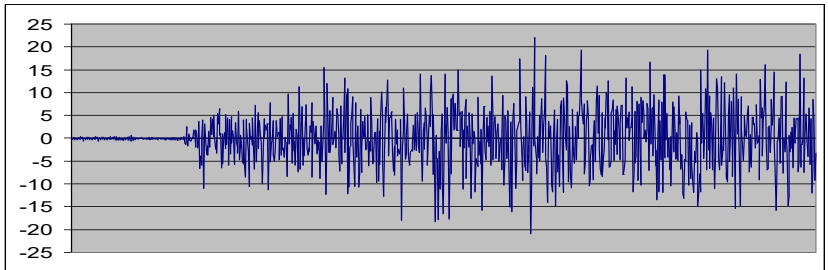


Рис. 4.19

Переконатися у суттєвому збільшенні шумової складової вихідних даних та в практично незмінному значенні систематичної складової дрейфу датчика кутової швидкості.

4.3.3. Зняття статичних характеристик датчика кутової швидкості у складі модуля MPU-6050

Для зняття статичних характеристик датчика кутової швидкості в програмі «MPU6050m3» «закоментувати» строку виведення інформації про значення кутової швидкості w_x та «розкоментувати»

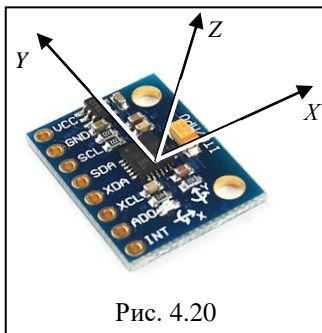


Рис. 4.20

строку виведення інформації про згладжені (відфільтровані) значення кутової швидкості w_x_f . Згладжування інформації про кутову швидкості дозволяють фіксувати її середнє усталене значення.

Рукою 12 Розвернути платформу кронштейну з закріпленим модулем MPU-6050 таким чином (рис. 4.20), щоб його вимірювальна вісь OX співпадала з вертикальною орієнтацією осі обертання установки МПУ-1.

Від'єднати від модуля Arduino кабель USB і підключити до Arduino автономне джерело живлення (9-вольтову батарейку «КРОНА»). Впевнитися у підключенні до Arduino Bluetooth-модуля HC-06, а до комп'ютера USB Bluetooth-адаптера, які забезпечують бездротову мережу обміну інформацією між модулем Arduino і комп'ютером. В меню Tools → Serial Port обрати сом-порт передачі даних на комп'ютер.

Клацнувши кнопку **Upload** панелі інструментів, скопіювати програму і "прошити" її в мікроконтролер Ардуіно.

Натиснувши на панелі інструментів Ардуіно кнопку

моніторингу послідовної шини, впевнитися, про початок надходження інформації про кутову швидкість ω_x від контролера Ардуїно на комп'ютер.

При наявності довгого кабель USB можна провести наступні дослідження без використання бездротової персональної мережі Bluetooth на основі модуля HC-06, але при цьому необхідно періодично змінювати напрям обертання МПУ-1.

Увімкнути установку МПУ-1. Змінюючи кутову швидкість обертання платформи МПУ-1, через кожні $5^\circ/\text{с}$ ($\pm 5^\circ/\text{с}$) знімати покази датчика кутової швидкості, заносючи їх в таблицю 4.1.

Змінивши напрям обертання поворотного стола МПУ-1, повторити зняття статистичних характеристик.

За даними таблиці 4.1 побудувати графік $\omega_x = f(\omega_{x \text{ вим}})$. Оцінити величини похибок

$$\Delta\omega_x = \omega_x - \omega_{x \text{ вим}}$$

4.3.4. Дослідження варіантів отримання інформації про кутову орієнтацію модуля MPU-6050

Використовуючи рукоятку I2 конштейну (див. рис. 4.15), зорієнтувати вимірювальну вісь OX модуля MPU-600, що закріплений на конштейні, паралельно столу поворотної установки МПУ-1.

В програмі «MPU6050m3» «закоментувати» строку виведення інформації про про згладжені (відфільтровані) значення кутової швидкості wx_f

```
Serial.println(wx_f)
```

та «розкоментувати» строку виведення інформації про кутову орієнтацію, зокрема про кут gam та строку виведення даних з темпом 0,5 сек

```
Serial.println(gam)
```

```
if( (timer - serial_time) >= 0.5 ) // Вивід через 0,5 сек
```

Інформацію про кутову орієнтацію модуля MPU-6050 отримувати

Таблиця 4.1

Значення кутової швидкості ω_x ($^\circ/\text{с}$)		Покази датчика $\omega_{x \text{ вим}}$ ($^\circ/\text{с}$)	
0	0		
5	-5		
10	-10		
15	-15		
20	-20		
25	-25		
30	-30		
35	-35		

ють шляхом інтегрування сигналу кутової швидкості. В програмі «MPU6050m3» використовується найпростіший метод інтегрування – метод Ейлера

$$\text{gam}=(\text{gam}+\text{wx}*\text{dt});$$

де $\text{dt} = \text{timer}-\text{t}$ – крок інтегрування.

Клацнувши кнопку **Upload** панелі інструментів, скомпілювати програму і "прошити" її в мікроконтролер Ардуіно.

У програмі передбачено примусове завдання з клавіатури (клавіша «0») початкового нульового кута gam . Тому натиснувши на панелі інструментів Ардуіно кнопку моніторингу послідовної шини і почавши отримувати дані про кут gam , натиснути на клавіатурі комп'ютера клавішу «0», а потім у вікні монітора (верхній правий кут) клацнути кнопку «Отправить». Впевнитися, що вимірник кут заретувався (данні про кут gam обнулилися)

Змінюючи рукояткою конштейну 11 (див. рис. 4.15) кутове положення модуля MPU-6050 задавати йому кутову орієнтацію $\pm 45^\circ$. Залишати кронштейн в крайніх положеннях 2...3с. Наприкінці повернути кронштейн в нульове положення.

У лівій нижній частині вікна моніторингу зняти галочку режиму "Автопрокрутка". Потім, клацнувши у вікні монітора, виділіть все (Ctrl_A) і скопіювати (Ctrl_C) вміст вікна. Закрити монітор порту.

Використовуючи раніше застосовану методику, побудувати за отриманими даними в Excel графік значень $\text{gam}(t)$. Оцінити якість отриманої інформації про зміну кутового положення модуля MPU-6050.

Повторити дослідження, але попередньо виконати покращене калібрування датчика кутової швидкості відповідно до п. 3.1. Оцінити якість отриманої інформації про зміну кутового положення модуля MPU-6050 з покращеним калібруванням датчика кутової швидкості.

Зміст звіту

В результаті виконання лабораторної роботи кожен студент представляє акуратно оформлений звіт, який містить цифровий і графічний матеріал проведених досліджень. У звіті повинні бути висновки з кожного пункту роботи.

Додаток до лабораторної роботи №4

Лістинг програми лабораторної роботи

```
#include<Wire.h>
const int MPU_addr=0x68; // спрощена I2C адреса MPU-6050.
/*Змінні для зберігання даних, що повертаються процесором MPU-6050 */
int16_t AcX,AcY,AcZ,Tmp,GyX,GyY,GyZ;
/* Змінні що використовуються в програмі */
float INTEGR_DELAY = 0.05;
double wx,wx_f, wx_dreif, gam, dt;
int val;// сигнал аретування, що надходить від комп'ютера
float timer, t=0, serial_time=0;

void setup()
////////// Запуск гіроскопа
{
  Wire.begin();
  Wire.beginTransmission(MPU_addr);
  Wire.write(0x6B);//Виконуємо запис у регістр енергозбереження MPU-6050
  Wire.write(0); // Пробуджуємо MPU-6050 і встановлюємо його в нуль
  Wire.endTransmission(true);
  Serial.begin(9600); //Підключення монітору порту зі швидкістю обмену
данми з комп'ютером 9600 біт/с
}
void loop()
{
  Wire.beginTransmission(MPU_addr);
  Wire.write(0x3B); // Почати з регістра 0x3B (ACCEL_XOUT_H)
  Wire.endTransmission(false);
  Wire.requestFrom(MPU_addr,14,true);/* Запросити в цілому 14 регістрів */
  AcX=Wire.read()<<8|Wire.read();
  AcY=Wire.read()<<8|Wire.read();
  AcZ=Wire.read()<<8|Wire.read();
  Tmp=Wire.read()<<8|Wire.read();
  GyX=Wire.read()<<8|Wire.read();
  GyY=Wire.read()<<8|Wire.read();
  GyZ=Wire.read()<<8|Wire.read();

  ///////////Калібрування датчика кутової швидкості
  wx=((double)GyX/131.0);
  //wx_dreif=0;
  wx_dreif=1.5724-0.01491-1.182+1.17;
  wx=wx-wx_dreif;
```

```
////////////////////////////////////  
////////////////////////////////////Процедури інтегрування
```

```
timer = (float)micros()/1000000;  
dt=timer-t;//крок інтегрування
```

```
if( (dt) >= INTEGR_DELAY )//крок інтегрування =0.05  
{  
t=timer;  
wx_f=wx_f+((wx-wx_f)/0.5)*dt;  
gam=gam+wx*dt;//інтегрування кутової швидкості, щоб отримати кут
```

```
////////////////////////////////////  
////////////////////////////////////Аретування гіроскопа
```

```
if (Serial.available())// Перевірка, наявності сигналу аретування  
{  
val = Serial.read();// Читання інформації з клавіатури
```

```
/* Якщо з клавіатури задається 1 (val=1), то гіроскоп аретується (gam=0) */  
if (val == '0') {gam=0;}  
else  
gam=gam;  
}
```

```
/* Виведення даних про кутову швидкість або про кут, що надходять від кон-  
тролера Ардуіно на комп'ютер за послідовним інтерфейсом */
```

```
//if( (timer - serial_time) >= 0.1 ) // Вивід через 0,1 сек
```

```
if( (timer - serial_time) >= 0.5 ) // Вивід через 0,5 сек
```

```
//if( (timer - serial_time) >= 0.05 ) //Вивід через 0,05 сек
```

```
{  
//Serial.println(wx_f);  
Serial.println(gam);  
//Serial.println(wx);  
}  
}
```

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Мета роботи

Метою лабораторної роботи є набуття практичних навичок в проведенні експериментальних досліджень інформаційних мікропроцесорних пристроїв, в програмуванні мікропроцесора, в калібруванні, масштабуванні та в дослідженні характеристик мікромеханічних акселерометрів.

Методичні вказівки

Повторити такі теоретичні питання дисципліни:

- поняття про уявне та справжнє прискорення;
- поняття про прискорення сили тяжіння;
- варіанти побудови МЕМС акселерометрів;
- принципи побудови інерціальних вимірювальних модулів;

Завдання на виконання лабораторної роботи

1. Провести калібрування та масштабування акселерометра у складі мікросхеми MPU-6050 (GY-521).
2. Оцінити рівень шумів МЕМС акселерометра.
3. Зняти статичні характеристики МЕМС акселерометра.
4. Проаналізувати покази акселерометра при його вільному падінні.

5.1. Скорочені теоретичні питання

Основним датчиком, що видає інформацію про рух об'єкта під дією активних сил, є акселерометр – прилад, який вимірює проекцію уявного прискорення (різницю між справжнім прискоренням об'єкта та прискоренням сили тяжіння). Обов'язковою складовою чутливого елемента акселерометра (рис. 5.1) є інерційна маса (ІМ), яка закріплюється в пружному підвісі. Відхилення ІМ у корпусі приладу від її початкового положення за наявності уявного прискорення корпусу a містить інформацію про величину цього прискорення. Демпфер у

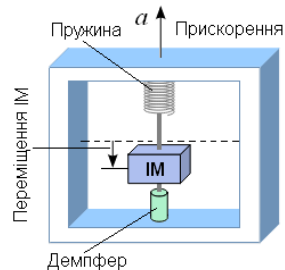


Рис. 5.1

конструкції акселерометра гасить коливання ІМ. Чим більше уявне прискорення, тим сильніше деформується пружина, змінюючи показання приладу.

За конструкцією акселерометри поділяються на однокомпонентні, двокомпонентні, трикомпонентні. Відповідно, вони дозволяють вимірювати прискорення вздовж однієї, двох і трьох осей.

У разі розташування акселерометра на нерухомому відносно поверхні землі об'єкті $\bar{w} = 0$ він буде вимірювати уявне прискорення $\bar{a} = -\bar{g}$, що створюється силою опори, яка дорівнює за величиною, але протилежна за напрямком вектору напруженості поля сил тяжіння в точці перебування об'єкта.

Площина горизонту в умовах нерухомої відносно Землі основи визначається таким напрямком осі чутливості акселерометра, за якого його показання дорівнюють нулю. Нагадаємо (рис. 5.2), що



Рис. 5.2

саме напрямок вектора напруженості поля сил тяжіння (вектора прискорення сили тяжіння g , зумовленого прискоренням сили земного тяжіння g_T та відцентровим прискоренням від обертанням Землі $f_{вц}$, яке спрямоване перпендикулярно до полярної осі) визначає справжню вертикаль.

Це положення широко використовують для горизонтування площин деяких об'єктів, зокрема гіроплатформ інерціальних навігаційних систем (ІНС) за допомогою акселерометрів.

Відомо, що за вільного падіння акселерометра з прискоренням, що дорівнює прискоренню сили тяжіння $\bar{w} = \bar{g}$, його показання $\bar{a} = \bar{w} - \bar{g}$ будуть дорівнювати нулю. Проте у горизонтальному польоті, коли піднімальна сила літака компенсує силу тяжіння, можна стверджувати, що акселерометр буде вимірювати уявне прискорення маси свого чутливого елемента $\bar{a} = -\bar{g}$, яке створюється піднімальною силою горизонтального польоту і дорівнює за величиною, але протилежно за напрямком вектору напруженості поля сил тяжіння \bar{g} .

За останні роки найширшого застосування у практиці побудови

технічних систем набули акселерометри, засновані на мікроелектромеханічних системах – МЕМС-акселерометри.

Мікромеханічні інерціальні датчики і зокрема МЕМС-акселерометри почали розробляти в лабораторії Ч. Дрейпера у 1984 р. Натепер МЕМС-акселерометри випускають близько 50 фірм. За рік реалізуються сотні мільйонів таких датчиків.

МЕМС акселерометри можна класифікувати за методами перетворення відхилення ІМ в електричний сигнал (ємнісні, п'єзоелектричні, п'єзорезистивні акселерометри); за конструктивним виконанням (МЕМС акселерометри поверхневої і об'ємної конструкції), а також за кількістю вимірювальних осей (одно-, дво- і тривісні акселерометри); за характером переміщення чутливого елемента відносно корпусу приладу (осьові та маятникові акселерометри). Можуть бути запропоновані й інші ознаки класифікації МЕМС-акселерометрів.

Ємнісні МЕМС-акселерометри

Прикладом МЕМС акселерометра може служити ємнісний акселерометр *поверхневої* конструкції компанії *Analog Devices* виконаний на полікристалічному кремнії. Кристал кремнію розміром 3,05×3,05 мм заповнений головним чином схемами формування сигналу, що оточують мініатюрний датчик розміром 1×1 мм, розташований в його центрі. Датчик виготовляють методом осадження тонких плівок певного матеріалу на основу кристала з подальшим витравлюванням необхідної конструкції його рухомої частини.

Основним конструктивним вузлом такого датчика є опорна рамка і чутливий елемент, який складається з ІМ і пружних елементів підвісу (рис. 5.3).

Розрізняють хрестоподібні (рис. 5.3, а), Z-подібні кососиметричні (рис. 5.3, б), та симетричні (рис. 5.3, в), а також паралельні підвіси (рис. 5.3г).

Перетворювач вихідних сигналів акселерометра являє собою конденсаторну структуру з повітряним діелектриком, рухомі полікрем'яні обкладки якого ви-

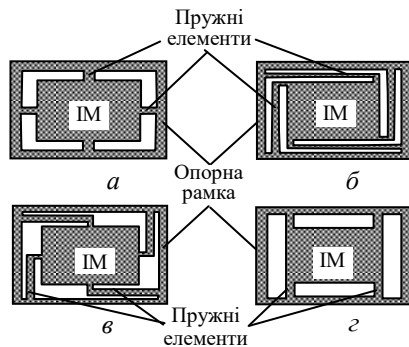


Рис. 5.3

травлюються у вигляді зубців гребінки (пальцеподібних виступів) по краях плоскої ІМ. Нерухомі обкладки-зубці цього конденсатора – це алюмінієві консольні стрижні, що розміщені на висоті 1 мкм від поверхні кристала в повітрі на полікрем'яних стовпчиках-анкерах, приварених до кристала на молекулярному рівні. На рис. 5.4 показано схему (рис. 5.4, а), конструкцію (рис. 5.4, б) і багато-разово збільшені елементи кристала акселерометра типу ADXL (рис. 5.4, в).

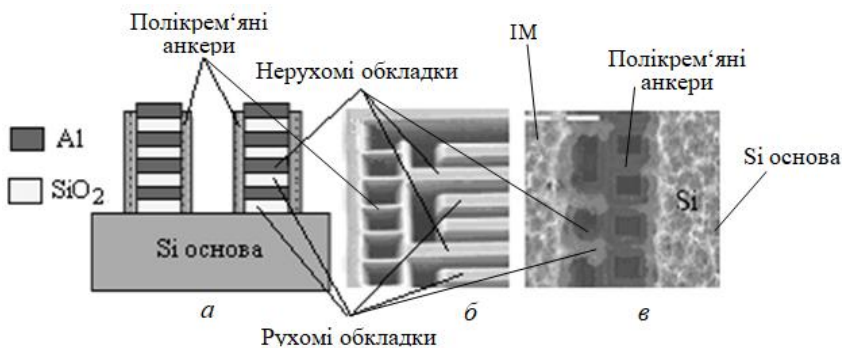


Рис. 5.4

Отже чутливий елемент MEMS акселерометра являє собою підвішену на пружинах ІМ (рис. 5.5), краї якої мають вигляд двох гребінок. Гребінки ІМ можуть здійснювати обмежені переміщення всередині інших, нерухомих гребінок, формуючи таким чином дві

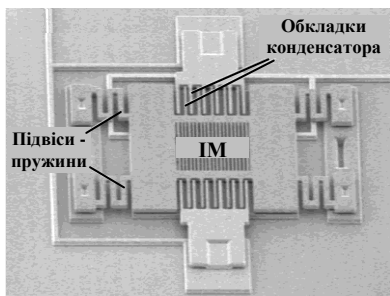


Рис. 5.5

конденсаторні схеми. Зміна ємностей цих конденсаторів унаслідок збільшення та зменшення відстані між «пальцями» гребінок пропорційна лінійному прискоренню. Чутливий елемент герметично ущільнюється на рівні підкладки об'ємним мікромеханічним ковпачком, який створює середовище, що забезпечує газове демпфування, та виконує функцію захисту

від механічних ударів.

Оскільки переміщення ІМ має відбуватися в площині полікрем'яної плівки, то і вісь чутливості датчика лежить в цій площині,

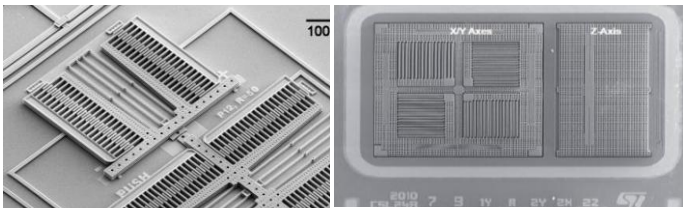
яка паралельна площині друкованої плати, до якої припаюється датчик. Мікросхеми, що оточують датчик, формують вихідний сигнал акселерометра.

Компанія *Analog Devices* також випускає тривісні MEMC-акселерометри типу ADXL375, що розраховані на прискорення до $\pm 200g$.

Одна з найбільших європейських мікроелектронних компаній – компанія *STMicroelectronics* як і компанія *Analog Devices* очолює передові дослідження в MEMC-технологіях. Асортимент MEMC-датчиків компанії *STM* переважно складають акселерометри та гіроскопи.

Сенсорний елемент MEMC-акселерометрів компанії *STM* є елементом ємнісного типу за конструкцією аналогічній акселерометрам типу ADXL і формується з використанням процесу, що отримав назву THELMA (**T**hick **E**pi-**P**oly **L**ayer for **M**icroactuators and **A**ccelerometers). Технологічний процес THELMA – поверхневий процес мікрооброблення, заснований на змінному формуванні на підкладці товстих і тонких шарів полікремнію для створення об’ємних мікромеханічних структур. Це дозволяє формувати в одному чипі механічні елементи з лінійними та кутовими переміщеннями, які прикріплюються до підкладки в декількох анкерних точках.

Компанія *STM* випускає низку двовісних (рис. 5.5, *a*) і тривісних (рис. 5.5, *б*) інтегральних лінійних акселерометрів типу LIS, в яких сенсорний чип комбінується із чипом ASIC.



a Рис. 5.5 *б*

Компанія *Freescale Semiconductor* також є широко відомим виробником напівпровідникових компонентів, серед яких є і ємнісні MEMC-акселерометри.

Інтегральний акселерометр компанії *Freescale Semiconductor* являє собою ємнісну мікромеханічну поверхневу структуру, яка називається G-коміркою, що об’єднує в одному корпусі датчик і

схеми оброблення сигналу та температурної компенсації.

G-комірка (рис. 5.6) це мікромеханічна структура з полікремнію, в якій ІМ являє собою рухому обкладку конденсатора. Інерційна маса закріплена в декількох точках на підкладці та здатна переміщатися під дією прискорення a між нерухомими верхнім і нижнім електродами. Даний принцип реалізований, наприклад, в двокристалічному акселерометрі M1220D.

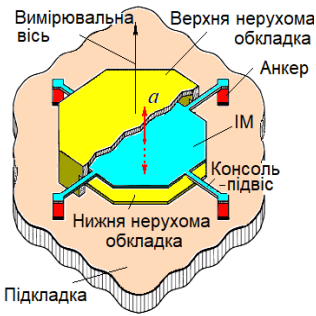


Рис.5.6

G-комірка, сформована за допомогою стандартних технологій поверхневого мікрооброблення, герметично ущільнюється на рівні підкладки за допомогою об'ємної підкладки-ковпачка, яка виконує функцію захисту G-комірки від механічних ударів. Крім того під ковпачком створюється середовище, яке забезпечує газове демпфування рухомої обкладки.

На відміну від акселерометрів *Analog Devices* чутливою віссю акселерометрів *Freescale* є вісь, що перпендикулярна до лицьової поверхні датчика.

Залежно від характеру переміщення ІМ відносно корпусу приладу розрізняють акселерометри з лінійним переміщенням чутливого елемента відносно корпусу – *осьові акселерометри* й акселерометри з кутовим переміщенням чутливого елемента відносно корпусу – *маятникові акселерометри*.

Основними схемами (рис. 5.7) побудови маятникових МЕМС-акселерометрів є схеми з одинарними (рис. 5.7, а) і подвійними

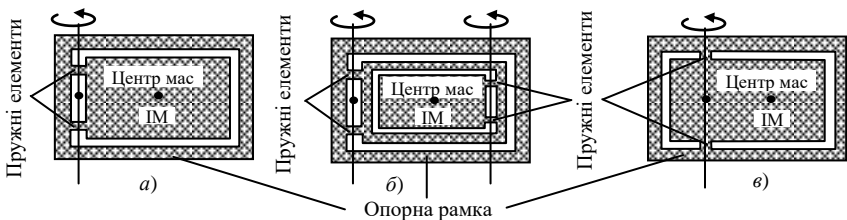


Рис. 5.7

(рис. 5.7, б) маятниками з пружними елементами у вигляді балок, а

також схема з одинарним маятником з пружними елементами у вигляді торсіонів (рис. 5.7 в).

У деяких датчиках прискорення німецької компанії *Robert Bosch GmbH* реалізується саме маятниковий принцип побудови MEMC-акселерометрів (рис. 5.8). В акселерометрі з одинарним маятником, підвішеним на торсіонах, прискорення у вертикальному напрямку буде утворювати нахил ІМ, в бік якої зміщений центр маси рухомого крила обертової рамки.

Акселерометри Bosch реалізують ємнісний диференційний принцип вимірювання. Маса й електроди ущільнюються на рівні підкладки з використанням об'ємної підкладки-ковпачка. Розміщення сенсорного елемента й ASIC ґрунтується на концепції 3D SiP корпусування.

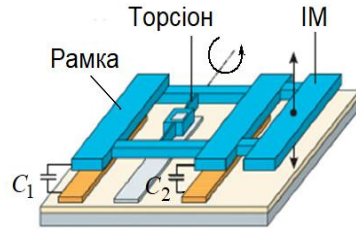


Рис. 5.8

Ємнісні акселерометри – найбільш масова категорія серед сучасних MEMC-датчиків. Утім натеper досить актуальні ще дві категорії акселерометрів: п'єзоелектричні та п'єзорезистивні.

П'єзоелектричні акселерометри

В основу п'єзоелектричних сенсорів вібрацій і прискорень покладено п'єзоелектричний ефект (не плутати з п'єзорезистивним). Цей ефект полягає у прямому перетворенні механічної енергії в електричну в матеріалах, що мають кристалічну структуру, яка включає в себе електричні диполі. Ці датчики працюють в частотному діапазоні менше 2...5 кГц. Вони також мають хороші пригнічення поза осьових шумів, високу лінійність і широкий температурний діапазон (до 1200 °С). Хоча іноді в них як чутливі елементи застосовують кварцові кристали, більшого поширення для цих цілей набули керамічні п'єзоелектричні матеріали, такі як титанат барію, титанат-цирконат свинцю і метаніобат свинцю.

Принципову схему п'єзоелектричного маятникового акселерометра показано на рис. 5.9. Кристал п'єзоматеріалу поєднується з ІМ, а електричний контакт п'єзо-елемента в системі здійснюється за допомогою двох тензодатчиків, розташованих на кожному боці кристала.

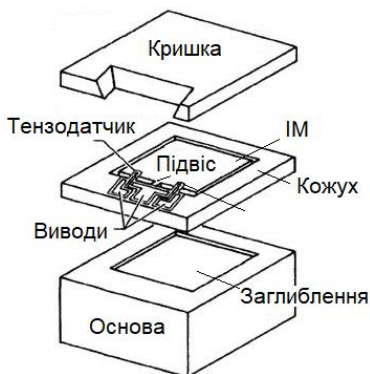


Рис. 5.9

Прискорення, що діє на датчик призводить до різниці переміщень кожуха та ІМ, в результаті чого виникає сила, яка деформує кристал п'єзо-матеріалу. Відбувається перерозподіл зарядів з обох сторін кристала, при цьому вихідний сигнал акселерометра прямо пропорційний прискоренню. За допомогою електродів виводів зміни в системі передаються блоку керування.

Конструкція простого одновісного акселерометра повністю аналогічна звичайним

п'єзоелектричним датчикам. Але через дуже великий вихідний опір чутливого елемента, на підкладці також розташований польовий транзистор, що виконує роль підсилювача напруги.

П'єзорезистивні акселерометри

Електричний опір чутливих елементів п'єзорезистивного акселерометра змінюється пропорційно механічній напрузі, прикладеній до встановленої на пружинах рухомій масі, дозволяючи створювати вихідний сигнал.

П'єзорезистивний акселерометр (рис. 5.10) являє собою кремнієву структуру 2 з консольними балками, які підтримують ІМ 3,

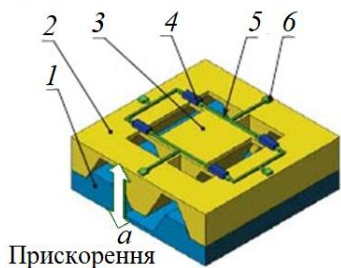


Рис. 5.10

сформовану на основі 1. Для детектування прискорення використовуються згинальні імплантовані кремнієві резистори 4 (вимірники механічної напруги, відомі як strain gauges, або strain gages), що приєднані до мікро-механічних кремнієвих консольних балок. Прискорення ІМ *a* викликає вигин балок і змінює опір резисторів, увімкнених у міст Уітстона 5, створюючи розбалансування цього моста.

У діагональ моста 6, як правило, вмикаються вимірники напруги, які фіксують діючі прискорення.

Процес виготовлення п'єзорезистивної структури заснований на технологіях об'ємної кремнієвої мікромеханіки. Монтаж механічних елементів здійснюється методом розварювання дротяних виводів або за допомогою технології наскрізних металізованих отворів через кремній – методом TSV. П'єзорезистивні акселерометри допускають і мультиосьове виконання.

Провідними виробниками сучасних п'єзорезистивних MEMC-акселерометрів є компанії *Endevco*, *Entran*, *Measurement Specialities (ICSensors)*, *Sensor One Technologies*.

Є кілька важливих характеристик, які відрізняють п'єзорезистивні акселерометри від п'єзоелектричних. П'єзоелектричні акселерометри чутливі тільки до динамічних змін прискорення і не чутливі до статичних. Нижня межа частот таких акселерометрів – 1...3 Гц. П'єзорезистивні акселерометри чутливі як до статичних, так і до динамічних змін прискорення. Тому, крім основного завдання – завдання вимірювання прискорення, такі прилади можна застосовувати для вимірювання нахилу або орієнтації в просторі.

Додаткова характеристика, яка заслуговує уваги, це резонансна частота. П'єзоелектричні акселерометри мають резонансну частоту в діапазоні 10...30 кГц, п'єзорезистивні – у діапазоні 500...5000 Гц. Такий діапазон змушує забезпечувати амортизацію більшості п'єзорезистивних приладів. Амортизація проводиться повітрям або кремнійорганічним маслом. Це необхідно як для захисту приладу, так і для розширення діапазону частоти. У п'єзо-електричних акселерометрах амортизацію зазвичай не виконують.

Інші варіанти побудови MEMC-акселерометрів

Крім розглянутих є і більш екзотичні типи MEMC-акселерометрів, наприклад, оптоволоконний акселерометр OS-7100 (рис. 5.11) фірми *Micron Optics*, заснований на технології оптичної решітки Брегга (різновид дифракційної ґратки).

Чутливим елементом датчиків є оптична ґратка Брегга. Принцип роботи датчиків на основі оптичних ґраток Брегга такий: під час проходження світла по оптоволокну відбувається його часткове відбиття від неоднорідностей в

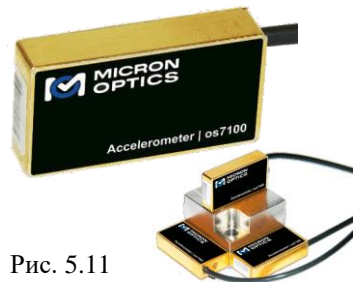


Рис. 5.11

серцевині оптоволокна, тобто від бреггівської ґратки. Довжина хвилі відбитого світла кратна періоду неоднорідностей в решітці. Під час деформації під впливом прискорення оптоволокна датчика деформується решітка Бреґга, таким чином, змінюється період неоднорідності у ґратці і, як наслідок, змінюється відбита довжина хвилі датчика. За величиною зміни відбитої довжини хвилі визначається величина відносної деформації і відповідно величина діючого прискорення.

Оригінальний принцип роботи покладено і в термічні датчики прискорення компанії *MEMSIC Inc* (рис. 5.12, *а*). У них як чутливий елемент використовується гарячий газ. Елементарна комірка датчика при цьому має герметичну структуру з нагрівником і датчиками температури (рис. 5.12, *б*).



Рис. 5.12

У спрощеному вигляді принцип роботи такої структури такий: нагрівник нагріває молекули газу в камері, а надчутливі датчики фіксують диференціальну температуру цього газу.

Як датчики температури використовують або інтегровані в підкладку терморезистори, або нанесені на її поверхню термопари.

У стані спокою газ рівномірно розподіляється по камері. За найменшого прискорення нагріті молекули починають рухатися у бік прискорення. При цьому різниця кількостей молекул, що потрапляють на датчики 1 і 2 збільшується, відповідно змінюються і показання датчиків температури. За різницею показань можна визначити прискорення. Без прискорення відсутня й конвекція, гази різних температур вільно дифундують і показання термодатчиків вирівнюються.

Така система не має механічних рухомих частин, а отже, теоретично вільна від виникнення резонансу і несприйнятлива до ударних навантажень.

5.2. Опис лабораторної установки

У лабораторній роботі досліджується мікромеханічний акселерометр, що входить до складу інерціального вимірювального модулю MPU-6050⁸, що об'єднує на одному кремнієвому кристалі процесор DMP, тривісний осьовий акселерометр, тривісний гіроскоп, а також датчик температури з цифровим виходом для реалізації схеми температурної компенсації.

До складу лабораторної установки (рис. 5.13) входять: поворотний кронштейн 1 із закріпленою на ньому легко знімною платою 2 з вимірювальним модулем MPU-6050 3 та приєднаний до MPU-6050 модуль Arduino Leonardo 4, який у свою чергу з'єднаний з комп'ютером 5. Обмін інформацією між модулем Arduino і комп'ютером забезпечується через бездротову персональну мережу Bluetooth на основі HC-06 модуля 6 або через довгий шлейф USB 7.

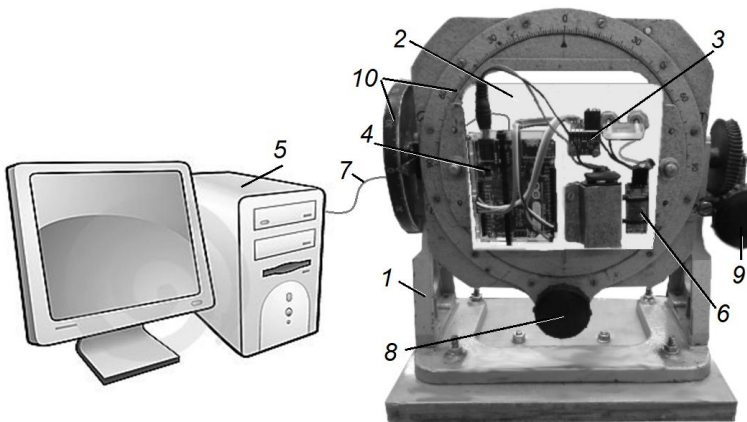


Рис. 5.13

Кронштейн дозволяє розгорнути модуль MPU-6050 за всіма двома вимірювальними осями на необхідні кути крену і тангажа. Кути повороту кронштейну задаються рукоятками 8, 9 і контролюються за шкалами точного відліку 10 із ціною поділу 0,2°.

⁸ Докладно модуль MPU-6050 та його характеристики описані у п.п. «Інерціальні вимірювальні модулі» лабораторної роботи 4.

Апаратна частина Arduino Leonardo (рис. 5.14) являє собою мікроконтролер, змонтований на друкованій платі, який використовується в якості платформи для розробки електронних пристроїв. Більшість плат Arduino забезпечені мінімально необхідним набором обв'язки для нормальної роботи мікроконтролера (стабілізатор живлення, кварцовий резонатор, ланцюжки скидання тощо). Мікроконтролери для Arduino відрізняються наявністю попередньо прошитого в них завантажувача. За допомогою цього завантажувача користувач завантажує розроблювану програму в мікроконтролер без використання традиційних окремих апаратних програматорів. Завантажувач з'єднується з комп'ютером через інтерфейс USB.

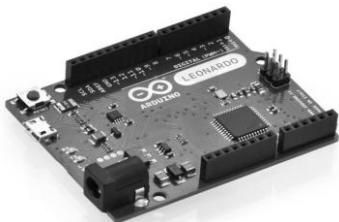


Рис. 5.14

Середовище розробки Arduino складається з вбудованого текстового редактору програмного коду, області повідомлень, вікна виведення тексту (консолі), панелі інструментів з кнопками часто використовуваних команд і декількох меню. Для завантаження програм і зв'язків середовище розробки підключається до апаратної частини Arduino.

У додатку до методичних вказівок детально описане середовище розробки Arduino.

5.3. Порядок виконання роботи

Підготовка до перевірки. Включити комп'ютер і запустити середовище розробки Arduino. Відкриється заготовка лабораторної роботи - скетч «MPU6050_aksel».



Рис. 5.15

Перевірити щоб контакти плати модуля MPU-6050 (рис. 5.15) були підключені до PIN-ів модуля Arduino таким чином:

VCC-3.3V, GND-GND,
SCL-3, SDA-2.

На модулі Arduino повинен світитися зелений світлодіод живлення, позначений ON.

Увага: Модуль не рекомендується підключати безпосередньо до підключеної до електроживлення плати мікроконтролера, необхідно відключити електроживлення в момент підключення модуля, першим повинен бути підключений вивід GND модуля, в іншому випадку, це може вплинути на нормальну роботу модуля.

Ознайомитися з лістингом скетчу «MPU6050_aksel», який наведено у додатку до лабораторної роботи №5.

5.3.1. Калібрування та масштабування акселерометра

В роботі калібрування та масштабування акселерометра здійснюється у полі сили тяжіння Землі.

Для калібрування осі OY акселерометра необхідно за допомогою кронштейну зорієнтувати вісь OY модуля MPU-6050 (рис. 5.16) за напрямком сили тяжіння Землі. В програмі «MPU6050_aksel» «закоментувати» усі строки виведення інформації окрім строки виведення інформації про значення прискорення a_y

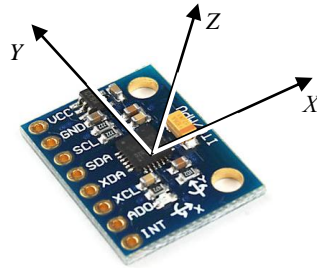



Рис. 5.16

```
Serial.println(ay);
```

Задати: $a_{y_dreif} = 0$, $K_y = 1$, а час затримки 20мсек – (delay(20);). Клацнувши кнопку **Upload** панелі інструментів, скопіювати програму і "прошити" її в мікроконтролер Ардуіно.

Натиснувши на панелі інструментів Ардуіно кнопку моніторингу послідовної шини  почати отримувати дані про прискорення a_y , що надходять від контролера Ардуіно на комп'ютер по послідовному інтерфейсу.

Спостерігаючи, 15 ... 25 сек за показами кутової швидкості, відключити в моніторі параметр «Автопрокрутка» (віконце в нижній лівій частині вікна монітора). Потім, клацнувши у вікні монітора, виділіть всі (Ctrl_A) і скопіювати (Ctrl_C) вміст вікна. Закрити монітор порту.

Відкривши Microsoft Excel, вставити в нього як стовпець скопійовані дані. Замінити в стовпці знак крапки на знак коми. Використовуючи свої навички роботи з Microsoft Excel знайдіть помилки у С даних, які, наприклад у декілька разів перевищують середнє значення a_x , та замініть помилкові значення у комірці на значення із сусідньої комірки. У комірку, що знаходиться нижче останньої

комірки таблиці вставте формулу розрахунку середнього значення скопійованих даних (=СРЗНАЧ(A1:A100)).

За допомогою кронштейну змінити напрямок осі OY модуля MPU-6050 на 180° . Натиснувши на панелі інструментів Ардуіно кнопку моніторингу послідовної шини, почати отримувати дані про прискорення a_y . Звернути увагу на протилежний знак раніше отримуваних даних про прискорення a_y .

Скопійовані дані вставити в другий стовпець таблиці документа Microsoft Excel. Використовуючи раніше описану методику отримати середнє значення даних другого стовпця таблиці.

За формулою

$$a_{y_dreif} = (a_{y_cp1} + a_{y_cp2})/2$$

розрахувати систематичну складову дрейфу акселерометра за віссю OY . Тут a_{y_cp1} , a_{y_cp2} – середні значення даних першого та другого стовпця таблиці відповідно.

Занести розраховану величину дрейфу акселерометра за віссю OY у звіт з лабораторної роботи, а також в програму «MPU6050_aksel» замість $a_{y_dreif} = 0$. Перекомпілювати програму і "прошити" її в мікроконтролер Ардуіно.

Натиснувши на панелі інструментів Ардуіно кнопку моніторингу послідовної шини, почати отримувати дані про прискорення a_y . Скопійовати отримані на протязі 15 ... 25 сек дані й вставити їх в перший стовпець таблиці. Використовуючи раніше описану методику отримати середнє значення даних першого стовпця таблиці.

Помінявши напрямок осі OY модуля MPU-6050 на 180° , повторити зняття показів акселерометра. Скопійовані дані вставити в другий стовпець таблиці й отримати їх середнє значення. За формулою

$$K_y = (|a_{y_cp1}| + |a_{y_cp2}|)/2g$$

розрахувати масштабний коефіцієнт. Тут $|a_{y_cp1}|$, $|a_{y_cp2}|$ – абсолютні середні значення даних першого та другого стовпця таблиці відповідно; $g = 9,81\text{м/сек}^2$ – прискорення сили ваги на широті Києва.

Занести розраховану величину масштабного коефіцієнта за віссю OY у звіт з лабораторної роботи, а також в програму «MPU6050_aksel» замість $K_y = 1$. Перекомпілювати програму і "прошити" її в мікроконтролер Ардуіно.

Повторити попередній пункт роботи, знімаючи покази акселерометра для двох напрямків осі OY модуля MPU-6050. Порівняти

середні значення даних першого та другого стовпця таблиці документа Word. Якщо середні значення за модулем не відрізняються від $9,81 \text{ м/сек}^2$ на величину більш ніж $0,015 \text{ м/сек}^2$, то вважається, що калібрування та масштабування акселерометра за віссю OY виконано успішно.

5.3.2. Оцінювання впливу температури на покази МЕМС-акселерометра

Для оцінювання впливу температури на покази акселерометра необхідно, використовуючи поворотні вузли кронштейна, зорієнтувати вісь OY модуля MPU-6050 горизонтально. Потім запустити моніторинг послідовної шини та почати отримувати дані про нульові значення прискорення a_y , одночасно використовуючи фен здійснити нагрівання модуля протягом 20 ... 30 сек.

Використовуючи раніше застосовану методику, скопіювати отримані дані та вставити їх у документ Microsoft Excel. Замінити в стовпці знаки крапки на знаки коми.

Використовуючи свої навички роботи з Microsoft Excel побудувати за даними стовпця документа Excel графік значень a_y . Переконатися у суттєвому збільшенні шумової складової вихідних даних та в практично незмінному значенні систематичної складової дрейфу акселерометра. Скопіювати графік експерименту і вставити його у звіт з лабораторної роботи.

Візуалізацію результатів дослідження цього та наступних пунктів можна здійснювати з використанням програми побудови графіків математичних функцій Graph. Правила роботи з програмою Graph наведені у додатку 2 до методичних вказівок.

5.3.3. Зняття статичних характеристик акселерометра

Для зняття статичних характеристик акселерометра в програмі «MPU6050_aksel» «закоментувати» строку виведення інформації про значення прискорення a_y та «розкоментувати» строку виведення інформації про згладжені (відфільтровані) значення прискорення a_y (Serial.println(ay_f)). Згладжування інформації про прискорення здійснюється аперіодичним фільтром за формулою:

$$ay_f=ay_f+((ay-ay_f)/0.5)*dt;$$

де dt – крок інтегрування; 0.5 – стала часу аперіодичного фільтру. Згладжування інформації дозволяє фіксувати середнє усталене значення прискорення.

Поворотний кронштейн розгорнути так, щоб вимірювальна вісь OY модуля MPU-6050 (див. рис. 5.9) була горизонтальною.

Клацнувши кнопку **Upload** панелі інструментів, перекомпілювати програму і "прошити" її в мікроконтролер Ардуіно.

Таблиця 1

Кут нахилу MPU-6050 (γ , град)	$a_y = g \sin \gamma$ (м/с ²)	$a_{y_{\text{вим}}}$ (м/с ²)
5	0,86	
10	1,7	
15	2,54	
20	3,35	
25	4,15	
30	4,91	
35	5,63	
40	6,31	
45	6,94	

Змінюючи кут нахилу платформи з MPU-6050 і відповідно вимірювальної осі OY через кожні 5° знімати відфільтровані покази акселерометра $a_{y_{\text{вим}}}$, заносючи їх в табл. 1. Акселерометр a_y , у даному випадку буде вимірювати проекцію уявного прискорення, що створюється силою опори, і яка дорівнює за величиною, але протилежна за знаком проекції вектора напруженості поля сил ваги.

$$a_y = g \sin \gamma$$

де γ – кут нахилу платформи з MPU-6050.

При зніманні відфільтрованих показів акселерометра слід враховувати інерційність їх отримання, яка складає (4...5 сек).

За даними табл. 1 побудувати графік $a_y = f(a_{y_{\text{вим}}})$. Оцінити величину похибки Δa_y .

5.3.4. Дослідження показів акселерометра при його вільному падінні

Для отримання інформації про покази акселерометра при його вільному падінні використовується пристрій для скидання та без ударного підхоплення плати 2 (див. рис. 5.13) із закріпленими на ньому модулями MPU-6050 та Arduino. Пристрій являє собою систему аналогічну системі, що використовується при стрибках з висоти на мотузках (роупджампінг та банджи-джампінг).

Легко знімна плата з модулями MPU-6050 та Arduino знімається з поворотного кронштейна і за допомогою карабінів прикріплюється до амортизаційної резинки та нитки підтягування, яка перекинута через блок роликів, що закріплений на стелі аудиторії рис. 5.17. Амортизаційна резинка виконує роль без ударного підхоплення плати, а нитка підтягування піднімає плату до стелі. Після відпускання нитки плата вільно падає вниз доки резинка не почне виконувати свою амортизаційну роль.

При довжині резинки 2 м тривалість вільного падіння складає десь 0,4 с, тому в програмі «MPU6050_aksel» задати менший час виведення даних, причому даних про поточні прискорення, а не про згладжені. Для чого «розкоментувати» строки:

```
if((timer - serial_time) >= 0.05)
Serial.println(ay);
і відповідно «закоментувати» строки:
if((timer - serial_time) >= SERIAL_DELAY)
Serial.println(ay_f)
```

Перекомпілювати програму та "перепрошити" її в Ардуїно.

Підтягнувши плату з підключеним до модуля Ардуїно довгим шлейфом USB до стелі, запустити моніторинг послідовної шини та відпустити нитку підтягування. Скопіювати у вікні моніторингу послідовної шини отримані дані та, використовуючи раніш застосовану методику, побудувати за ними в Excel графік значень a_y .

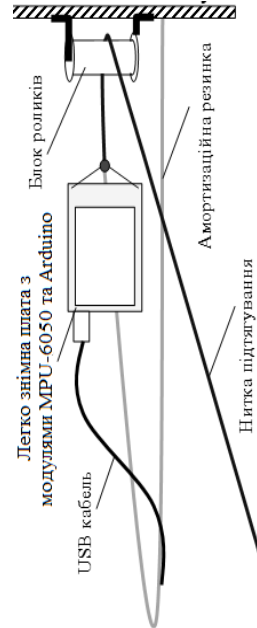


Рис. 5.17

Скопіювати графік експерименту (рис. 5.18) і вставити його у



Рис. 5.18

звіт з лабораторної роботи, відмітивши на ньому етап вільного падіння. Впевнитися, що на етапі вільного падіння акселерометра з прискоренням, що дорівнює прискоренню сили ваги, його покази будуть дорівнювати нулю.

Зміст звіту

В результаті виконання лабораторної роботи кожен студент представляє акуратно оформлений звіт, що містить цифровий і графічний матеріал проведених досліджень. У звіті необхідно помістити висновки по кожному пункту роботи.

Додаток до лабораторної роботи №5

```
#include<Wire.h>
const int MPU_addr=0x68; // спрощена I2C адреса MPU-6050.
/*Змінні для зберігання даних, що повертаються процесором MPU-6050 */
int16_t AcX,AcY,AcZ,Tmp,GyX,GyY,GyZ;
/* Змінні що використовуються в програмі */
float INTEGR_DELAY = 0.05; //завдання кроку інтегрування
double az, ay, ax, az_f, ay_f, ax_f, Kz, Kx, Ky,
az_dreif, ax_dreif, ay_dreif, gam, T, temp, dt;
int K=0, L=0, N=0;
float timer, t=0, serial_time=0;
void setup()
{
Wire.begin();
K=0;
Wire.beginTransmission(MPU_addr);
Wire.write(0x6B); // PWR_MGMT_1 register
Wire.write(0); // Пробуджуємо MPU-6050 і встановлюємо його в нуль
Wire.endTransmission(true);
Serial.begin(9600); // Підключаємо монітор порту зі швидкістю 9600
передачі даних на комп'ютер
}
void loop()
////////////////////////////////////
/// Зчитування даних з MPU-6050
{
Wire.beginTransmission(MPU_addr);
Wire.write(0x3B); /* Готуємо для читання регістри, починаючи
з регістра 0x3B*/
Wire.endTransmission(false);
Wire.requestFrom(MPU_addr,14,true); /* Запросити в цілому 14 регістрів */
AcX=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x3B (ACCEL_XOUT_H) & 0x3C
(ACCEL_XOUT_L)
AcY=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x3D (ACCEL_YOUT_H) & 0x3E
(ACCEL_YOUT_L)
AcZ=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x3F (ACCEL_ZOUT_H) & 0x40
(ACCEL_ZOUT_L)
Tmp=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x41 (TEMP_OUT_H) & 0x42
(TEMP_OUT_L)
GyX=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x43 (GYRO_XOUT_H) & 0x44
(GYRO_XOUT_L)
GyY=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x45 (GYRO_YOUT_H) & 0x46
```

```
(GYRO_YOUT_L)
  GyZ=Wire.read()<<8|Wire.read(); // 0x47 (GYRO_ZOUT_H) & 0x48
(GYRO_ZOUT_L)
```

```
// Калібрування та масштабування акселерометрів
```

```
Ky=1680.156;
```

```
//ay_dreif=0;
```

```
ay_dreif=-450.07774;
```

```
ay=((double)AcY-ay_dreif)/Ky;
```

```
//Kx=1;
```

```
//ax_dreif=0;
```

```
//ax=Kx*((double)AcX-ax_dreif);
```

```
//Kz=1;
```

```
//az_dreif=0;
```

```
//az=Kz*((double)AcZ-az_dreif);
```

```
/*Згладжування (фільтрування) сигналу ay */
```

```
timer = (float)micros()/1000000;
```

```
/* Функція micros () повертає кількість мікросекунд, що минули з моменту
початку виконання програми Arduino. */
```

```
dt=timer-t;//крок інтегрування
```

```
if( dt) >= INTEGR_DELAY)//крок інтегрування =0.05
```

```
{
```

```
t=timer;
```

```
ay_f=ay_f+((ay-ay_f)/0.5)*dt;
```

```
//ax_f=ax_f+((ax-ax_f)/0.5)*dt;
```

```
//az_f=az_f+((az-az_f)/0.5)*dt;
```

```
}
```

```
/* Виведення даних про прискорення ay, що надходять від контролера
Ардуіно на комп'ютер по послідовному інтерфейсу */
```

```
if( (timer - serial_time) >= 0.5) // Виведення через 0,5 сек
```

```
//if( (timer - serial_time) >= 0.05) // Виведення через 0,05 сек
```

```
{
```

```
serial_time = timer;
```

```
Serial.println(ay_f);
```

```
//Serial.println(ay);
```

```
}
```

```
}
```

Додаток 1 до методичних вказівок

Середовище розробки Arduino

Середовище розробки Arduino (рис. 1.11) складається з вбудованого текстового редактору програмного коду 1, області повідомлень 2, вікна виведення тексту (консолі) 3, панелі інструментів 4 з кнопками часто використовуваних команд і панелі меню 5. Для завантаження програм і зв'язків середовище розробки підключається до апаратної частини Arduino.

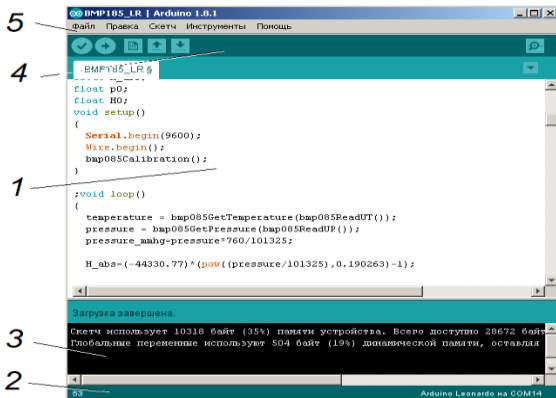






Рис. Д.1

Програма, що написана в середовищі Arduino, називається скетч. Скетч пишеться в текстовому редакторі, який має інструменти вирізки та вставки, пошуку та заміни тексту. Під час збереження і експорту проекту в області повідомлень з'являються пояснення, також можуть відобразитися виникаючі помилки. Вікно виведення тексту (консоль) показує повідомлення Arduino, які включають повні звіти про помилки та іншу інформацію. Кнопки панелі інструментів дозволяють перевірити і записати програму, створити, відкрити та зберегти скетч, відкрити моніторинг послідовної шини:

-  **Verify** (Перевірити)
Перевірка програмного коду на помилки.
-  **Upload** (Прошити)
Компілює програмний код і завантажує його в Arduino.
-  **New** (Створити)
Створення нового скетчу.
-  **Open** (Відкрити)

Відкриття меню доступу до всіх скетчів в блокноті. Після клацання по файлу його вміст відкриється у поточному вікні.



Save (Зберегти)

Збереження скетчу.



Serial Monitor (Моніторинг послідовної шини)

Відображає дані, що надходять від Ардуіно на комп'ютер по послідовному інтерфейсу.

Додаткові команди згруповані в п'ять меню: File, Edit, Sketch, Tools, Help. Доступність меню визначається роботою, що виконується в даний момент.

Edit

- *Copy for Discourse*

Копіює в буфер обміну відповідний для розміщення на форумі код скетчу з виділенням синтаксису.

- *Copy as HTML*

Копіює код скетчу в буфер обміну як HTML код, для розміщення на веб-сторінках.

Sketch

- *Verify/Compile*

Перевірка скетчу на помилки.

- *Import Library*

Додає бібліотеку в поточний скетч, вставляючи директиву `#include` в код скетчу.

- *Show Sketch Folder*

Відкриває папку, яка містить файл скетчу, на робочому столі.

- *Add File...*

Додає файл в скетч (файл буде скопійований з поточного місця розташування). Новий файл з'являється в новій закладці в вікні скетчу. Файл може бути видалений зі скетчу за допомогою меню закладок.

Tools

- *Auto Format*

Дана опція оптимізує код.

- *Board*

Вибір використовуваної платформи Arduino.

- *Serial Port*

Меню містить список послідовних пристроїв передачі даних (реальних і віртуальних) на комп'ютері. Список оновлюється автоматично кожного разу при відкритті Tools.

- *Burn Bootloader*

Пункти даного меню дозволяють записати Завантажувач (Bootloader) в мікроконтролер на платформі Arduino. Дана дія не потрібна в поточній роботі з Arduino, але стане у нагоді, якщо є новий ATmega (без завантажувача). Перед записом рекомендується перевірити правильність вибору платформи з меню. При використанні AVR ISP необхідно обрати відповідний програматору порт з меню Serial Port.

Блокнот (Sketchbook)

Середовищем Arduino використовується принцип блокнота: стандартне місце для зберігання програм (скетчів). Скетчі з блокнота відкриваються через меню File → Sketchbook або кнопкою Open на панелі інструментів. При першому запуску програми Arduino автоматично створюється директорія для блокноту. Розташування блокнота змінюється через діалогове вікно Preferences.

Загрузка скетча в Arduino

Перед завантаженням скетчу потрібно задати необхідні параметри в меню **Tools** → **Board** і **Tools** → **Serial Port**. В ОС Windows порти можуть позначатися як COM1 або COM2 (для плати послідовної шини) або COM4, COM5, COM7 і вище (для плати USB). Визначення порту USB проводиться у полі «Послідовної шини USB» диспетчера пристроїв Windows.

Після вибору порту і платформи необхідно натиснути кнопку завантаження на панелі інструментів або вибрати пункт меню File → Upload to I/O Board. Сучасні платформи Arduino перезавантажуються автоматично перед завантаженням. На старих платформах необхідно натиснути кнопку перезавантаження. На більшості плат під час процесу будуть мигати світлодіоди RX і TX. Середовище розробки Arduino виведе повідомлення про закінчення завантаження або про помилки.

При завантаженні скетчу використовується Завантажувач (Bootloader) Arduino, невелика програма, що завантажується в мікроконтролер на платі. Вона дозволяє завантажувати програмний код без використання додаткових апаратних засобів. Завантажувач (Bootloader) активний протягом декількох секунд при перезавантаженні платформи і при завантаженні будь-якого з скетчів в мікроконтролер. Робота Завантажувача (Bootloader) розпізнається за миготінням світлодіода (наприклад, при перезавантаженні плати).

Додаток 2 до методичних вказівок

Програма Graph для побудови графіків математичних функцій

Graph є потужним інструментом для створення графіків математичних і тригонометричних функцій. Програма дозволяє не тільки задавати функцію, за якій автоматично будується графік, але й додавати масу додаткових елементів, у тому числі, дотичні або перпендикуляри, криві наближення, мітки.

Крім того програма дозволяє будувати довільні графіки за рядками точок із заданими координатами. При цьому можна вказувати колір, товщину і стиль ліній на графіку, а також обмежувати інтервал вхідних даних. Саме ця здатність обумовила її використання для візуалізації результатів дослідження, які надходять від контролера Ардуїно на комп'ютер по послідовному інтерфейсу у вигляді масивів чисел.

У Graph легко обчислюється довжина кривої, площа за інтегралом, можна заштрихувати область графіка, переглянути значення функції, експортувати графік в файл та імпортувати дані із зовнішніх додатків (наприклад, з Excel).

Програма здатна виводити таблиці з обчисленими значеннями функції, дозволяє додавати на графіки текстові коментарі, створювати власні функції і постійні, анімувати графіки та багато іншого.

При запуску Graph відкривається інтерфейс програми (рис. Д.2), у вікні якого видно тільки осі x і y . При переміщенні мишею по області графіку в рядку стану відображаються поточні координати курсору для кожної осі.

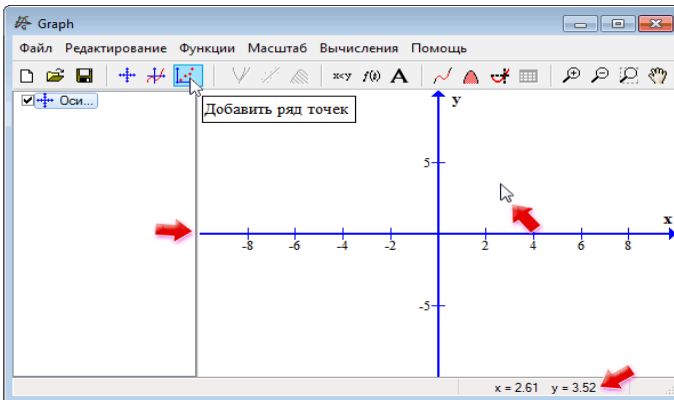


Рис. Д.2

Для візуалізації даних, що надходять від контролера Ардуіно на комп'ютер по послідовному інтерфейсу у вигляді потоку чисел, необхідно перетворити у вигляд, який у змозі бути сприйнятий програмою Graph.

Таблиця Д1

1	79,6607
2	79,30211
3	79,63917
4	79,50425
5	79,1736
6	79,59268
7	79,97709
8	79,80878
9	79,69388
10	79,32381
11	79,29136
12	79,3048
13	79,86337
14	79,23382
15	79,72973

Для цих цілей використовується звичайний документ Microsoft Word, в який вставляються скопійовані з вікна моніторингу послідовної шини данні.

Використовуючи навички роботи з Microsoft Word необхідно перетворити отримані данні у таблицю зі двома стовпцями. Якщо данні від контролера Ардуіно надходять тільки одним потоком чисел, то другий стовпець таблиці у документі Word формується як нумерований список, тобто до одного стовпця таблиці в який був перетворений потік даних додається ще один стовпець, який формується як нумерований список (див. табл. Д1). Формат номера списку повинний бути без крапки.

Для побудови графіка необхідно у вікні інтерфейсу програми Graph (див. рис. Д.2) клацнути кнопку «Додати ряд точок», внаслідок чого відкривається

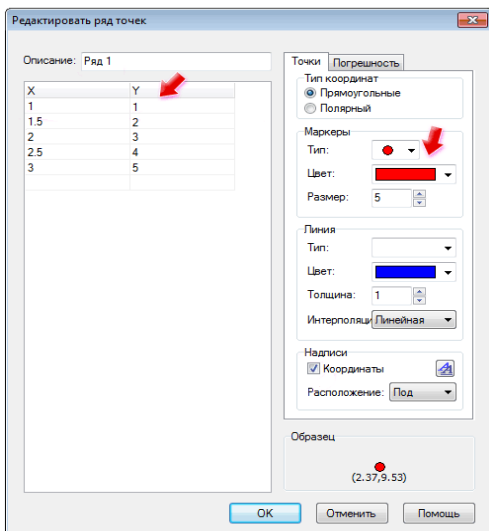


Рис. Д.3

вікно налаштувань двомірного графіка (рис. Д.3). У стовпці X та Y вікна налаштувань необхідно вставити скопійовані стовпці таблиці документа Microsoft Word. Тут же вибираємо тип координат, зокрема прямокутні; тип, колір і розмір маркерів (є круглі, квадратні, трикутні тощо). Точки можна з'єднати лінією, у налаштуваннях задається її тип, колір, товщина і інтерполяція (лінійна, одновимірний кубічний сплайн, напівкосинус).

Крім того, біля кожної точки можна відобразити її ко-

ординати, їх розташування вибирається в списку, що випадає. Можна також змінити назву графіка - «Ряд 1».

У меню «Редактирование – Оси» (див. рис. Д.4) пропонуються різноманітні налаштування зовнішнього вигляду осей і координатної сітки. Тут налаштовується мінімальне і максимальне значення кожної осі, інтервал відміток, відображення сітки тощо. Крім того, в Graph можна змінити позначення кожної осі. У вкладці Параметри задаємо заголовок графіка і його розташування. Можна також налаштувати колір фону, осей і сітки, шрифти підписів, позначення осей і чисел.

Для побудови в одній області декількох графіків (див. рис. Д5) необхідно у вікні інтерфейсу додатково клацнути кнопку «Добавить ряд точек» і провести налаштування для другого та третього

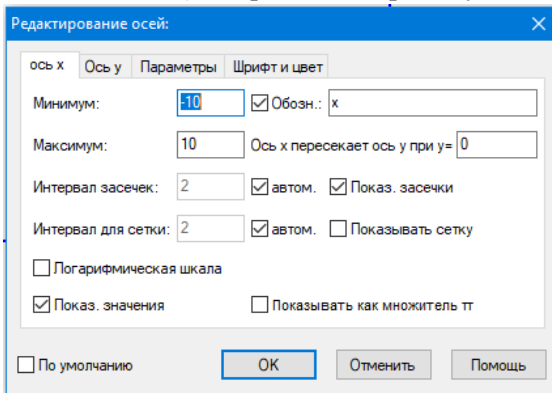


Рис. Д.4

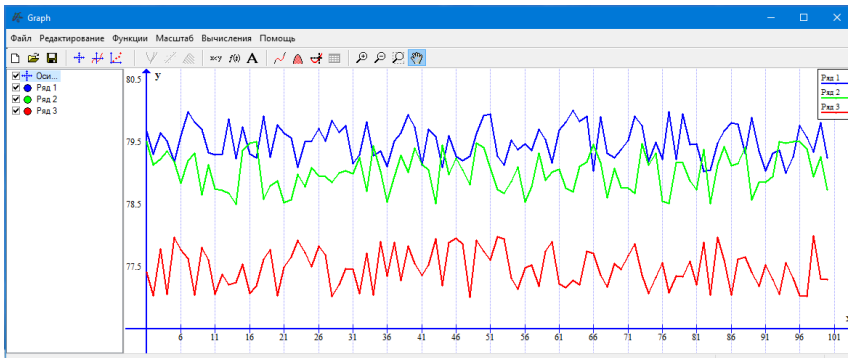


Рис. Д.5

ряду точок, зокрема у стовпці X та Y вікон налаштування рядків вставити нові координати. Бажано, щоб координати стовпця X у всіх рядках були однакові.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Автоматизація* проектування MEMC з використанням системи COMSOL : навч. посіб. / В. М. Теслюк, Р. З. Кривий, М. Р. Мельник . – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2016. – 216 с
2. *Гірняк Ю.* Мікроелектромеханічні системи у сучасному приладобудуванні / Ю. Гірняк // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. – № 69. – С10 - 15.
3. *Головатий А.* Розрахунок і конструювання робочих органів мікромеханічних гіроскопів / А. Головатий // Вісник Тернопільського технічного університету. – 2007. – Том 12, № 4. – С.20 - 25.
4. *Гуртов В.А.* Микроэлектромеханические системы / Беляев М. А., Бакшеева А.Г.– Петрозаводск: Из-во. ПетрГУ,– 2016. – 171 с.
5. *Качаев И.А.* Микроэлектронные сенсорные системы опыт создания и применения / Котов В.Н., Клиндухов В.Г., Кухаренко А.П. // Микросистемная техника. – 1999. – № 1. С. 32-35.
6. *Кашкаров А.П.* Микромеханические системы и элементы. – М.: ДМК Пресс. – 2018. – 150 с.
7. *Колясников В.А.* Микрожидкостные системы и их реализация с использованием LIGA-технологии / Рахимбабаев Т.Я. // Микросистемная техника. – 1999. – №1. С. 15-21.
8. *Лобур М.* Основи мікросистемних пристроїв / Мельник М. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2016. – 258 с.
9. *Староверов К.* Новое семейство одно- и двухосевых гироскопов / Новости электроники, – 2009. – №14 – С.16-18.
10. *Сысоева С.* Ключевые сегменты рынка МЭМС- компонентов. Инерциальные системы — от lowend до high-end / Компоненты и технологии. – 2010. – № 5
11. *Філяшкін М.К.* Мікроелектромеханічні системи – К.: НАУ. – 2019. – 276 с.
12. *Jeremie Bouchaud, Richard Dixon.* MEMS market brief, Isuppli, January – 2009. – P. 23-32.
13. *N. Yazdi, F. Ayazi, K. Najafi.* Micromachined Inertial Sensors, Proc IEEE, Aug. – 1998, Vol. 86, No. 8.– P. 15-25.
14. *MEMS Gyro Markets.*// Report of Yole Developpment. April 2006, Lyon, France. – P. 22-37.

ЗМІСТ

Передмова	3
Лабораторна робота 1. Дослідження барометричного мікромеханічного висотоміра.....	4
1.1. Скорочені теоретичні питання.....	4
1.2. Опис лабораторної установки.....	11
1.2.1. Установка контролю анероїдно-манометричних приладів.....	11
1.2.2. Модуль ARDUINO.....	13
1.3. Порядок виконання роботи.....	14
1.3.1. Визначення похибок вимірників висоти.....	16
1.3.2. Дослідження впливу температурної компенсації....	18
1.3.3. Дослідження рівня шумів датчика BMP180.....	19
Додаток 1 до лабораторної роботи №1.....	21
Додаток 2 до лабораторної роботи №1.....	26
Лабораторна робота 2. Дослідження мікромеханічного магнітометра.....	27
2.1. Скорочені теоретичні питання.....	27
2.1.1. Датчики магнітного поля.....	27
2.1.2. Електроні компаси.....	33
2.2. Опис лабораторної установки.....	40
2.3. Порядок і методика виконання лабораторної роботи.....	41
2.3.1. Калібрування магнітометра НМС5883L.....	42
2.3.2. Зняття статичних характеристик магнітометра.....	45
2.3.3. Дослідження впливу горизонтальності магнітометра на його точності характеристики.....	46
Додаток до лабораторної роботи №2.....	48
Лабораторна робота 3. Дослідження ультразвукового датчика відстані.....	50
3.1. Скорочені теоретичні питання.....	50
3.1.1. МЕМС-мікрофони	50
3.1.2. Ультразвукові датчик відстані	53
3.2. Опис лабораторної установки.....	57
3.2.1. Вимірювальний кронштейн.....	57
3.2.2. Модуль и середовище розробки ARDUINO.....	58
3.2.3. Набори зразків матеріалів і профілів поверхонь віддзеркалення.....	59
3.3. Порядок і методика виконання лабораторної роботи.....	59
3.3.1. Визначення робочого і ефективного кута спостереження датчика HC-SR04.....	60

3.3.2. Дослідження впливу звукопоглинальних властивостей різноманітних матеріалів на точність вимірювання відстані.....	60
3.3.3. Дослідження роздільної здатності датчика HC-SR04.....	61
3.3.4. Оцінка впливу температури поверхні відбиття на точність вимірювань дальності.....	62
3.3.5. Оцінка можливостей сканування підстиляючого рельєфу ультразвуковим датчиком відстані.....	63
Додаток до лабораторної роботи №3.....	65
Лабораторна робота 4. Дослідження мікромеханічного датчика кутової швидкості.....	67
4.1. Скорочені теоретичні питання.....	67
4.2. Опис лабораторної установки.....	78
4.3. Порядок і методика виконання лабораторної роботи.....	79
4.3.1. Калібрування датчика кутової швидкості	80
4.3.2. Оцінювання впливу температури на покази датчика кутової швидкості модуля MPU-6050.....	81
4.3.3. Зняття статичних характеристик датчика кутової швидкості у складі модуля MPU-6050.....	82
4.3.4. Дослідження варіантів отримання інформації про кутову орієнтацію модуля MPU-6050.....	83
Додаток до лабораторної роботи №4.....	85
Лабораторна робота 5. Дослідження мікромеханічного акселерометра	87
5.1. Скорочені теоретичні питання.....	87
5.2. Опис лабораторної установки.....	97
5.3. Порядок виконання лабораторної роботи.....	98
5.3.1. Калібрування та масштабування акселерометра.....	99
5.3.2. Оцінювання впливу температури на покази МЕМС-акселерометра.....	101
5.3.3. Зняття статичних характеристик акселерометра	101
5.3.4. Дослідження показів акселерометра при його вільному падінні.....	102
Додаток до лабораторної роботи №5.....	104
Додаток 1 до методичних вказівок.....	106
Додаток 2 до методичних вказівок.....	109
Список літератури.....	112

Навчальне видання

**ДОСЛІДЖЕННЯ
МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
для студентів спеціальностей 151
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Укладачі: **ВАСИЛЕНКО** Микола Павлович
МУХІНА Маріна Петрівна,
СИНЄГЛАЗОВ Віктор Михайлович
ФІЛЯШКІН Микола Кирилович

Редактор *С.С. Сидоров*
Технічний редактор *А.І. Лавринович*
Коректор *І.І. Іванов*

Підп. до друку 00.00.2020. Формат 60×84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. . Обл-вид. арк. .
Тираж 50 прим. Замовлення № -1.

Видавництво НАУ
03058, Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК №977 від 00.00.2005