

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувачка кафедри

_____ Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ
_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 171 Електроніка освітньо-професійної програми
«Електронні інформаційні системи»
на тему: Розробка віртуального стенду для дослідження характеристик
мікромеханічного датчика тиску

Здобувача групи ЕП.м-22 Копиця Володимира Вікторовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело.

_____ Володимир КОПИЦЯ

Керівник доцент кафедри ЕЗПФ,

канд. фіз.-мат. наук, доцент

_____ Ірина ПАЗУХА

Суми – 2023

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-професійна програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

«05» листопада 2023 року

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
Копиці Володимира Вікторович

1. Тема роботи: Розробка віртуального експериментального стенду для дослідження характеристик мікромеханічного датчика тиску затверджена наказом по університету від «15» листопада 2023 р., № 1260-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 12 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Активний прогрес у мікроелектроніці відкриває широкі можливості для оснащення об'єктів у сфері ракетно-космічних, авіаційних та цивільних технологій сучасними датчиками фізичних параметрів. Принцип дії будь-якого сенсора тиску ґрунтується на перетворенні зовнішнього тиску, що діє на чутливий елемент, у вихідний електричний сигнал. Чутливі елементи сенсорів тиску відносяться до механічних пристроїв. Деформація або переміщення чутливих елементів сенсорів тиску при дії зовнішніх факторів фіксується при вимірюваннях.

Мета даної роботи полягає у розробці віртуального експериментального стенду для дослідження характеристик мікромеханічного датчика тиску.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. МЕМС датчики тиску: принцип роботи та типові конструкції.
2. Вибір програмного забезпечення для розробки віртуального стенду.
3. Створення емулятора датчика та налаштування параметрів і сценаріїв

симуляції.

4. Дослідження MEMC датчика тиску для вимірювання барометричної висоти.

5. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди № 1-2 – Загальна інформація

Слайди № 3-6 – Принцип роботи та типові конструкції MEMC датчиків тиску

Слайди № 7-9 – Розробка віртуального стенду для дослідження характеристик MEMC датчика тиску.

Слайди № 10-11 – Результати досліджень

Слайд № 14 – Висновки

6. Дата видачі завдання 06.11.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістрів	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Аналіз літературних даних	до 13.11.2023 р.	
.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 27.11.2023 р.	
.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 12.12.2023 р.	
.	Попередній захист роботи	13.12.2023 р., 13 ⁰⁰ (онлайн)	
.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	19.12.2023 р. – 20.12.2023 р., 11 ³⁰	

Здобувач вищої освіти

В.В. Копиця

Керівник роботи

І.М. Пазуха

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 30 сторінках, зокрема, містить 14 рисунків, 3 таблиць, список використаних джерел із 18 найменувань.

Актуальність теми полягає у розвитку технологій мікроелектромеханічних систем (MEMS) та зростаючій потребі у високоефективних, компактних та економічних датчиках тиску для різних галузей, включаючи автомобілебудування, медицину, авіацію та інші.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає в розробці віртуального стенду для дослідження характеристик мікромеханічного датчика тиску, що дозволить оптимізувати процес проектування та випробувань датчиків, а також забезпечить економію ресурсів.

Під час виконання роботи використовувались сучасні програмні засоби моделювання, методи візуалізації даних та алгоритми для точного відтворення фізичних процесів у датчиках.

У результаті проведених наукових досліджень встановлено, що розроблений віртуальний стенд є ефективним інструментом для емулювання сучасних MEMS датчиків тиску. Отриману методику можна використати для розробки та вдосконалення MEMS датчиків тиску в різних галузях, включаючи портативну електроніку та системи Інтернету речей (IoT). В результаті цих досліджень була розроблена та опублікована на GitHub бібліотека для емуляції датчика BMP280, BMP280 Emulator (<https://github.com/vkopitsa/BMP280-Emulator>).

Ключові слова: MEMS, мікромеханічний датчик тиску, віртуальний стенд, вимірювання тиску, сенсорна технологія, візуалізація даних, програмне забезпечення для моделювання.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 МЕМС ДАТЧИКИ ТИСКУ: ПРИНЦИП РОБОТУ ТА ТИПОВІ КОНСТРУКЦІЇ	7
1.1. Класифікація MEMS датчиків тиску	7
1.2. Принципи роботи MEMS датчиків тиску	8
1.3. Типові конструкції MEMS датчиків тиску	9
1.4. Вбудований метод самотестування та саморегулювання MEMS датчиків тиску	12
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОМЕХАНІЧНОГО ДАТЧИКА ТИСКУ	14
2.1. Вибір програмного забезпечення	14
2.2. Створення емулятора датчика	15
2.3. Налаштування параметрів та сценаріїв симуляції	18
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОМЕХАНІЧНОГО ДАТЧИКА ТИСКУ ЯК ВИМІРЮВАЧА БАРОМЕТРИЧНОЇ ВИСОТИ .	22
3.1. Теоретичні основи мікромеханічних датчиків тиску	22
3.2. Використання датчика для вимірювання барометричної висоти	25
ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	29

ВСТУП

У сучасному світі вимірювання тиску є важливим завданням у багатьох галузях, таких як автомобілебудування, медицина, авіація, промислове обладнання та побутові прилади. З розвитком технологій мікроелектромеханічних систем (MEMS), датчики тиску стали більш компактними, ефективними та доступними. Серед різних типів MEMS датчиків особливий інтерес в учених та інженерів викликають мікромеханічні датчики тиску, котрі забезпечують високу точність вимірювань та можливість інтеграції з різними електронними пристроями.

Значення розвитку високоефективних датчиків тиску постійно зростає як у традиційних сферах, таких як автоматизація та контроль якості, так і в нових областях, включаючи портативну електроніку та системи Інтернету речей (IoT).

Одним із головних викликів є вдосконалення датчиків з метою їх мініатюризації, підвищення чутливості та надійності, зниження енергоспоживання та вартості виробництва.

Як відповідь на ці виклики, у даній дипломній роботі розглядається розробка віртуального стенду, котрий дозволить вивчення характеристик та поведінку мікромеханічного датчика тиску без необхідності виготовлення реального прототипу. Такий підхід сприятиме не тільки економії ресурсів, але й дасть можливість проводити більш широкі та гнучкі експерименти з датчиками, а також оптимізувати їх проектування на ранньому етапі розробки.

Мета даної роботи полягає у розробці віртуального експериментального стенду для дослідження характеристик мікромеханічного датчика тиску.

РОЗДІЛ 1

МЕМС ДАТЧИКИ ТИСКУ: ПРИНЦИП РОБОТУ ТА ТИПОВІ КОНСТРУКЦІЇ

Цей розділ розглядає мікромеханічні датчики тиску, включаючи їх принципи роботи та класифікацію тиску (абсолютний, надлишковий, диференційний). Обговорюється важливість вибору матеріалів датчика для різних умов експлуатації, а також розвиток мініатюрних датчиків завдяки MEMS технологіям для використання в автомобілебудуванні, авіації та космічній промисловості.

1.1. Класифікація MEMS датчиків тиску

На сучасному етапі розвитку мікроелектромеханічних систем (MEMS) існує кілька основних типів датчиків тиску. Вони відрізняються за принципом дії, конструктивними особливостями та застосуванням специфічних матеріалів та технологій. В залежності від системи вимірювання та приймача відчуття тиску, MEMS датчики тиску можуть класифікуватися на:

Ємнісні датчики тиску - в цих пристроях використовується діафрагма, яка змінює свою відстань від опорного електрода під дією тиску, внаслідок чого змінюється ємність чутливого елемента. Такі сенсори характеризуються високою чутливістю та економічністю енергоспоживання і можливістю мініатюризації.

П'єзрезистивні датчики тиску - принцип роботи таких датчиків заснований на п'єзрезистивному ефекті, при якому під впливом механічного навантаження змінюється електроопір мікροструктурованих резисторів. Вони мають широкі можливості для вимірювань у великих діапазонах тиску і є відносно простими у виготовленні.

П'єзоелектричні датчики тиску - ці датчики використовують здатність

певних матеріалів (наприклад, кераміки або полімерів) генерувати електричний заряд при деформації під дією тиску. П'єзоелектричні датчики не потребують живлення для генерації сигналу та відрізняються високою швидкістю відгуку.

1.2. Принципи роботи MEMS датчиків тиску

MEMS датчики тиску, або мікроелектромеханічні системи, використовуються для точного вимірювання тиску у різних застосуваннях, від промислового обладнання до біомедицини. Центральним елементом таких датчиків є мікромеханічний чутливий елемент, який перетворює фізичний тиск на зміну фізичної величини (наприклад, ємності або резистивності), що далі може бути перетворено на електричний сигнал. Принцип роботи MEMS датчиків тиску заснований на одному з наступних ефектів:

Ємнісний ефект. Датчик тиску використовує діафрагму, яка деформується під впливом тиску, викликаючи зміну відстані між двома обкладками конденсатора і, відповідно, ємності. Зміна ємності електронною системою перетворюється на читабельний вихідний сигнал.

П'єзорезистивний ефект. Цей ефект полягає у зміні електричного опору матеріалу, коли на поверхню датчика впливає тиск, що викликає механічну деформацію матеріалу з п'єзорезистивними властивостями. Ця зміна опору вимірюється та перетворюється в електричний сигнал, який є пропорційним силі тиску. Тензодатчик — це основний компонент п'єзорезистивного датчика деформації, який перетворює механічну зміну деформації на електричний сигнал. Широко використовуються металеві тензодатчики опору та напівпровідникові тензодатчики.

П'єзоелектричний ефект. Використовується у датчиках, що виявляють тиск через п'єзоелектричні матеріали, які генерують електричний заряд при

застосуванні механічної сили. Цей заряд відображає інтенсивність тиску і може бути виміряний відповідним електронним пристроєм.

1.3. Типові конструкції MEMS датчиків тиску

У сучасних мемс-технологіях існує декілька типових конструкцій датчиків тиску, які використовують різні фізичні принципи реакції на зміни у зовнішньому тиску. Прилади, призначені для вимірювання тиску, є невід'ємною частиною численних електронних систем, зокрема в індустрії і медицині. Конструкції мікромеханічних датчиків тиску розрізняються з огляду на спосіб перетворення механічної деформації на електричний сигнал, а також за типом матеріалів та виробничих процесів.

Ємнісні MEMS датчики тиску: Ці датчики складаються з гнучкої діафрагми та жорсткої підстави з нанесеними на них проводять електроди (рис. 1.1). При зміні тиску діафрагма деформується, що призводить до зміни відстані між електродами, а відтак до зміни ємності між ними. Ємнісні датчики тиску забезпечують високу точність та мають невелику потужність споживання.

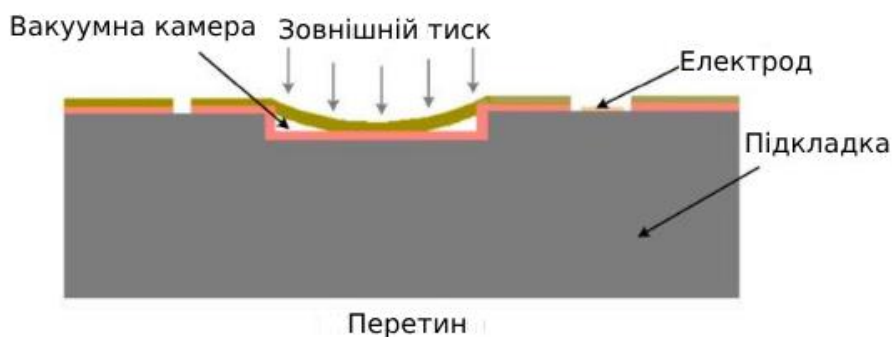


Рисунок 1.1 - Структурна схема ємнісного вакуумного датчика абсолютного тиску MEMS [2]

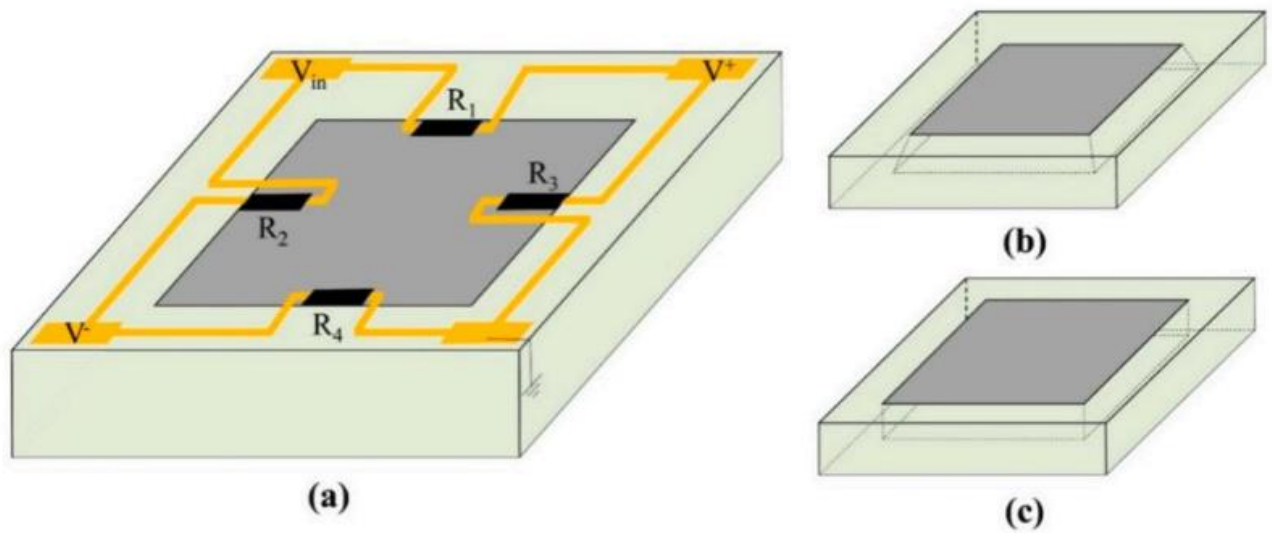


Рисунок 1.2 - Схема п'єзорезистивного датчика тиску. (а) Розташування та з'єднання п'єзорезистора. (b) Порожнина з похилою стікоюю. (c) Порожнина з прямими стінками [1]

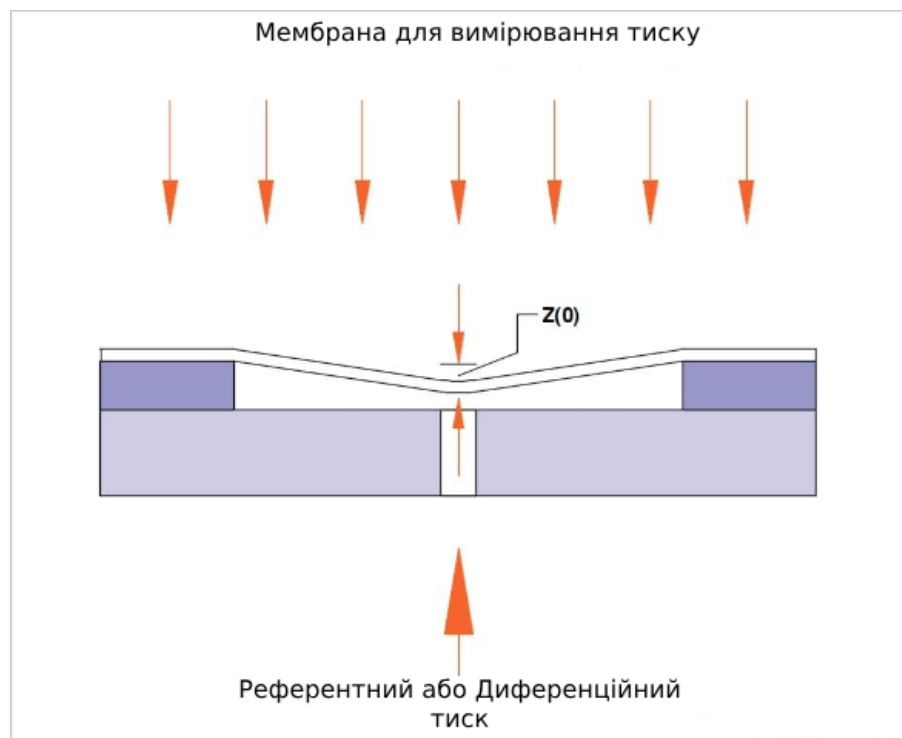


Рисунок 1.3 - Схема п'єзоелектричного датчика тиску. [3]

П'єзорезистивні MEMS датчики тиску: Ці датчики включають тензорезистори, закріплені на або всередині діафрагми (рис. 1.2). При деформації діафрагми змінюється структура кристалічної решітки матеріалу тензорезисторів, що призводить до зміни електричного опору. Вони використовуються в високоточних і високочутливих застосуваннях.

П'єзоелектричні MEMS датчики тиску: П'єзоелектричні датчики не містять рухомих частин і ґрунтуються на способності деяких матеріалів виробляти електричний заряд у відповідь на прикладений тиск (рис. 1.3). Вони особливо корисні для динамічних вимірювань і здатні фіксувати швидкі зміни тиску.

Кожен з цих типів мікромеханічних датчиків тиску має свої переваги та особливості, які роблять їх більш або менш підходящими для різних застосувань. Вибір конкретного типу датчика залежить від різних факторів, таких як діапазон вимірювань, точність, чутливість, витрати, необхідність виживання у складних умовах, таких як високі температури або корозійні середовища, а також вимоги інтеграції з іншими електронними компонентами.

1.4. Вбудований метод самотестування та саморегулювання MEMS датчиків тиску

MEMS BIST (Вбудована функція самотестування) дозволяє пристрою знати про свій власний стан без потреби фізичної сили для проведення вимірювання. Тест на електроіндуковані стимули є одним із найпопулярніших методів BIST. Він використовує електричні сигнали для генерації необхідного фізичного тестового стимулу. Для інфрачервоних датчиків MEMS вплив інфрачервоного випромінювання на датчики замінюється електротепловим випромінюванням для реалізації вбудованого самотестування. Самотестування MEMS конвективного акселерометра досягається шляхом аналізу розподілу

температури в порожнині, яка змінюється електротермічним збудженням. Тест на симетрію також є одним із методів BIST для деяких датчиків MEMS. Для датчика тиску MEMS загальний метод тестування полягає в тому, щоб помістити його в камеру тиску для перевірки його продуктивності. Цей метод є дорогим і важко визначити продуктивність датчика, що використовується.

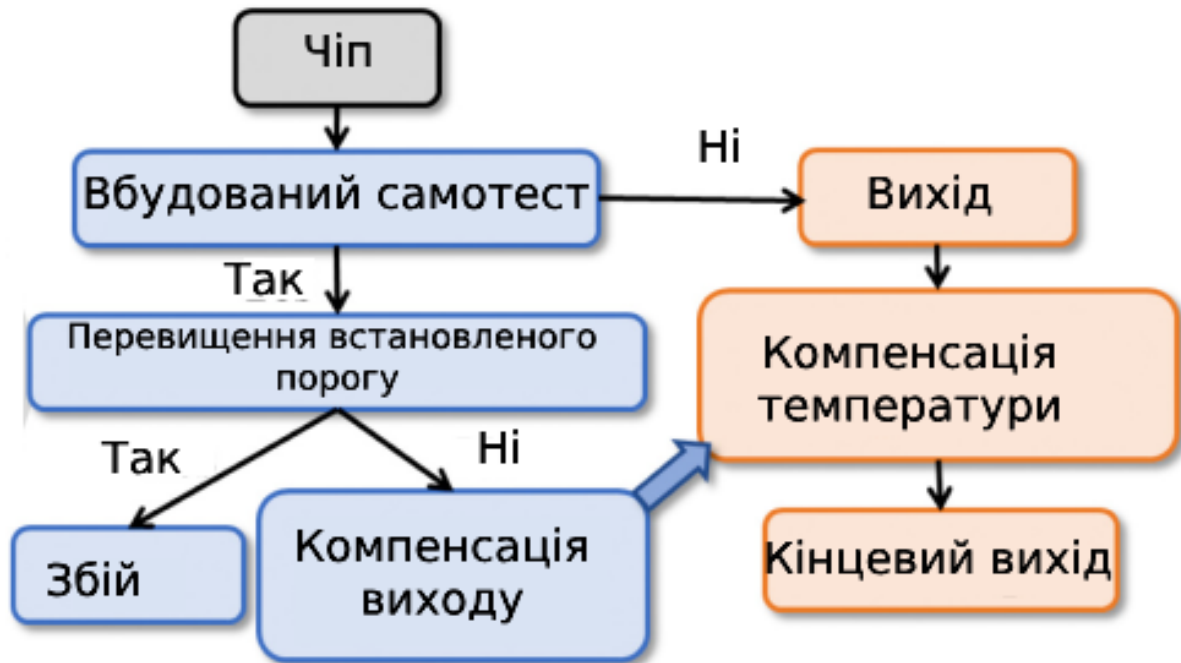


Рисунок 1.4 - Загальний процес MEMS BIST [4]

Загальний процес тестування та калібрування MEMS датчика тиску (рис. 1.4). У центрі системи - нагрівач, що генерує тестові стимули за допомогою електричного сигналу, контрольований через термістор і схему регулювання температури. Датчик складається з багатошарової мембранної структури, що деформується від температурних змін через різні коефіцієнти теплового розширення. Ця деформація відстежується через зміну опору варистора. Для забезпечення точності та надійності датчика проводиться порівняння кривих вихідної характеристики датчика залежно від температури, взятих до та під час

експлуатації. Невідповідність між цими кривими вказує на неполадки датчика, тоді як їх узгодження підтверджує його нормальну роботу. Результати кореляції використовуються для компенсації вихідних даних, підвищуючи точність і надійність датчика.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОМЕХАНІЧНОГО ДАТЧИКА ТИСКУ

2.1. Вибір програмного забезпечення

У рамках розробки віртуального стенду для дослідження мікромеханічного датчика тиску BMP280, особливу увагу слід приділити вибору програмного забезпечення, що дозволяє інтегрувати Arduino та I2C комунікацію. Основні аспекти вибору:

Функціональність: Важливо, щоб програмне забезпечення дозволяло легко працювати з Arduino, надавало можливості для конфігурації I2C з'єднань та підтримувало зв'язок з датчиком BMP280.

Інтерфейс користувача: Програма має бути інтуїтивно зрозумілою і простою у використанні, що дозволить швидко налаштовувати та тестувати проекти з Arduino.

Сумісність: Обране програмне забезпечення має бути сумісним з Arduino та підтримувати I2C протокол для забезпечення гнучкості у розробці.

На основі цих критеріїв, для проекту обрано платформу Tinkercad. Tinkercad — це безкоштовний, онлайн-інструмент, який ідеально підходить для освітніх та експериментальних проектів. Він пропонує не тільки можливості 3D-моделювання, але й інтегроване середовище для роботи з Arduino, дозволяючи легко створювати, налаштовувати та тестувати проекти з Arduino та BMP280. Tinkercad підтримується великою спільнотою користувачів, яка може надати цінні поради та ресурси.

2.2. Створення емулятора датчика

Побудова емулятора датчика BMX280 у Tinkercad на базі Arduino включає використання реверс-інжинірингу для точного моделювання поведінки реального датчика. Процес включає такі етапи:

1. Вивчення Датчика BMX280: Для точного відтворення характеристик датчика BMX280 необхідно ознайомитися з його даташитом [5].

З даташиту ми будемо використовувати зразки значень реєстрів та їх адресу для нашого емулятора (табл. 2.1).

Також нам буде потрібна карта пам'яті (табл. 2.2) для визначення адресу реєстра головних показників.

2. Програмування емулятора: У емуляторі на Arduino ми використовуємо стандартну бібліотеку Wire, оскільки вона вже інтегрована у середовище Tinkercad та забезпечує необхідний функціонал для обробки сигналів від основного пристрою, яким є інша плата Arduino, що функціонує як master-пристрій, зчитуючи дані через протокол I2C. У свою чергу, наш емулятор працюватиме в slave-режимі. З бібліотеки Wire ми будемо використовувати чотири функції: `Wire.begin()`, `Wire.onReceive()`, `Wire.onRequest()` та `Wire.write()`. Для емуляції зовнішньої температури та тиску в емулятор додані два потенціометри (рис. 2.1).

3. Інтеграція з головної Arduino: В середовище де головна Arduino використовується `EgriezBMX280` бібліотека, вона розроблена для реального BMX280 датчика який підключається по протоколу I2C.

4. Візуалізація Даних: В головному Arduino доданий LCD для відображення головних показників як температура та тиск (рис. 2.2). Також є можливість спостерігати за показниками в послідовному моніторі (Serial Monitor) (рис. 2.3).

Таблиця 2.1 – Зразок значень реєстрів [5]

Register Address (LSB / MSB)	Name	Value	Type
0x88 / 0x89	dig_T1	27504	unsigned short
0x8A / 0x8B	dig_T2	26435	short
0x8C / 0x8D	dig_T3	-1000	short
0x8E / 0x8F	dig_P1	36477	unsigned short
0x90 / 0x91	dig_P2	-10685	short
0x92 / 0x93	dig_P3	3024	short
0x94 / 0x95	dig_P4	2855	short
0x96 / 0x97	dig_P5	140	short
0x98 / 0x99	dig_P6	-7	short
0x9A / 0x9B	dig_P7	15500	short
0x9C / 0x9D	dig_P8	-14600	short
0x9E / 0x9F	dig_P9	6000	short
0xA0 / 0xA1			

Таблиця 2.2 – Карта пам'яті [5]

Register Name	Address	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	Reset state
temp_xlsb	0xFC	temp_xlsb<7:4>				0	0	0	0	0x00
temp_lsb	0xFB	temp_lsb<7:0>								0x00
temp_msb	0xFA	temp_msb<7:0>								0x80
press_xlsb	0xF9	press_xlsb<7:4>				0	0	0	0	0x00
press_lsb	0xF8	press_lsb<7:0>								0x00
press_msb	0xF7	press_msb<7:0>								0x80
config	0xF5	t_sb[2:0]			filter[2:0]			spi3w_en[0]		0x00
ctrl_meas	0xF4	osrs_t[2:0]			osrs_p[2:0]			mode[1:0]		0x00
status	0xF3				measuring[0]			im_update[0]		0x00
reset	0xE0	reset[7:0]								0x00
id	0xD0	chip_id[7:0]								0x58
calib25...calib00	0xA1...0x88	calibration data								individual

Registers:	Reserved registers do not write	Calibration data	Control registers	Data registers	Status registers	Revision	Reset
Type:		read only	read / write	read only	read only	read only	write only

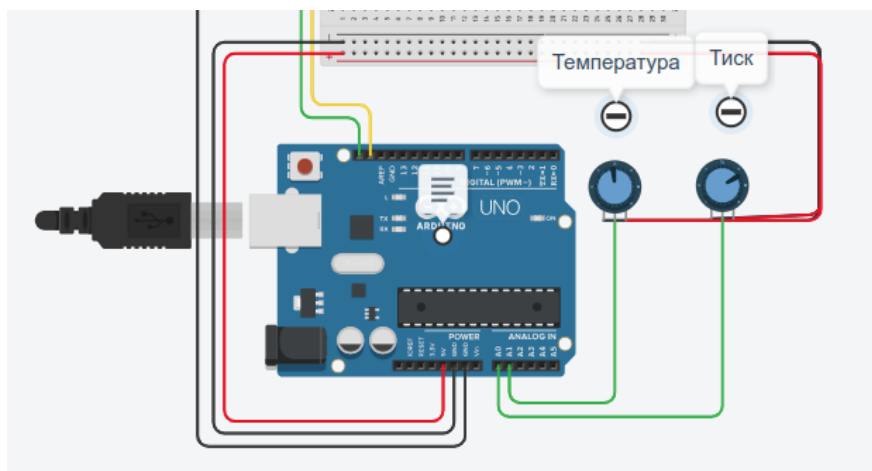


Рисунок 2.1 - Емулятор BMP280 на базі Arduino

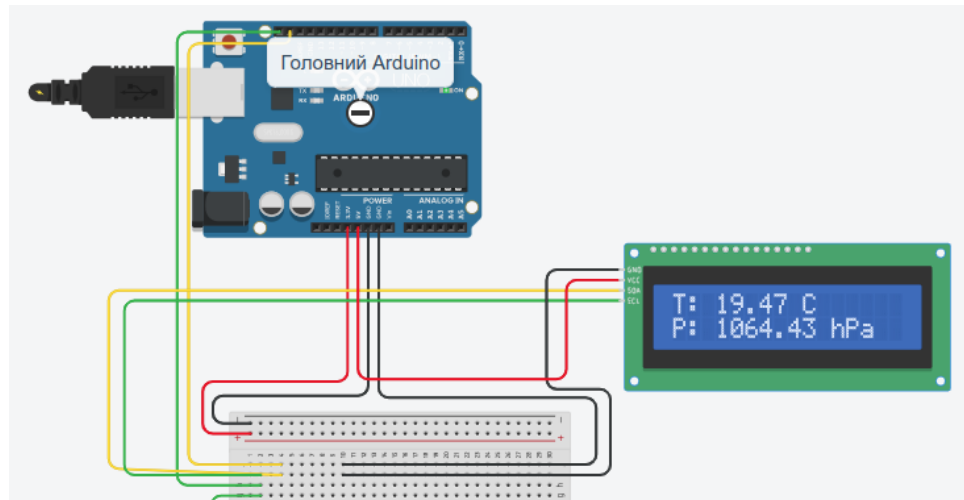


Рисунок 2.2 - Головний Arduino з LCD дисплеєм.

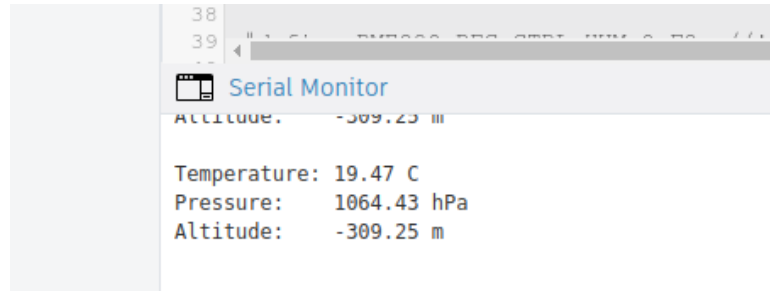


Рисунок 2.3 - Послідовний монітор.

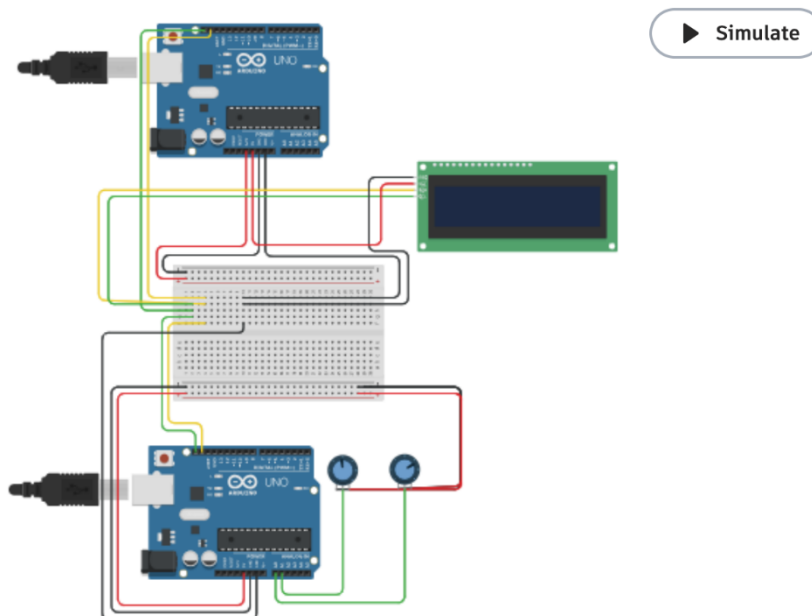


Рисунок 2.4 - Віртуальний стенд

Віртуальний стенд (рис. 2.4.) з емулятором BMX280 сенсора доступний за посиланням: <https://www.tinkercad.com/things/a6QOv1WPmdF-powerful-bigery?sharecode=YkeXquZ2Ik5WaTgtvPzmvOe1k1oMAV5pz653cb8gbqI>

Цей процес вимагає ретельного розуміння характеристик реального датчика BMX280, а також знань можливостей Arduino. Використання Tinkercad як платформи для віртуального моделювання дозволяє гнучко налаштовувати та тестувати емулятор, не вдаючись до використання фізичного обладнання.

2.3. Налаштування параметрів та сценаріїв симуляції

Після успішної інтеграції емулятора з платою Arduino через інтерфейс I2C, наступним важливим кроком є налаштування програмних параметрів. Це ключовий процес, який забезпечує точність та корисність отриманих даних. Налаштування програмних параметрів вимагає глибокого розуміння як самого обладнання Arduino, так і специфіка роботи із сенсорами і комунікаційними протоколами.

Основним завданням є визначення ключових параметрів, необхідних для точного відтворення роботи сенсорів у віртуальному середовищі. Це передбачає ретельний реверс-інженіринг основних функцій з даташита, а також розробку алгоритму для емуляції дійсних значень реєстрів даних тиску та температури.

Процес включає в себе детальний аналіз даташита сенсорів, що дозволяє зрозуміти, яким чином вони зчитують та обробляють дані, а також як ці дані можна використувати в умовах емуляції.

Значною частиною процесу є використання Python для розрахунків, з метою визначення максимальних та мінімальних значень, які будуть використовуватись у функції map. Ця функція ключова, оскільки вона дозволяє перетворювати значення з одного діапазону в інший, імітуючи реальні умови

```

// Returns temperature in DegC, double precision. Output value of "51.23" equals 51.23 DegC.
// t_fine carries fine temperature as global value
BMP280_S32_t t_fine;
double bmp280_compensate_T_double(BMP280_S32_t adc_T)
{
    double var1, var2, T;
    var1 = (((double)adc_T)/16384.0 - ((double)dig_T1)/1024.0) * ((double)dig_T2);
    var2 = (((double)adc_T)/131072.0 - ((double)dig_T1)/8192.0) *
        (((double)adc_T)/131072.0 - ((double)dig_T1)/8192.0) * ((double)dig_T3);
    t_fine = (BMP280_S32_t)(var1 + var2);
    T = (var1 + var2) / 5120.0;
    return T;
}

// Returns pressure in Pa as double. Output value of "96386.2" equals 96386.2 Pa = 963.862 hPa
double bmp280_compensate_P_double(BMP280_S32_t adc_P)
{
    double var1, var2, p;
    var1 = ((double)t_fine/2.0) - 64000.0;
    var2 = var1 * var1 * ((double)dig_P6) / 32768.0;
    var2 = var2 + var1 * ((double)dig_P5) * 2.0;
    var2 = (var2/4.0)+(((double)dig_P4) * 65536.0);
    var1 = (((double)dig_P3) * var1 * var1 / 524288.0 + ((double)dig_P2) * var1) / 524288.0;
    var1 = (1.0 + var1 / 32768.0)*((double)dig_P1);
    if (var1 == 0.0)
    {
        return 0; // avoid exception caused by division by zero
    }
    p = 1048576.0 - (double)adc_P;
    p = (p - (var2 / 4096.0)) * 6250.0 / var1;
    var1 = ((double)dig_P9) * p * p / 2147483648.0;
    var2 = p * ((double)dig_P8) / 32768.0;
    p = p + (var1 + var2 + ((double)dig_P7)) / 16.0;
    return p;
}

```

Рисунок 2.4 - Основні функції з даташита сенсора [5]

```

x_approximate_adc_T.py > ...
1  def approximate_adc_T(known_temp, dig_T1, dig_T2, dig_T3):
12     adc_T = 0 # Initial guess
13     step = 100 # Step size for adjusting adc_T
14     max_iterations = 10000 # To prevent infinite loops
15     tolerance = 0.01 # Temperature difference tolerance
16
17     for _ in range(max_iterations):
18         var1 = (((adc_T >> 3) - (dig_T1 << 1)) * dig_T2) >> 11
19         var2 = (((((adc_T >> 4) - dig_T1) * ((adc_T >> 4) - dig_T1)) >> 12) * dig_T3) >> 14
20         t_fine = var1 + var2
21         temperature = ((t_fine * 5) + 128) >> 8
22         temperature = temperature / 100.0
23
24         if abs(temperature - known_temp) < tolerance:
25             return adc_T, t_fine
26
27         if temperature < known_temp:
28             adc_T += step
29         else:
30             adc_T -= step
31
32     return None, 0

```

Рисунок 2.5 - Лістинг скрипта для визначення adc_T.

```

x_approximate_adc_P.py > ...
1  def approximate_adc_P(known_pressure, _t_fine, _dig_P1, _dig_P2, _dig_P3, _dig_P4, _dig_P5, _dig_P6, _dig_P7, _dig_P8, _dig_P9):
11     low = 0
12     high = 1 << 30 # Maximum adc_P value for a 20-bit ADC
13     tolerance = 5 # Pressure difference tolerance in Pa
14
15     while low <= high:
16         adc_P = (low + high) // 2
17
18         var1 = _t_fine - 128000
19         var2 = var1 * var1 * _dig_P6
20         var2 = var2 + ((var1 * _dig_P5) << 17)
21         var2 = var2 + (_dig_P4 << 35)
22         var1 = ((var1 * var1 * _dig_P3) >> 8) + ((var1 * _dig_P2) << 12)
23         var1 = (((1 << 47) + var1) * _dig_P1) >> 33
24
25         if var1 == 0:
26             return 0
27
28         p = 1048576 - adc_P
29         p = (((p << 31) - var2) * 3125) // var1
30         var1 = ((_dig_P9 * (p >> 13) * (p >> 13)) >> 25)
31         var2 = ((_dig_P8 * p) >> 19)
32
33         p = ((p + var1 + var2) >> 8) + (_dig_P7 << 4)
34         p = p / 256
35
36         if abs(p - known_pressure) <= tolerance:
37             return adc_P
38
39         if p < known_pressure:
40             low = adc_P + 1
41         else:
42             high = adc_P - 1
43
44     return None

```

Рисунок 2.6 - Лістинг скрипта для визначення adc_P.

```

float getMappedTemperature() {
    int sensorValue = analogRead(A1);
    return map(sensorValue, 0, 1023, 5019200 >> 4, 11296000 >> 4);
}

float getMappedPressure() {
    int sensorValue = analogRead(A0);
    return map(sensorValue, 0, 1023, 14806688 >> 4, 39806688 >> 4);
}

```

Рисунок 2.7 — Лістинг використання adc_T та adc_P даних в емуляторі.

роботи сенсорів. На цьому етапі важливо досягти високої точності в емуляції, щоб дані, які будуть відтворені в емуляторі, максимально наближались до реальних показників. Для цього нам потрібно визначити adc_T та adc_P, за допомогою скриптів для мінімальної та максимальної температури та тиску що б використовувати отриманні данні в емуляторі (рис. 2.5 - 2.7).

Після налаштування та відтворення зовнішніх умов, таких як температура та тиск, в емуляторі, дані будуть передаватися через I2C інтерфейс до головної плати Arduino. В цю плату інтегровано бібліотеку для роботи з сенсором BMX280, яка забезпечує конвертацію отриманих від емулятора даних у реальні фізичні значення. Процес передачі даних через I2C має бути точно налаштований, щоб забезпечити надійний обмін інформацією між емулятором та реальним обладнанням, зважаючи на те, що точність цих даних має критичне значення для подальших експериментів та досліджень.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОМЕХАНІЧНОГО ДАТЧИКА ТИСКУ ЯК ВИМІРЮВАЧА БАРОМЕТРИЧНОЇ ВИСОТИ

3.1. Теоретичні основи мікромеханічних датчиків тиску

Мікромеханічні датчики тиску використовують мініатюрні механічні елементи для вимірювання тиску. Основним елементом таких датчиків є мембрана, чутливість якої змінюється під впливом зовнішнього тиску. Зміна форми мембрани викликає зміну електричного сигналу, який інтерпретується як міра тиску. Цей процес залежить від таких параметрів, як товщина та матеріал мембрани, що впливає на її чутливість та точність.

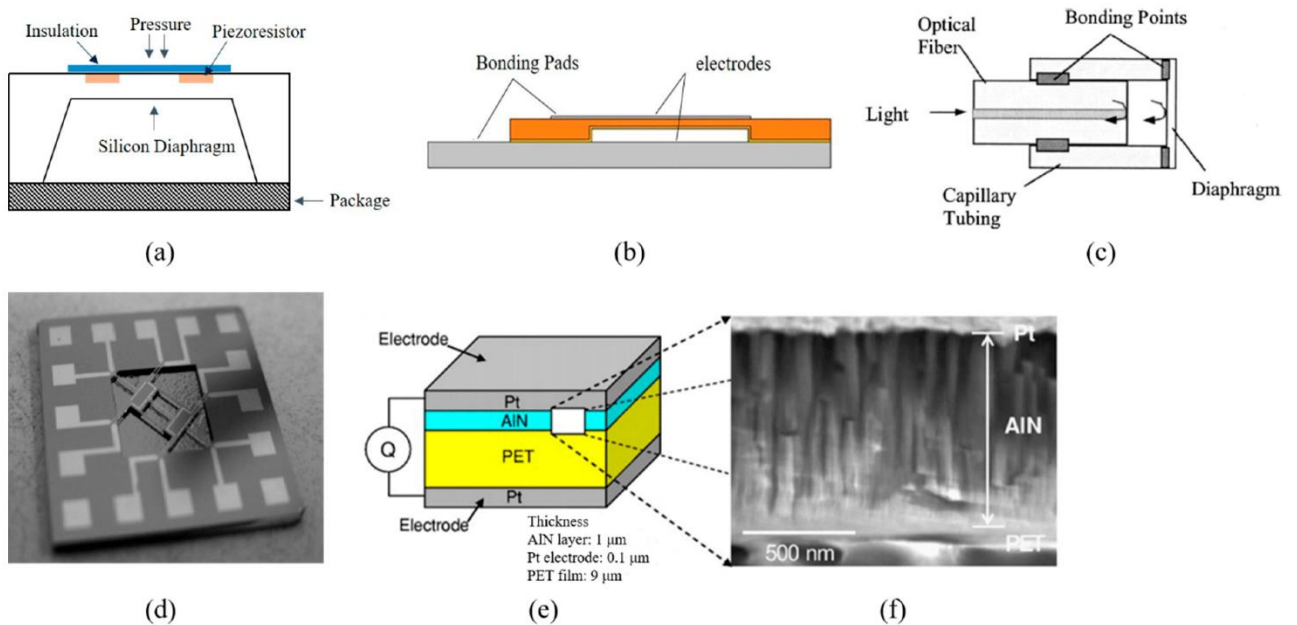


Рисунок 3.1 - Схематичне зображення мікромеханічного датчика тиску з виділеною мембраною та електричними контактами [10]

Мікромеханічні датчики тиску виготовляються з використанням кремнію, полімерів або комбінації цих матеріалів. Кремній є популярним вибором через його механічні властивості та високий рівень сумісності з мікроелектронними процесами. Технологія виробництва включає фотолітографію, травлення, та інші процеси виготовлення, що дозволяють досягати високої точності та надійності датчиків.

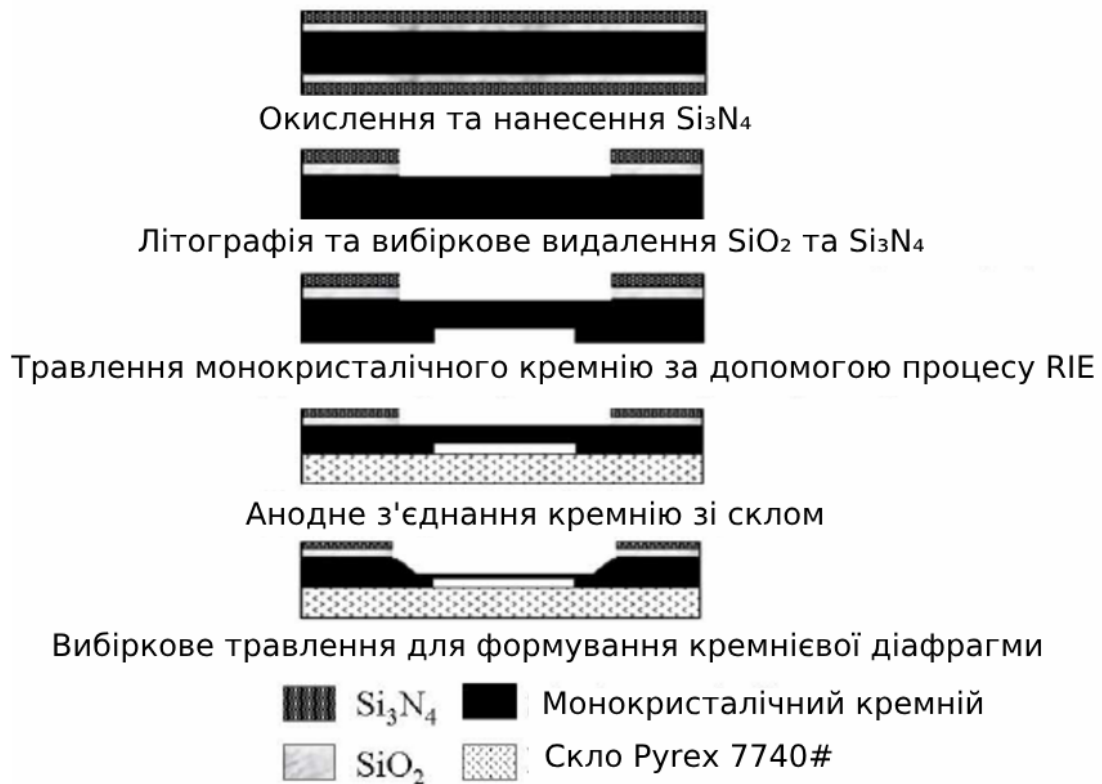


Рисунок 3.2 - Етапи виробництва мікромеханічного датчика тиску [16]

Існують різні типи мікромеханічних датчиків тиску, включаючи п'єзорезистивні, ємнісні, та оптичні датчики. П'єзорезистивні датчики використовують зміну опору матеріалу під впливом механічного навантаження, тоді як ємнісні датчики вимірюють зміни ємності, викликані деформацією мембрани. Оптичні датчики, у свою чергу, використовують зміну інтенсивності

або фази світла для вимірювання тиску.

Також є залежність від температури, яка називається температурною компенсацією і є важливою складовою при роботі мікромеханічних датчиків тиску, оскільки температурні зміни можуть впливати на точність вимірювань. Системи компенсації зазвичай вбудовуються у датчики для коригування чутливості та виходу сигналу в залежності від температури.

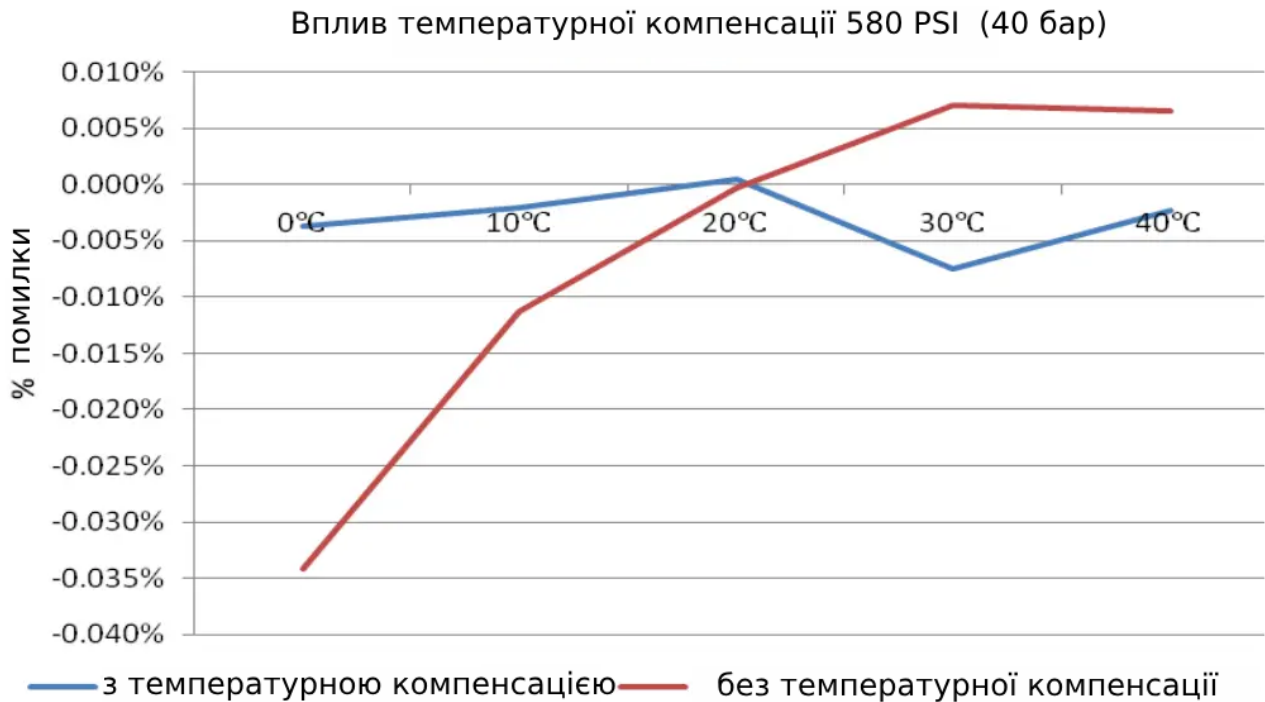


Рисунок 3.3 - Температурною компенсація [18]

Мікромеханічні датчики тиску мають широкий спектр застосувань, включаючи медицину, авіацію, автомобільну промисловість та промислове обладнання. У медицині вони використовуються для моніторингу кров'яного тиску та дихальних функцій, у авіації - для вимірювання висоти польоту та атмосферного тиску, а в автомобілях - для контролю тиску в шинах та різних системах автомобіля.

3.2. Використання датчика для вимірювання барометричної висоти

У процесі вимірювання барометричної висоти, ємнісний датчик реагує на деформацію своєї мембрани, яка відбувається під впливом зовнішнього тиску. П'єзорезистивний датчик, в свою чергу, фіксує зміни опору свого матеріалу, що також обумовлено деформацією через зміни атмосферного тиску, від чого залежить і висота.

Таблиця 3.1 – порівняння характеристик п'єзорезистивного та ємнісного вимірювання

Характеристика	П'єзорезистивне вимірювання	Ємнісне вимірювання
Лінійність	Добра	Задовільна
Точність	$\pm 1\%$	$\pm 0.2\%$
Роздільна здатність	1 частина в 10^5	1 частина в 10^4 до 10^5
Помилка температури	$\sim 1600 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$\sim 4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Вартість	Низька	Середня
Електроніка	Проста	Складна

Основою мікромеханічного датчика тиску є мембрана, що змінює свою форму відповідно до коливань атмосферного тиску. Така деформація, викликана зміною висоти, використовується для точного вимірювання барометричної висоти за допомогою барометричної (3.1) [7] та гіпсометричної формули (3.2).

$$P = P_0 \exp[-\mu g (h - h_0) / R T], \quad (3.1)$$

де P , P_0 — тиск газу відповідно на висоті h і h_0 , R — газова стала.

$$h = z_2 - z_1 = \frac{R \cdot \overline{T_v}}{g} \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right), \quad (3.2)$$

де h - товщина шару [м], z - геометрична висота [м], R - питома газова константа для сухого повітря, T_v - середня віртуальна температура в Кельвінах [К], g - гравітаційне прискорення [м/с²], p - тиск [Па].

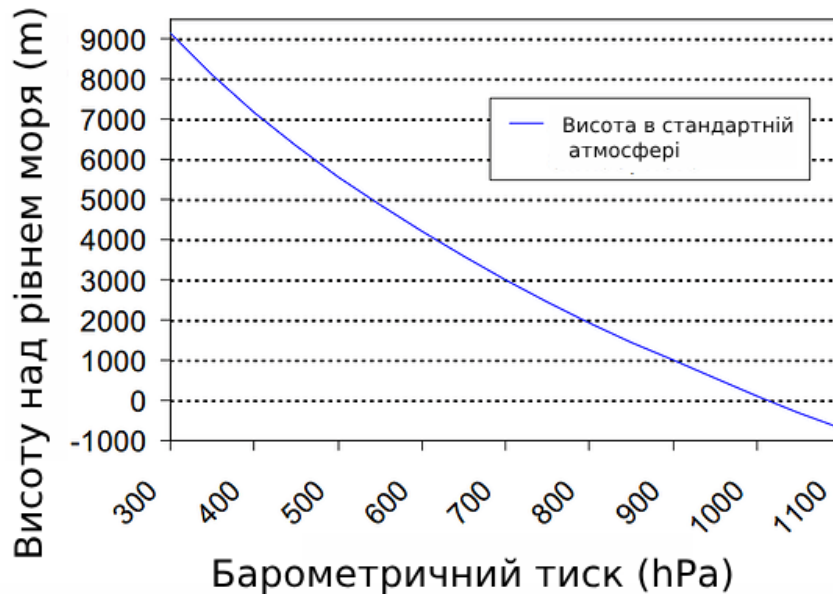


Рисунок 3.4 - Залежність тиску від висоти [17]

На графіку, представленою на рисунку (рис. 3.4), чітко видно, як атмосферний тиск зменшується зі зростанням висоти. Ця закономірність є ключовою для розуміння принципів роботи барометричних датчиків. Використання цих даних дозволяє точно визначати висоту літального апарата, географічну елевацію або зміни висоти під час гірських експедицій.

Важливим аспектом є також температурна компенсація. Оскільки температура повітря має тенденцію до зміни з висотою, це може вплинути на точність датчиків. Сучасні мікромеханічні датчики тиску часто включають в себе елементи для корекції помилок, спричинених температурними коливаннями.

Застосування цих датчиків не обмежується лише аеронавтикою чи геодезією. Вони також широко використовуються в метеорології для прогнозування погодних умов, у спортивному обладнанні для відстеження висоти польоту та навіть у смартфонах для надання додаткових даних для мобільних застосунків.

У майбутньому, з подальшим розвитком технологій, можна очікувати ще більшої точності та мініатюризації цих датчиків, що відкриє нові горизонти для їх застосування в різноманітних галузях.

ВИСНОВКИ

1. Активний прогрес у мікроелектроніці відкриває широкі можливості для оснащення об'єктів у сфері ракетно-космічних, авіаційних та цивільних технологій сучасними датчиками тиску, принцип дії яких ґрунтується на перетворенні зовнішнього тиску, що діє на чутливий елемент, у вихідний електричний сигнал.
2. Основними критеріями вибору платформи Tinkercad при експериментального стенду для дослідження характеристик мікромеханічного датчика тиску BMP280 були її функціональність, інтерфейс користувача, сумісність з Arduino та та підтримувати I2C протокол для забезпечення гнучкості у розробці.
3. Показано, що процес передачі даних через I2C має бути точно налаштований, щоб забезпечити надійний обмін інформацією між емулятором та реальним обладнанням, зважаючи на те, що точність цих даних має критичне значення для подальших експериментів та досліджень.
4. Результати експериментальних досліджень показали, що мікромеханічні датчики тиску забезпечують надійний та точний спосіб вимірювання барометричної висоти, що є важливим у багатьох сферах, включаючи авіацію, метеорологію та геодезію. Розуміння їх принципів роботи та характеристик є ключовим для розробки ефективних вимірювальних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kumar, S.S.; Mukhiya, R.; Ali Akbar, S. High-resolution current mode interface for MEMS piezoresistive pressure sensor // AEU Int. J. Electron. Commun. 2021. 134. P. 153707.
2. Yongjian Feng, Xiaodong Han, Xin Ke, Gang Li b, Yibo Zeng, Huangping Yan, Detian Li. Design and fabrication of an absolute pressure MEMS capacitance vacuum sensor based on silicon bonding technology // Vacuum. 2021. 186. P. 110065.
3. IQS Directory. Pressure Transducer. USA, Grand Rapids, 2022.
4. Jia Li, Weibing Wang, Dapeng Chen. A built-in self-test and self-adjustment method of MEMS pressure sensor // Microelectronics Reliability. 2022. 136. P. 114668.
5. Bosch Sensortec. BMA150 data sheet Rev. 1.4. 2015. BST-BMP280-DS001-11. 49 p.
6. Peishuai Song, Zhe Ma, Jing Ma, Liangliang Yang, Jiangtao Wei, Yongmei Zhao, Mingliang Zhang, Fuhua Yang, Xiaodong Wang. Recent Progress of Miniature MEMS Pressure Sensors. 2018. P. 2-38.
7. Fink J. Physical Chemistry in Depth. Heidelberg; New York: Springer, 2009. 588 p.
8. Yole Developpment. MEMS Gyro Markets. April 2006, Lyon, France. P. 22-37.
9. Jena, S., Pandey, C., Gupta, A. Mathematical modeling of different diaphragm geometries in MEMS pressure sensor // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 27, No. 4, P. 691-694.
10. Song, Peishuai, Zhe Ma, Jing Ma, Liangliang Yang, Jiangtao Wei, Yongmei Zhao, Mingliang Zhang, Fuhua Yang, and Xiaodong Wang. "Recent Progress of Miniature MEMS Pressure Sensors." Micromachines. 2020. 11, No. 1. P. 56. <https://doi.org/10.3390/mi11010056>

11. Casillas, A., Modera, M., Pritoni, M. Using non-invasive MEMS pressure sensors for measuring building envelope air leakage // *Energy & Buildings*. 2021. 233. P. 110653.
12. Thakar, V.C., Patel, B.N., Karsh, P.K. Design & analysis of diaphragm for MEMS based pressure sensors // *Materials Today: Proceedings*. 2022. 65. P. 3683–3687.
13. Zhang, Q., Shen, S., Li, H., Cao, W., Tang, W., Jiang, J., Deng, M., Zhang, Y., Gu, B., Wu, K., Zhang, K., Liu, S. Digital twin-driven intelligent production line for automotive MEMS pressure sensors // *Advanced Engineering Informatics*. 2022. 54. P. 101779.
14. Basov, M. High-sensitivity MEMS pressure sensor utilizing bipolar junction transistor with temperature compensation // *Sensors and Actuators A*. 2020. 303. P. 111705.
15. Zhang, Y., Wu, K., Li, H., Shen, S., Cao, W., Li, F., Han, J. Thermal fatigue analysis of gold wire bonding solder joints in MEMS pressure sensors by thermal cycling tests // *Microelectronics Reliability*. 2022. 139. P. 114829.
16. Li, M., Wang, M., Li, H. Optical MEMS pressure sensor based on Fabry-Perot interferometry // *Optics Express*. March 2006. Vol. 14, No. 4. P. 1497-1504. DOI:10.1364/OE.14.001497.
17. Seeed Studio. Xadow Barometer BMP180. [Электронный ресурс]. Доступно: https://wiki.seeedstudio.com/Xadow_Barometer_BMP180/. Дата звернення: 08.12.2023.
18. Sanders, J. Why Temperature Compensation Really Matters for Pressure Measurement. [Электронный ресурс]. Additel Corporation. Доступно: <https://www.additel.com/>. Дата звернення: 08.12.2023