

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИ-
ТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«На правах
рукопису»
УДК 681.2

«До захисту допу-
щено» В. о. завідувача
кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

“_____” ____ 2025 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 176 мікро- та наносистемна техніка
(код і назва)

на тему: **Прецизійний вимірювач лінійної швидкості газу.**

Виконав: студент 2 курсу, групи ДП-41мп
(шифр групи)

_____ М'ячев Володимир Олександрович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник: к.т.н., Заворотний Віктор Федорович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____
(підпис)

Консультант з технічних питань к.т.н. Борис ЛУПИНА _____
(підпис)

Консультант _____ з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с.
_____ Георгій СВЄЧНИКОВ _____
(підпис)

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н. Юрій ДІДЕНКО. _____
(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисер-
тації немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний ін-
ститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) електроніки
(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (магістерський)

Спеціаль- 176 Мікро – та наносистемна техніка
ність (код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

«_____» 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

М'ячеву Володимирі Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Прецизійний вимірювач лінійної швидкості газу.

_____,
науковий керівник дисертації к.т.н., Заворотний Віктор Федорович,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «_____» 20__ р. №

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження: метод вимірювання лінійної швидкості газового потоку.

4. Предмет дослідження: прецизійний вимірювач лінійної швидкості газу, його конструкція, принцип дії та метрологічні характеристики при виконанні точних вимірювань.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Проаналізувати існуючі методи та засоби вимірювання лінійної швидкості газу, визначити їхні переваги, обмеження та область застосування. Виготовити макет електричної схеми живлення сенсорного елементу FS2 та формування вихідної характеристики в калориметричному режимі з підтриманням сталої різниці температур нагрівача і оточуючого середовища за принциповою схемою. Виконати експериментальні дослідження працездатності приладу та визначити його метрологічні характеристики: точність, чутливість, відтворюваність результатів.

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання дав	завдання прийняв
Розділи 1, 2, 3, 4, 5	Лупина Б.І., зав. лаб. медичної сенсорики ФЕЛ, к.т.н.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ /п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Підпис керівника
	Літературний огляд науково-технічних джерел інформації	Вересень 2025	
	Ознайомлення з існуючими метрологічними пристроями, структурою та основними вузлами локальних чистих зон, інженерними методиками та обладнанням для проведення вимірювань.	Вересень – жовтень 2025	
	Аналіз існуючих пристроїв: сенсорів, систем збору даних, контролерів	Вересень – Жовтень 2025	
	Підбір та замовлення компонентів з оптимальними технічними конструктивними та електричними параметрами	Жовтень 2025	
	Вибір шляху реалізації системи, ознайомлення з параметрами обраного сенсора, розробка структурної схеми	Жовтень 2025	
	Практична робота з розробленим пристроєм Розробка програмного коду, отримання та оцінка параметрів	Листопад 2025	
	Оформлення дипломної роботи	Листопад 2025	

Студент _____
(підпис)

М'ячев Володимир
(ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

Науковий керівник дисертації _____
(підпис)

Заворотний Віктор
(ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації

РЕФЕРАТ

Структура і обсяг роботи: 62 сторінок, 23 ілюстрацій, 3 таблиці, 27 джерел за переліком посилань.

Мета роботи: розробка та дослідження прецизійного вимірювача лінійної швидкості газу, що забезпечує високу точність, стабільність та відтворюваність результатів у широкому діапазоні робочих умов.

Рекомендації щодо використання результатів даних досліджень: результати можуть бути використані в системах контролю малих потоків, в промисловості, науці, медицині, енергетиці та для моніторингу навколишнього середовища.

Ключові слова: мікро-електро-механічна система (МЕМС), сенсор лінійної швидкості повітря.

ABSTRACT

Structure and scope of work: 62 pages, 23 illustrations, 3 tables, 27 sources in the list of references.

Purpose of work: development and research of a precision gas linear velocity meter that ensures high accuracy, stability, and reproducibility of results in a wide range of operating conditions.

Recommendations for using the results of this research: results of this work can be used in small flow control systems, in industry, science, medicine, and energy, and for environmental monitoring.

Keywords: micro-electro-mechanical system (MEMS), linear air velocity sensor.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, символів, одиниць, умовних позначень і термінів	7
Вступ.....	8
Розділ 1 Огляд літератури та нормативних вимог.....	11
Розділ 2 Теоретичні основи та моделювання датчика FS2	19
2.1. Фізичні принципи роботи датчика FS2	20
2.2 Модель вихідного сигналу сенсора FS2	23
2.3 Електрична модель сенсора FS2: міст, підсилення, фільтрація, ADC, компенсація температури, характеристики.....	26
Розділ 3 Проектування та реалізація апаратної частини.....	33
3.1 Вимоги до апаратури та загальні принципи побудови системи	33
3.2 Реалізація електричної схеми, підсилення, фільтрації та підключення до NI ELVIS II	35
3.3 Технічна документація до ELVIS II.....	37
Розділ 4 Експериментальна частина	39
Розділ 5 Аналіз результатів.....	54
Висновок	58
Джерела	59

Перелік скорочень, символів, одиниць, умовних позначень і термінів

АЦП - аналого-цифровий перетворювач

FS2 - мікротермальний сенсор потоку газу Flow Sensor 2 виробництва IST AG

IST AG - Innovative Sensor Technology AG (Швейцарія)

NI ELVIS II - National Instruments Educational Laboratory Virtual

Instrumentation LabVIEW - Laboratory Virtual Instrument Engineering

Workbench, програмне середовище для збору та обробки даних

MEMC / MEMS - мікроелектромеханічні системи (Micro-Electro-Mechanical Systems)

ССА - термоанемометр з постійним струмом (Constant Current Anemometer)

Gnd - земля

LM7805 - інтегральний стабілізатор напруги 5 В

INA122, LM358 - типові операційні підсилювачі / інструментальні підсилювачі

CMRR (Common Mode Rejection Ratio) - коефіцієнт придушення синфазної складової

Pt100 - платиновий терморезистор із номінальним опором 100 Ω при 0 °С

TCR (Temperature Coefficient of Resistance) - температурний коефіцієнт опору

RC-фільтр - фільтр низьких частот на основі резистора (R) та конденсатора (C)

V - напруга, вольт

I - струм, ампер

R - опір, ом

T - температура, °С

U_{вих} - вихідна напруга

v - швидкість потоку газу, м/с

α , β , n - емпіричні коефіцієнти рівняння Кінга

ρ - густина газу, кг/м³

h - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К)

ΔU - різниця потенціалів на мостовій діагоналі

ΔT - різниця температур між терморезисторами

Вступ

Швидкий розвиток передових технологій швидкості газу стає все більш актуальним.

Ці інновації знаходять застосування в моніторингу навколишнього середовища, промисловості, науці, медицині та енергетиці. Точність вимірювання швидкості повітря є визначальним фактором у роботі вентиляційних систем, точності технологічних процедур та експлуатаційній безпеці установок. Поява цифрової обробки сигналів, мікроелектромеханічних структур та постійне вдосконалення сенсорних технологій відкривають шлях до створення невеликих, високочутливих та енергоефективних вимірювальних приладів [1, 2, 3].

Все більшого значення набуває наявність систем, які можуть стабільно працювати без необхідності складного технічного обслуговування навіть в умовах коливань температури та тиску. Тому надзвичайно важливо проводити дослідження теплових анемометричних датчиків, що поєднують високу точність з простотою конструкції [4, 5, 6].

- **Актуальність.** З розвитком науки і техніки контроль параметрів газового середовища повинен ставати більш точним і надійним. У системах вентиляції та клімат-контролю, медичних приладах, системах очищення повітря, промислових об'єктах, лабораторних дослідженнях і військовому обладнанні вимірювання швидкості повітря і газу є надзвичайно важливим питанням, де наслідки мають вирішальне значення. Це особливо важливо в таких сферах, як технологія, камери біологічної безпеки та чисті приміщення, де навіть незначна зміна швидкості повітряного потоку може призвести до порушення безпеки оператора або чистоти повітря [7, 8].

Більшість існуючих приладів для вимірювання швидкості газу є важкими, менш чутливими або не забезпечують необхідну швидкість при зміні навколишніх умов. Використання певних промислових анемометрів у невеликих або автономних системах ускладнюється обмеженням діапазоном вимірювання та необхідністю частого калібрування. Водночас сучасні мікроелектромеханічні технології (MEMS) відкривають можливості для розробки компактних, енергоєфективних та високочутливих датчиків потоку [2, 6, 9, 10].

Датчик FS2 від IST AG це сенсор, на основі якого в одному експерименті можна реалізувати обидва методи вимірювання лінійної швидкості флюїду: термоанемометричний та колориметричний. Перший метод виявляє зміну тепловіддачі від нагрівача внаслідок потоку газу, а другий – зміну розподілу температури в середовищі поблизу нагрівача. Калориметричний метод має переваги над термоанемометричним: висока стабільність, компактна конструкція та здатність функціонувати в широкому діапазоні швидкостей [11, 12, 13].

Розробка власного вимірювача швидкості газу на основі комерційно доступного сенсорного елемента виробництва компанії IST моделі FS2 є важливою, оскільки дає можливість спроектувати прилад для заданого діапазону роботи та точності, які часто важко досягти за допомогою інших доступних комерційних продуктів. Водночас використання лабораторної платформи NI ELVIS II не тільки дозволяє нам моделювати електронну складову пристрою, але й дає можливість проводити експерименти та перевіряти метрологічні характеристики пристрою без необхідності виготовлення цілого промислового зразка. Це відповідає теоретичним моделям і дає можливість отримати достовірну інформацію навіть за короткий проміжок часу [14, 15, 16].

Дослідження теплових сенсорів потоку флюїду (рідини чи газу) має велику наукову та практичну цінність, оскільки дозволяє дослідити і оптимізувати

процеси передачі тепла від нагрівального елементу до потоку флюїду, а також на вплив температури, вологості та складу оточуючого газу на вимірювальний сигнал. Це сприятиме розробці алгоритмів корекції помилок, що є важливою невід'ємною складовою в розвитку метрології низькошвидкісних потоків [8, 12, 15].

Розділ 1

Огляд літератури та нормативних вимог

У сучасному суспільстві пристрої для вимірювання швидкості повітряного потоку еволюціонували від простих анемометрів до мікросенсорних рішень на основі технологій MEMS. Кожен тип пристрою має свої переваги. Наприклад, використання механічної конструкції має такі переваги, як простота і низька вартість. Ультразвукові анемометри є безконтактними, тоді як лазерні анемометри є дуже точними, але складними у використанні. Теплові анемометри є проміжними, маючи такі переваги, як чутливість, портативність та стабільність.

Нові наукові дослідження приділяють багато уваги питанню калібрування, метрологічних стандартів та проблемі температурної компенсації, без яких неможливо забезпечити надійні результати.

1.1. Огляд методів вимірювання швидкості газу: основні характеристики та можливості кожного методу

Вимірювання швидкості газів знаходить важливе застосування в різних галузях науки і техніки, вентиляції та кондиціонуванні, аеродинамічних дослідженнях, промисловості та медицині. Існують різні способи вимірювання швидкості, і кожен метод має свої переваги, недоліки та сферу застосування. Це механічні, теплові або анемометричні, ультразвукові, оптичні та лазерні методи [1, 4].

- Механічні методи. Найпоширенішими і традиційними є механічні анемометри, які використовують перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічний рух. До них відносяться лопатеві, чашкові та лопаткові ане-

мометри. Цей процес передбачає обертання тіл, пропорційне швидкості повітряного потоку, а показання можна отримати за допомогою індуктивного та оптичного датчика обертання [17].



Рисунок 1.1 - Приклади механічних анеометрів[18]

Перевагами таких приладів є їх проста конструкція, низька вартість і можливість візуальної оцінки швидкості потоку. Вони застосовуються для вимірювання швидкості від 0,5 м/с до 20 м/с, що доречно для вентиляційних та кліматичних систем [17].

Основними недоліками механічного методу є наявність інертних мас у рухомих частинах, що знижує швидкість роботи, та знос компонентів, що знижує

точність методу з часом. Крім того, такий анемометр не працює добре при низьких швидкостях ($< 0,2$ м/с) та високому рівні турбулентності та запиленості [17].

- **Термічні (анемометричні та калориметричні) методи.** Термічні методи вимірювання базуються на розсіюванні тепла від нагрітого резистора, розміщеного в потоці газу. Зі збільшенням швидкості газу збільшується і розсіюване тепло, а також зростає опір нагрітого резистора і деформується температурне поле оточуючого флюїду [20, 21].



Рисунок 1.2 - Приклад термоанемометра[22]

Найпоширенішими типами є анемометри постійного струму (ССА) та анемометри постійної температури (СТА). У першому методі електричний струм,

що проходить через нагрівач, залишається постійним, а різниця в електричному струмі вказує на різницю в ефекті охолодження. У другому методі електричний струм, що підтримує постійну температуру елемента, вказує на швидкість флюїду [16, 17].

Переваги термічних анемометрів:

- висока чутливість до низьких швидкостей до 0,001 м/с.
- можливість вимірювання в невеликих каналах і мікропотоках.
- відсутність рухомих частин, що робить його довговічним і надійним.
- швидка реакція на зміни потоку (до декількох мілісекунд, в сенсорних елементах, виготовлених за технологією MEMS).

Недоліки:

- залежність від температури і складу газів, що вимагає температурної компенсації.
- необхідність калібрування для кожного типу газу.
- обмежена робота в умовах високої турбулентності/агресивності середовища.

Сучасні мікросенсорні рішення, такі як IST FS2, базуються на вищезазначеному принципі, але реалізовані з використанням технологій виготовлення електронних компонентів: нанесення тонких діелектричних та провідникових прошарків, формування прецизійного рисунку методами фотолітографії з високою роздільною здатністю при формуванні мікроскопічних платинових елементів, що знаходяться на тонкій керамічній підкладці. Це зменшує вплив ін-

рційних сил, забезпечує стабільність під час вимірювання, а також високу чутливість однак призводить до більшого енергоспоживання і меншою швидкості в порівнянні з MEMS структурами.

- **Ультразвукові методи.** Ультразвукові пристрої для вимірювання швидкості газу використовують ефект Доплера або час, необхідний для проходження ультразвукового сигналу між двома п'єзоелектричними елементами, розташованими під кутом до технологічного потоку. Коли газ рухається, різниця між часом, необхідним для проходження сигналу вниз і вгору за напрямком руху газу та проти напрямку руху газу, створює інтервал, який можна обчислити для визначення швидкості.



Рисунок 1.3 - Приклад ультразвукового анемометра[22]

Переваги ультразвукових методів:

- відсутність рухомих частин і контакту з навколишнім середовищем.
- здатність добре функціонувати в різних умовах температури і тиску.
- стабільність показань під час тривалого використання.

Недоліки:

- необхідність правильної калібрування на основі складу газу, оскільки швидкість звуку залежить від відповідних рівнів температури і вологості.

- проблеми, пов'язані з вимірюванням низької швидкості (швидкість $< 0,1$ м/с).

- вплив зовнішнього шуму та турбулентності на точність результату.

Ультразвукові анемометри особливо добре підходять для використання в метеорологічних станціях, середніх вентиляційних установках та великомасштабній промисловості, де безконтактний метод роботи стає критично важливим.

- **Лазерні (оптичні) методи.** Лазерні та оптичні анемометри (LDA - лазерний доплерівський анемометр) базуються на ефекті Доплера. Аерозолі впрорскуються в потік і розсіюють лазерні промені. Ці частинки, рухаючись через лазерне світло, змінюють частоту розсіяного світла, яка варіюється залежно від їх швидкості.

Переваги PIV полягають у високій точності та просторовій роздільній здатності, можливості досліджувати турбулентні та пульсуючі потоки, а також у тому, що вони не впливають на досліджуваний потік (повністю безконтактний метод).



Рисунок 1.4 Приклад лазерного анемометра[23]

Однак лазерна система має деякі серйозні недоліки, такі як висока вартість, складність оптичного регулювання, вимога чистоти оптичних шляхів та наявність частинок у потоці. Через це лазерна система використовується переважно для наукових досліджень, аеродинамічних труб та калібрування інших вимірювальних приладів.

1.2 Висновки по розділу

Можна сказати, що популярність механічних, ультразвукових і лазерних анемометрів полягає відповідно в їх простоті, гнучкості та безконтактній роботі, а також високій точності. Проте, здається, що найбільш перспективним варіантом для вимірювання повільних повітряних потоків, компактних анемометрів і високочутливих вимірювальних систем є насправді теплові анемометри, а саме мікросенсорні анемометри.

Розділ 2

Теоретичні основи та моделювання датчика FS2

У даному дослідженні об'єктом є сенсорний елемент FS2, розроблений компанією IST AG, який представляє собою новий мікродатчик на основі тонкоплівкової мікроструктури. Датчик цього типу характеризується високою чутливістю до змін швидкості повітряного потоку і має помірно низьке енергоспоживання, крім того, він забезпечує стабільність вимірювань протягом тривалого часу і майже не залежить від температури навколишнього середовища, при нормальних умовах [5, 13, 24].



Рисунок 2.1 - Фото сенсорного елементу FS2 [11]

2.1. Фізичні принципи роботи датчика FS2

Мікродатчик швидкості потоку FS2 (Flow Sensor 2) датчик потоку 2, вироблений швейцарською компанією IST AG, включає в свій склад серію теплових анемометричних датчиків, робота яких базується на процесі перетворення теплового потоку, що передається рухом газу, в електричний сигнал. Такі датчики широко застосовуються в сучасних вимірювальних системах завдяки своїй простій конструкції, високій чутливості, відсутності рухомих частин і здатності добре функціонувати навіть у складних умовах [1, 4, 5].

Основним фізичним процесом, на якому базується функціонування FS2, є конвективний перенос тепла від нагрітого елемента до потоку газу, що рухається вздовж фронтальної поверхні елемента. У режимі відсутності потоку середовища, тепло, що виробляється нагрівачем, може бути відведено на підкладку та навколишнє середовище лише за допомогою кондуктивного теплопереносу та інфрачервоного випромінювання. З початком руху газового потоку, активується додатковий механізм теплопередачі - вимушена конвекція, яка істотно інтенсифікує охолодження нагрівача. Це явище використовується для обчислення швидкості газового потоку [1, 5, 25].

Датчик FS2 використовує тонкоплівкову мікроінтеграцію. Датчик FS2 складається з наступних частин [5, 12]:

нагрівач - резистивний елемент із платини, який перетворює електричну енергію у тепло;

два вимірювальні терморезистори (або температурні сенсори), розташовані симетрично до нагрівача;

компенсуючий сенсор температури середовища;

підкладка - тонка керамічна пластина, яка забезпечує механічну підтримку та теплову ізоляцію.

Під час роботи через нагрівач проходить електричний струм, який нагріває його до температури, що на кілька десятків градусів перевищує температуру оточуючого середовища. Це призводить до формування своєрідного температурного шлейфу від нагрівача до нижнього за потоком терморезистору. Різниця в рівнях температури вимірювальних терморезисторів вказує не тільки на швидкість, але і на напрямок потоку [3].

Вибір платини в якості матеріалу терморезистору базується на його високій стабільності, міцності та добре відомому температурному коефіцієнті опору, який становить $TCR \approx 0,00385 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. Це дозволяє гарантувати просту, передбачувану, надійну залежність між значенням опору і температурою.

Процес теплообміну можна виразити рівнянням теплообміну для елемента:

$$I^2 R = h(v, T) \cdot A(T_w - T_g) + Q_{\text{cond}} + Q_{\text{rad}}, \quad (1)$$

де I - струм через нагрівач, R - його опір, $h(v, T)$ - коефіцієнт тепловіддачі, який залежить від швидкості потоку v та властивостей газу, A - ефективна площа теплообміну, T_w - температура нагрівача, T_g - температура газу, Q_{cond} - теплопровідні втрати в підкладку, Q_{rad} - теплові втрати через випромінювання.

Фактично швидкість випромінювання можна не враховувати, а значення теплопровідності є постійним, тому найважливішим фактором, що впливає на коефіцієнт теплопередачі, є конвективна складова. Для низьких значень швидкості (що не перевищують 10–15 м/с) коефіцієнт теплопередачі та швидкість взаємопов'язані законом Кінга:

$$h(v) = h_0 + C v^n, \quad (2)$$

де h_0 - тепловіддача при природній конвекції, C і n - емпіричні коефіцієнти, які визначаються експериментально.

Це призводить до нелінійної залежності між електричним опором сенсорного елемента і швидкістю - параметром, що необхідно виміряти. Під час проектування електронної схеми та процесу її калібрування вимірювальні коефіцієнти: h_0 , C та n підлягають попередньому визначенню.

Конструкція FS2 забезпечує активному елементу низьку масу, завдяки чому час відгуку датчика становить менше 0,5 с. Це робить його ідеальним для помірно швидкісних систем управління, таких як моніторинг повітряного потоку в чистих приміщеннях, лікарнях та регулювання швидкості вентиляції в приміщеннях з автоматичною вентиляцією [11].

Іншим важливим аспектом FS2 є його чутливість до напрямку потоку, що означає, що він може визначати напрямок без використання додаткових датчиків і рухомих частин. Оскільки терморезистори розміщені симетрично, при зміні напрямку потоку відбувається зміна сигналу, що легко контролюється електронною схемою [2, 5].

Датчик може використовуватися як елемент мостової вимірювальної схеми, яка перетворює різницю опору між терморезисторами в диференціальну напругу. Цей метод забезпечує високу чутливість і можливість роботи з найменшими значеннями різниці температур, вимірюваними в частках градуса [2, 5, 9, 13].

Отже, принцип роботи FS2, заснований на фізичних законах, можна описати наступним чином: електрична енергія, що надходить до нагрівача, перетворюється на тепло, яке відводиться потоком газу, різниця інтенсивності якого

залежить від швидкості потоку, і, отже, енергія руху потоку перетворюється на електричний сигнал.

2.2 Модель вихідного сигналу сенсора FS2

Робота датчика FS2 кількісно описується шляхом співвіднесення зміни електричного сигналу на його виході зі швидкістю потоку v і температурою газу T_g за допомогою моделі теплового балансу нагрівального елемента разом з електричною вимірювальною схемою моста [5, 13].

Якщо припустити, що в нагрівачі існують стаціонарні умови, тобто температура поверхні є постійною і не змінюється з часом, то загальний тепловий баланс визначається за формулою [8, 20]

$$I^2 R = h(v)A(T_w - T_g) + k(T_w - T_s), \quad (3)$$

де k - коефіцієнт теплопровідності підкладки, T_s - температура підкладки (зазвичай близька до T_g). Припускаючи, що $T_s \approx T_g$, отримуємо таке спрощення:

$$I^2 R = h(v)A(T_w - T_g). \quad (4)$$

Оскільки опір нагрівача залежить від температури відповідно до за:

$$R = R_0[1 + \alpha(T_w - T_0)], \quad (5)$$

де α – температурний коефіцієнт опору платини.

Після підстановки цього в рівняння балансу ми отримуємо нелінійну залежність між струмом, напругою, швидкістю потоку і температурою газу. Ця залежність узагальнена рівнянням Кінга [1]:

$$P_H = I_H^2 \cdot R_H = (h_0 + C \cdot \bar{v}^n) \cdot \Delta T \quad n = 0.3 \dots 0.5, \quad (6)$$

та

$$U = U_0 \cdot \sqrt{1 + k \cdot \bar{v}^n}, \quad n = 0.3 \dots 0.5. \quad (7)$$

де U - напруга корекційного резистора, v - швидкість потоку, U_0 - напруга на нагрівачі, k - константа, що залежить від флюїду, а n - експериментальний коефіцієнт, U - вихідний сигнал, який залежить від потоку, а U_0 - значення постійної різниці температур (ΔT) між нагрівальним елементом і газом при нульовій швидкості потоку, що виникає в результаті природної конвекції; контролер СТА підтримує ΔT між нагрівальним елементом і датчиком температури постійним [4, 11, 12, 13].

Для датчика FS2 цю залежність можна апроксимувати поліномом другого або третього порядку, що зручно для обробки сигналу в мікроконтролерах або програмних середовищах.

Калібрування виконується для отримання коефіцієнтів моделі: датчик розміщується в контрольованому потоці — наприклад, в калібрувальній трубці на лабораторній стійці ELVIS II, швидкість встановлюється регульованим вентилятором і вимірюється еталонним анемометром KIMO моделі VT100. Для кожного значення v_i і температури T_i реєструється напруга U_i , після чого виконується регресійний аналіз. Найчастіше використовується метод найменших квадратів, який мінімізує суму квадратів похибок між виміряними та обчисленими значеннями [1, 5, 6]:

$$\min_{a_0, a_1, \dots} \sum_i (U_i - U_{\text{model}}(v_i, T_i))^2. \quad (8)$$

В результаті буде отримано набір коефіцієнтів a, b, c, d , які потім зберігаються в мікроконтролері або в програмі збору даних. Після цього виконується обернене перетворення. Знаючи U_{out} і T , швидкість v знову обчислюється.

Калібрування дозволяє враховувати не тільки індивідуальні властивості кожного датчика, але й вплив навколишнього середовища, такого як щільність, в'язкість газу, вологість тощо.

Диференціальна мостова схема служить для визначення напрямку потоку. Якщо позначити терморезистори як R_1 і R_2 , то різниця температур між ними створює різницю опорів $\Delta R = R_1 - R_2$, яка перетворюється на вихідну напругу:

$$U_{\text{diff}} = \frac{V_{\text{bridge}}}{2} \frac{\Delta R}{R_0}. \quad (9)$$

Знак U_{diff} відповідає напрямку потоку: позитивний — потік у прямому напрямку; негативний - у зворотному напрямку. Таким чином, FS2 є двонаправленим датчиком.

Для практичного застосування модель датчика доповнюється температурною компенсацією, яка виконується або апаратно - за допомогою додаткового термістора в мості, або програмно - шляхом корекції вихідного сигналу відповідно до виміряної температури газу. Це дозволяє зменшити похибку, спричинену змінами температури навколишнього середовища, до декількох відсотків.

Оскільки сигнал датчика зазвичай становить десятки мілівольт, для подальшої обробки використовується диференційний підсилювач з високим коефіцієнтом загального відхилення ($\text{CMRR} > 80$ дБ). Використовуємо аналоговий вхід NI ELVIS II з діапазоном вимірювання ± 10 В, що достатньо для вимірювання швидкості потоку за допомогою FS2. Більше характеристик та документація на ELVIS II наведено у розділі 3.3 [1, 4, 5].

2.3 Електрична модель сенсора FS2: міст, підсилення, фільтрація, ADC, компенсація температури, характеристики

Фізичні зміни в датчику FS2, коли газ протікає через нього, повинні бути перетворені за допомогою електричної схеми живлення та обробки сигналу вимірюваний електричний сигнал. Її основні функції включають живлення нагрівача, стабілізацію умов нагрівання, вимірювання невеликих змін опору терморезисторів та передачу сигналу для подальшої цифрової обробки АЦП NI ELVIS II [2, 5].

Основна структура це вимірювальний міст, який широко використовується в термоанемометрії, тензометрії та датчиках температури. У випадку FS2 міст не тільки виконує функцію вимірювання різниці опору, але й дозволяє визначати напрямок потоку [2, 5].

Мостова вимірювальна схема. Датчик FS2 містить два активні терморезистори, R_{5r} і R_{5l} , розташовані симетрично відносно нагрівача. Для отримання чутливого вихідного сигналу вони підключені до диференціальної місткової схеми (міст Уїтстона) разом з двома додатковими резисторами, R_8 і R_9 , які утворюють баланс. Електрична схема показана на Рисунок. 2.2 [5, 8, 26].

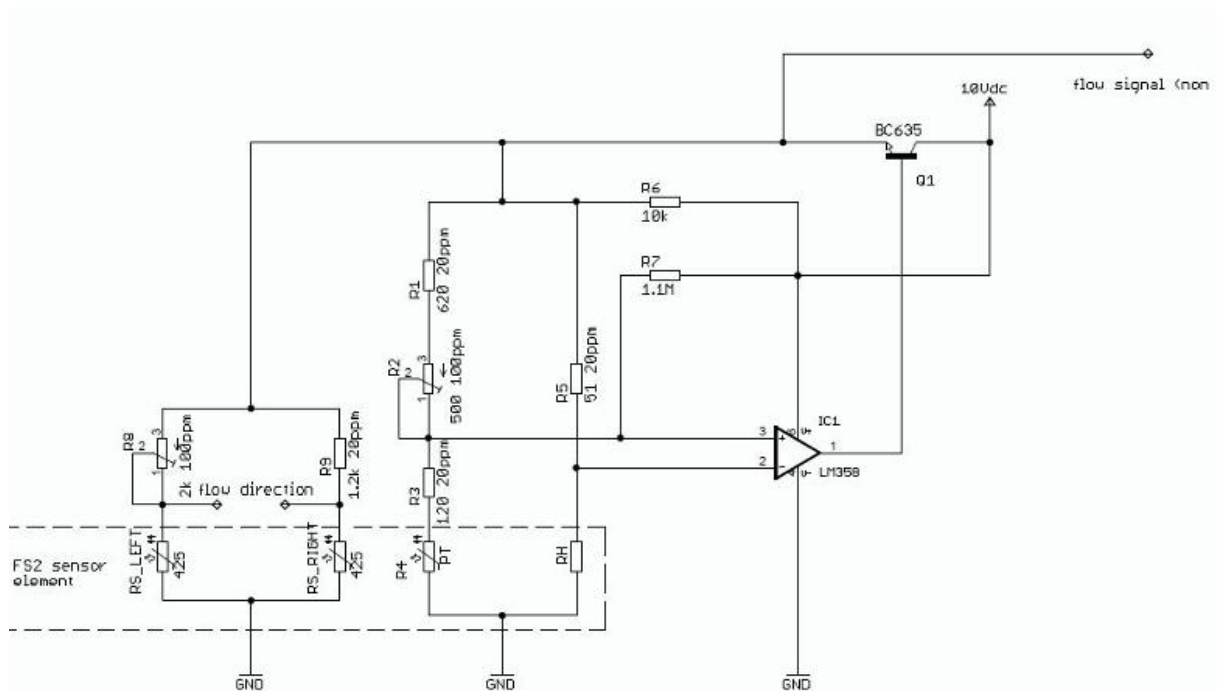


Рисунок 2.2 - Електрична схема підключення сенсора FS2T [2]

При подачі живлення напруга на діагоналі моста залежить від співвідношення:

$$U_{out} = V_{bridge} \cdot \frac{R_{Sl}}{R_8 + R_{Sl}} - V_{bridge} \cdot \frac{R_{Sr}}{R_{Sr} + R_9}. \quad (10)$$

Якщо $R_{Sl}/R_{Sr} = R_8/R_9$, міст збалансований і вихідна напруга дорівнює нулю. Коли існує різниця в опорі між R_{Sl} і R_{Sr} , що обумовлено зміною температури, тобто коли потік рухається, міст стає незбалансованим і на виході з'являється диференціальна напруга U_{out} , пропорційна швидкості потоку і змінює свій знак залежно від його напрямку.

Типові значення опору терморезисторів FS2 становлять від 30 Ом для нагрівача та до 740 Ом для датчику температури, при 25 °C; амплітуда сигналу від моста зазвичай не перевищує десятків мілівольт, тому необхідне подальше підсилення.

- **Диференційний підсилювач.** Приладовий або диференційний підсилювач використовується для перетворення слабого диференційного сигналу в рівень, придатний для обробки.

Його основна функція полягає в підсиленні різниці напруг між вихідними точками моста, відкидаючи при цьому компонент сталої напруги зміщення, який може включати нестабільність напруги живлення або електромагнітні перешкоди.

Загальне рівняння вихідної напруги підсилювача:

$$U_{\text{amp}} = G \cdot (U_+ - U_-), \quad (11)$$

де G — коефіцієнт підсилення (зазвичай 50–500), U_+ , U_- - потенціали на виходах моста.

Найчастіше така реалізація передбачає використання підсилювального каскаду на основі операційного підсилювача INA122, Lm358 або стандартного інструментального підсилювача в конфігурації з трьома операційними підсилювачами та чотирма резисторами.

Реалізація апаратного та програмного підсилення може бути виконана за допомогою модуля підсилювача приладу та обробки сигналу в середовищі LabVIEW відповідно. Система NI ELVIS II пропонує обидві ці опції.

Наприклад, для диференційної напруги моста 10 мВ і бажаного рівня сигналу 2 В необхідний коефіцієнт підсилення становить $G = 200$.

Водночас відношення сигнал/шум повинно бути не менше 40 дБ, що досягається за рахунок правильного підбору високоточних резисторів і паразитних ємностей, які слід мінімізувати під час складання.

- **Фільтрування та зменшення шуму.** Датчики FS2 дуже чутливі не тільки до швидкості потоку, але й до електричних перешкод. Тому вимірювальний контур повинен включати фільтрацію:

- RC-фільтр нижніх частот з частотою зрізу 10-50 Гц для згладжування пульсацій напруги та перешкод від джерела живлення.

- Синфазні дроселі або феритові елементи на лініях живлення для придушення високочастотних перешкод.

- Цифрове усереднення на етапі обробки сигналу: рухоме середнє або цифровий фільтр Калмана.

Для зменшення теплового шуму слід забезпечити стабільне живлення моста, що зазвичай здійснюється за допомогою стабілізатора напруги з точністю не гірше $\pm 50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ або стабільного джерела струму, що є особливо важливим для режиму постійної температури.

- **Підключення до NI ELVIS II.** Платформа NI ELVIS II це навчальний лабораторний набір віртуальних приладів, що забезпечує інтерфейс для вимірювання аналогових сигналів, оцифрування та аналізу в реальному часі.

Вихід схеми моста FS2 підключається до диференціального аналогового входу AI0+/AI0- модуля DAQ, який оснащений 16-бітним АЦП з частотою дискретизації до 200 кГц [5, 7].

Основні вимоги до параметрів АЦП для зчитування сигналів з FS2:

- Роздільна здатність не менше 12 біт (для точності $<1\%$);
- Діапазон вхідного сигналу $\pm 5 \text{ В}$ (після підсилення сигналу);
- Частота дискретизації 100 -1000 зразків/с для плавних потоків, до 10 кГц для динамічних експериментів;

- Високий CMRR (>90 дБ) для роботи в диференційному режимі.

У середовищі LabVIEW можна обробляти сигнал АЦП у реальному часі, тобто фільтрувати, масштабувати та калібрувати його відповідно до коефіцієнтів, отриманих під час експериментів. Це дозволяє перетворити NI ELVIS II на повноцінний випробувальний стенд без додаткового обладнання.

- Температурна компенсація. Основним фактором, що впливає на точність вимірювання, є температурний дрейф. У разі зміни температури навколишнього середовища опір усіх елементів моста змінюється, що може призвести до спотворення результатів.

Для компенсації цього ефекту використовується кілька підходів [11, 13, 26]:

- Апаратна компенсація - один з резисторів моста (R_8 або R_9) виготовлений з того ж матеріалу, що і терморезистори датчика, в даному випадку з платини, але він не піддається впливу струму. Таким чином, при зміні температури його опір змінюється в фазі, що компенсує дрейф.

- Програмна компенсація - паралельно вимірюванню сигналу від FS2, температура навколишнього середовища реєструється за допомогою окремого датчика (наприклад, Pt100 або терморезистора NTC), отримане значення температури вводиться в рівняння калібрування:

$$v = f(U_{\text{out}}, T), \quad (12)$$

де T - виміряна температура газу. Похибка температури може бути скоригована в режимі реального часу за допомогою програмного забезпечення.

- Принцип двоканальної диференціації передбачає використання двох датчиків FS2, один з яких встановлюється поза основним потоком (еталон). Порівняння сигналів дозволяє відокремити вплив температури від впливу потоку.

Модель, розроблена для NI ELVIS II, реалізована як комбінований підхід: апаратна компенсація в мостовій схемі та програмна корекція в LabVIEW, що зменшує похибки, пов'язані зі змінами температури.

- **Загальна електрична модель.** Узагальнену електричну модель роботи FS2 можна описати наступними рівняннями [2, 5, 8]:

- Мостова частина:

$$U_{\text{bridge}} = V_s \cdot \frac{(R_2/(R_1+R_2)) - (R_4/(R_3+R_4))}{1}, \quad (13)$$

- підсилення:

$$U_{\text{amp}} = G \cdot U_{\text{bridge}}, \quad (14)$$

- фільтрація:

$$U_{\text{filt}}(t) = U_{\text{amp}}(t) + \tau \frac{dU_{\text{amp}}(t)}{dt}, \quad (15)$$

- цифрове перетворення:

$$U_{\text{ADC}} = \text{round}\left(\frac{U_{\text{filt}}}{V_{\text{ref}}} \cdot 2^{N-1}\right), \quad (16)$$

де V_s - напруга живлення мосту, G - коефіцієнт підсилення, τ - стала часу RC-фільтра, V_{ref} - опорна напруга АЦП, N - кількість бітів АЦП.

Потім програма використовує це значення, U_{ADC} , для обчислення витрати на основі калібрувальної функції.

- **Характеристики датчика.** Характеристики датчика наведені в таблиці 1[2].

Таблиця 2.1 - Характеристики сенсора

Характеристика	значення
Розмір(Д x Ш x В мм)	5 x 3,5 x 0,2 / 0,6
Мінімальний робочий діапазон	0 мл/хв до 2,5 мл/хв
Робочий вимірювальний діапазон	0 м/с до 1 м/с (половинний міст) 0 м/с до 100 м/с (СТА режим)
Чутливість відгуку	0,001 м/с
Похибка	< 2 % від виміряного значення
Час відгуку	< 0,5 с
Робочий температурний діапазон	-20 °C до +150 °C
Температурна чутливість	< 0,1 %/K
Нагрівач	34 $\Omega \pm 10$
Вимірювальний елемент	425 $\Omega \pm 10$ %
Еталонний елемент	710 $\Omega \pm 10$ %
Діапазон напруги	2 В до 5 В

Розділ 3

Проектування та реалізація апаратної частини

Головна мета цього етапу - зібрати робочу схему, де сенсор FS2 підключається до плати NI ELVIS II, а сигнал можна спостерігати, вимірювати й аналізувати[14, 15].

Перші спроби показали, що навіть невелика нестабільність у схемі сильно впливає на результат, тому довелося експериментально підбирати номінали резисторів, перевіряти балансування моста й дивитися, як змінюється вихідна напруга при різних потоках повітря.

3.1 Вимоги до апаратури та загальні принципи побудови системи

Створення вимірювального пристрою для визначення швидкості потоку газу потребує ретельного опрацювання апаратної частини, оскільки саме від її якості залежать точність, стабільність і достовірність результатів. В основу системи покладено сенсор FS2, який реалізує принцип термоанемометричного вимірювання. Це означає, що необхідно забезпечити правильне живлення сенсора, стабільність його температурного режиму, а також надійну обробку дуже малих електричних сигналів, які виникають під час вимірювання[1, 5, 8].

Основними параметрами, на які орієнтувалися при проектуванні, були діапазон швидкості від 0,1 до 20 м/с, чутливість близько 0,01 м/с, точність не гірше двох відсотків від діапазону, а також короткий час відгуку менше 0.5 с. Ці значення узгоджуються з характеристиками сенсора FS2 і дозволяють проводити дослідження як у лабораторних, так і в прикладних умовах. Оскільки ам-

плітуда вихідного сигналу FS2 невелика (звичайно не перевищує 20–30 мілівольт), до системи висуваються підвищені вимоги щодо завадозахищеності та стабільності[14, 15, 16].

Під час проєктування було прийнято рішення реалізувати структуру за модульним принципом. Умовно вся система поділяється на кілька функціональних частин: сенсорний модуль, мостову вимірювальну схему, підсилювач сигналу, фільтраційно-стабілізаційний каскад, аналого-цифровий перетворювач і комп'ютерну частину, яка реалізована в середовищі NI ELVIS II. Такий підхід спрощує налаштування, тестування та можливість подальшої модернізації окремих вузлів без впливу на загальну структуру системи[5, 6].

Одним з основних завдань було забезпечення стабільного живлення сенсора і мінімізація електричних шумів. Для цього використано стабілізатор напруги LM7805 із додатковими фільтрами та розділенням аналогової й цифрової землі». Напруга живлення контролювалася під час роботи, оскільки навіть незначні відхилення можуть викликати помітне зміщення нуля. Окремо було передбачено можливість регулювання струму через сенсор для реалізації різних режимів - постійного струму або постійної температури, що особливо важливо при калібруванні[1, 4, 17].

Усі резистори в мостовій схемі підбиралися високоточної серії з похибкою не більше 1% і низьким температурним коефіцієнтом. Це дозволило досягти високої стабільності балансу моста та практично усунути дрейф нульового рівня. Для компенсації залишкового зсуву застосовано підлаштувальний резистор, який дозволяє точно відрегулювати рівновагу схеми перед початком вимірювань.

Особливу увагу приділено електромагнітній сумісності. Оскільки сенсор працює з дуже малими сигналами, усі лінії між сенсором і підсилювачем виконані екранованими проводами. Екран підключений до загальної землі лише з одного боку, що виключає появу петель струму. Внутрішнє розташування елементів на платі продумане таким чином, щоб силові ланцюги живлення не перетиналися з ланцюгами передачі сигналу.

Отже, сформовані вимоги до апаратури дозволили побудувати систему, яка поєднує високу чутливість, стабільність та простоту налаштування. Пристрій є універсальним і може використовуватись як у навчальних цілях у лабораторії NI ELVIS II, так і як основа для створення портативного анемометра на базі FS2.

3.2 Реалізація електричної схеми, підсилення, фільтрації та підключення до NI ELVIS II

Функціональна схема пристрою побудована на основі мостової структури Уїтстона, у якій два плеча утворені активними елементами сенсора FS2, а ще два - компенсаційними резисторами. При відсутності потоку міст знаходиться в рівновазі, і напруга між вихідними діагоналями дорівнює нулю. Коли газ починає рухатись, один із терморезисторів сенсора охолоджується сильніше, ніж інший, що порушує баланс моста і викликає появу різниці потенціалів, прямо пропорційної швидкості потоку[5, 14].

Оскільки ця напруга має дуже малу амплітуду, її необхідно підсилити до рівня, придатного для подальшої обробки. Для цього використано інструментальний підсилювач INA122, який має високий коефіцієнт придушення синфазної напруги та низький рівень шуму. Його коефіцієнт підсилення встановлено близько 200, що забезпечує перетворення сигналу з кількох мілівольт до

рівня близько двох вольт, достатнього для подачі на вхід аналого-цифрового перетворювача NI ELVIS II. Завдяки диференціальному підключенню і точному підбору резисторів у схемі вдалося зменшити вплив зовнішніх електричних перешкод, що особливо важливо при роботі з малими сигналами[12, 21].

Для покращення стабільності вихідного сигналу після підсилювача встановлено активний фільтр низьких частот другого порядку з частотою зрізу близько 20 герц. Фільтр знижує рівень випадкових пульсацій, пов'язаних із турбулентністю повітря, та усуває високочастотні шуми, які можуть проникати з мережі живлення. Застосування операційного підсилювача Lm358 дозволило отримати мінімальні власні шуми та стабільну частотну характеристику[8].

Подальша обробка сигналу здійснюється на аналого-цифровому вході модуля NI ELVIS II. Для експериментів було встановлено частоту вибірки 100 герц, що дозволило отримувати стабільні дані без перевантаження каналу. Оцифрований сигнал у реальному часі подається у середовище LabVIEW, де виконується його подальше масштабування, температурна компенсація та побудова графічних залежностей[14, 24].

У LabVIEW створено окремий віртуальний прилад, який реалізує повний цикл вимірювання: від збору аналогового сигналу до візуалізації та збереження результатів у файлі. Передбачена також можливість ручного регулювання струму нагріву сенсора через цифровий вихід NI ELVIS II, що дає змогу досліджувати характеристики сенсора при різних режимах роботи. У реальному часі відображаються графіки залежності напруги від швидкості, а також температурні поправки, що підвищує наочність процесу.

Важливим етапом стала розробка друкованої плати, на якій розміщено мостову схему, підсилювач і фільтр. Плата має розміри 50×70 міліметрів і виготовлена за двошаровою технологією з суцільною площиною землі. Розташування компонентів виконано з урахуванням мінімізації паразитних ємностей та індуктивностей. Вхідні ланцюги сенсора розміщено максимально близько до підсилювача, що дозволило зменшити рівень наведень до одиниць мілівольт. Усі доріжки, по яких проходять аналогові сигнали, мають мінімальну довжину та симетричне розташування, що позитивно впливає на точність вимірювань.

Під час випробувань апаратна частина підключалась до стенду на базі NI ELVIS II, який забезпечував не лише живлення і збір даних, а й контроль умов експерименту. Потік повітря створювався мініатюрним вентилятором із регульованою швидкістю. Для калібрування використовувався еталонний анеометр. Отримані покази порівнювалися з даними сенсора FS2, після чого виконувалася регресійна обробка для визначення коефіцієнтів калібрування. Середнє відхилення між результатами не перевищило двох відсотків у всьому робочому діапазоні, що підтверджує правильність побудови апаратної частини.

Створена електрична схема та її реалізація забезпечують точне та стабільне вимірювання швидкості потоку газу. Вона є повністю сумісною з NI ELVIS II, дозволяє працювати як у режимі дослідження, так і в режимі практичного використання, а також легко адаптується до інших типів сенсорів або газових середовищ. Конструкція апаратної частини показала високу надійність.

3.3 Технічна документація до ELVIS II

National Instruments пропонує для NI ELVIS II пропонує 16-розрядний аналоговий перетворювач або 8 диференційних каналів, кожен з яких може бути

налаштованим на один із кількох діапазонів вхідної напруги: ± 10 В, ± 5 В, ± 2 В, ± 1 В, ± 0.5 В, ± 0.2 В, ± 0.1 В. Наявність низьких діапазонів вхідної напруги дозволяють ефективно використовувати динамічний АЦП при роботі з сигналами малої напруги, що дозволяє одночасно вимірювати всі значення сенсора FS2 та для інших мостових схем характерних для тензометричних, терморезистивних, газових датчиків. Також наявність диференційного режиму вводу мінімізує вплив шумів, що є критичним для сенсорів[14, 26].

Велика кількість монтажних гнізд, входів мультиметрів, роз'ємів осцилографа, виходів генераторів функцій, наявності лічильників робить цю панель універсальною до більшості задач, схема монтажною панелі з усіма роз'ємами наведена на рисунку 3.1.

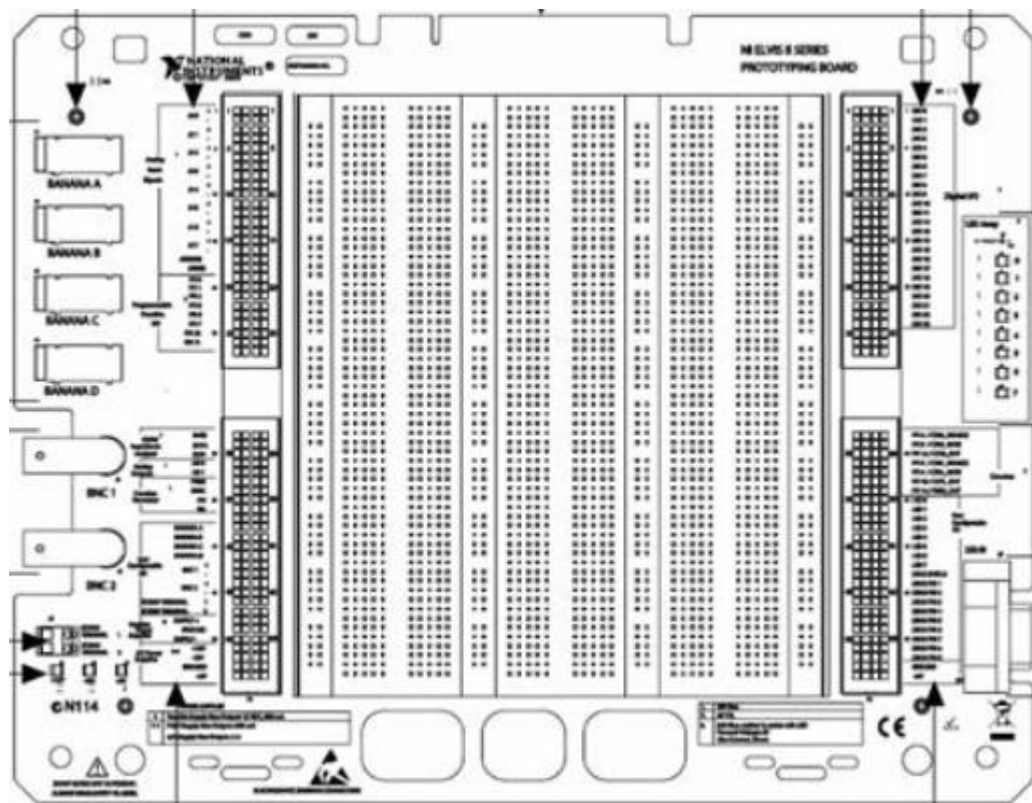


Рисунок 3.1 - Монтажна панель NI ELVIS II[26]

Розділ 4

Експериментальна частина

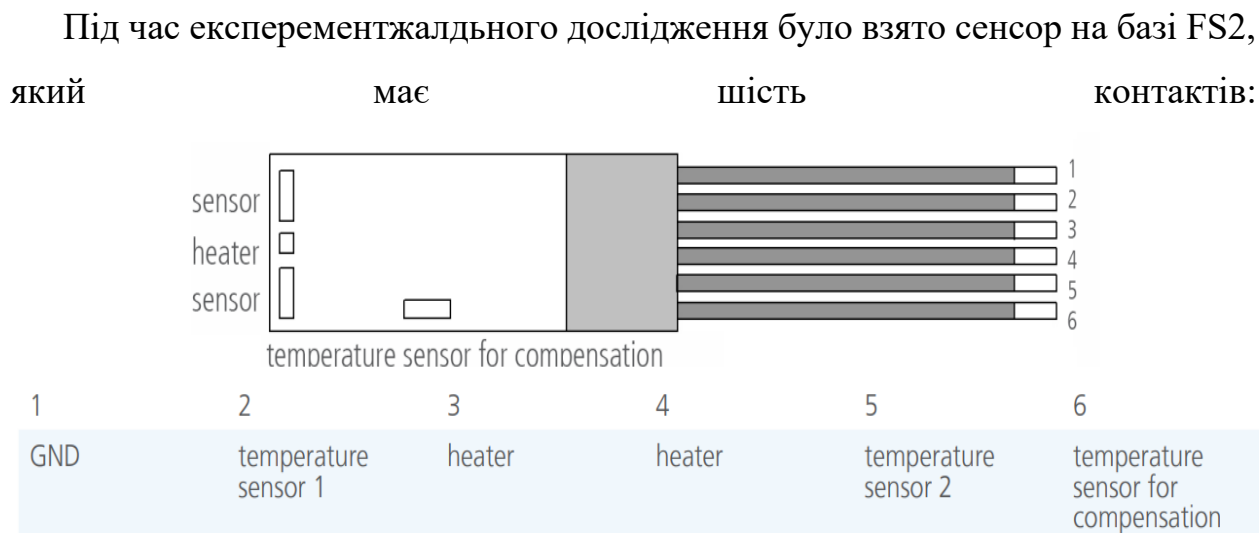


Рисунок 4.1 - Схематичне найменування контактів сенсора FS2T[1]

Представлена на Рисунок. 4.1 схема контактів сенсора FS2T слугує основою для формування вимірювальної конфігурації, яка надалі використовується в експериментальній частині. Важливо зазначити, що схема підключення не лише визначає електричні параметри моста, але й суттєво впливає на тепловий режим роботи нагрівального елемента. Саме тому правильна ідентифікація кожного контакту є критично важливою для коректного встановлення сенсора на розпаювальну плату та подальшої побудови вимірювальної системи[2].

З огляду на те, що сенсор містить як нагрівальний елемент, так і два чутливі терморезистори, його підключення повинно забезпечувати мінімальний паразитний опір і стабільність контактів під час подачі живлення та проведення експериментів. Помилки на цьому етапі можуть призвести до нерівномірного

нагріву чутливого елемента, зміщення нульового рівня або некоректних показів вихідної напруги, що надалі унеможливилює калібрування[3].



Рисунок 4.2 - Фотографія сенсора FS2T, використаногно у експерименті

На фотографії, поданій на Рисунок. 4.2, видно конструктивні особливості сенсора FS2T, які зумовлюють його високі метрологічні характеристики. Зокрема, добре проглядається симетричне розташування чутливих елементів, що забезпечує двонапрямну чутливість сенсора при підключенні один навпроти іншого та дає змогу визначати не лише величину, а й напрям потоку газу. Така особливість є ключовою для застосувань у системах моніторингу чистих зон,

де можливі локальні реверси потоків, спричинені рухом оператора або зміною режимів вентиляції.

Крім того мікроструктурована підкладка сенсора виконана з високотемпературного керамічного матеріалу, що забезпечує низьку теплову інерцію. Саме це дає змогу фіксувати навіть незначні зміни швидкості повітря в режимі реального часу.

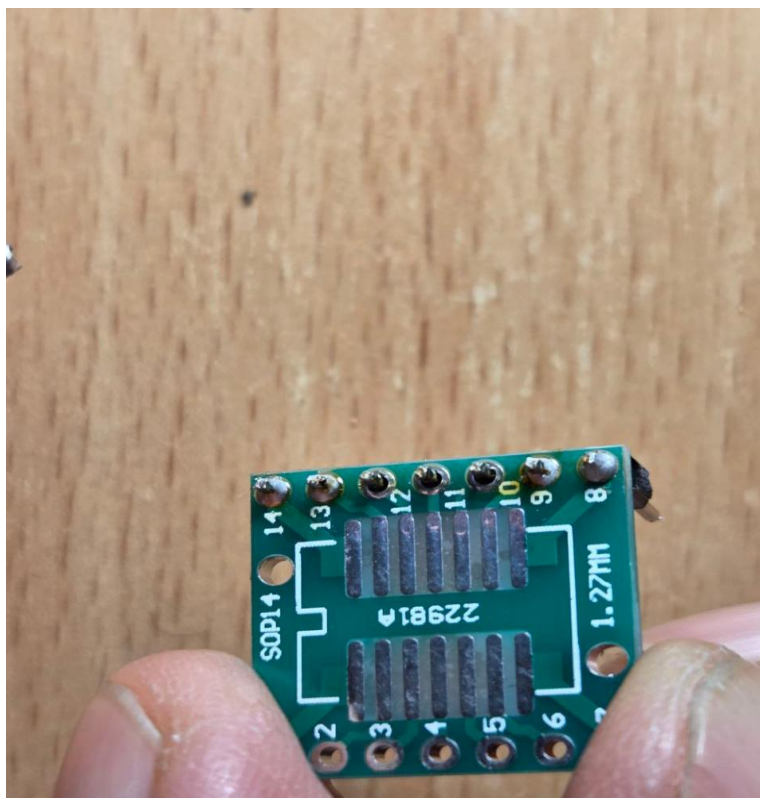


Рисунок 4.3 - Фотографія розпаювальної плати , до якої буде підключатися сенсор

Розпаювальна плата, показана на Рисунок. 4.3, була обрана з огляду на необхідність забезпечення жорсткої механічної фіксації сенсора та надійного електричного контакту під час проведення серії експериментів. Використання стандартного макетного поля дозволило мінімізувати паразитні індуктивності

та ємності, оскільки довжина провідників була зменшена до мінімально можливої. Це особливо важливо при роботі з мікрвольтовими сигналами, що генеруються мостовою схемою сенсора.

Окремо варто зазначити, що плата має можливість інтеграції додаткових опорних елементів, таких як стабілізуючі резистори та RC-фільтри, які можуть бути використані на етапі подальшої модифікації конструкції. У цьому дослідженні такі елементи були застосовані для усунення високочастотних перешкод і стабілізації живлення нагрівача.



Рисунок 4.4 - Встановлення конструкції сенсора на плату

Як видно на Рисунок. 4.4, сенсор був закріплений таким чином, щоб залишалася можливість підведення повітряного каналу та рівномірного обдування чутливих елементів. Доведено, що геометричне позиціонування сенсора суттєво

впливає на точність вимірювань, оскільки навіть мінімальна зміна кута нахилу може викликати відхилення в показах за рахунок нерівномірного тепловідведення.

Під час проведення калібрування особливу увагу приділяли повторюваності позиціювання сенсора відносно осі трубки. Для цього конструкцію було оснащено додатковими фіксаторами, які унеможливлювали випадкове зміщення сенсора між експериментами. Це забезпечило високу відтворюваність результатів та зменшення похибки до мінімально допустимих значень.



Рисунок 4.5 - Розведення контактів для підключення до ELVIS II

На Рисунок. 4.5 показано підготовку підключення сенсора до платформи ELVIS II, де кожен контакт був промаркований відповідно до специфікації виробника. Це дозволило уникнути потенційно небезпечних помилок, таких як подача надмірної напруги на нагрівач, що може призвести до його виходу з ладу. Особливу увагу приділили забезпеченню надійного з'єднання із загальною шиною землі, оскільки навіть короткочасна нестабільність цього контакту спричиняє стрибки вихідної напруги.

Крім того, до вимірювальних контактів були підключені екрановані про-
води, що мінімізували вплив електромагнітних шумів від зовнішніх джерел.

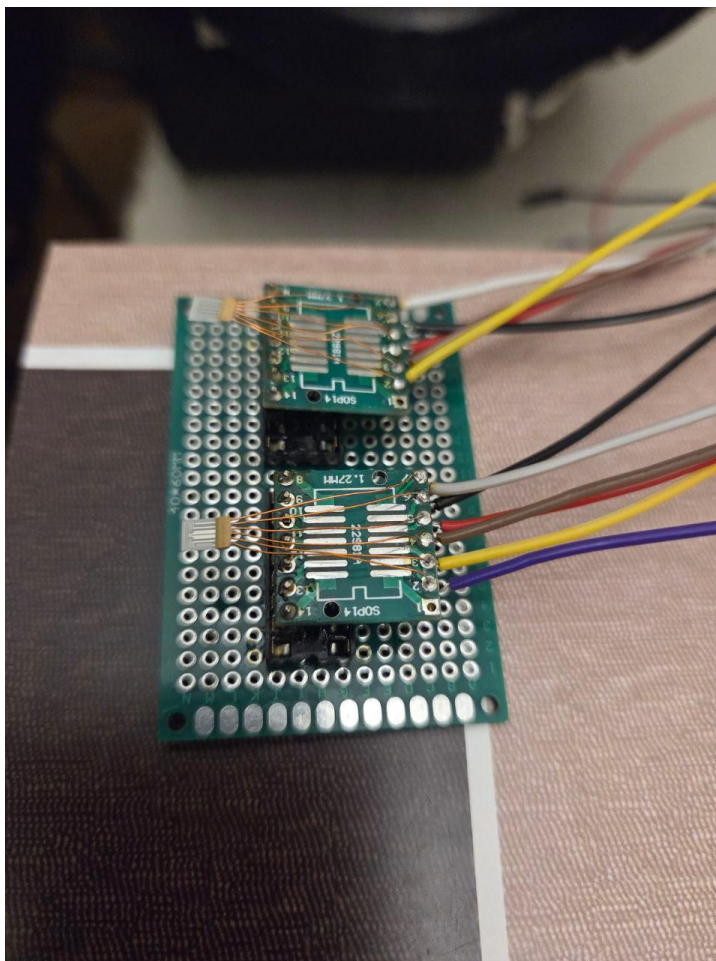


Рисунок 4.6 - Загальний вигляд розведених контактів

Загальний вигляд підключення, представлений на Рисунок. 4.6, демонструє завершену вимірювальну конфігурацію, готову до проведення калібрувальних тестів. У процесі підготовки було перевірено відсутність коротких замикань та коректність полярності підключення джерела живлення. Додатково проводилась перевірка опорів між ключовими контактами сенсора, що дозволило впевнитися у відповідності з технічною документацією й у відсутності внутрішніх дефектів.

Надалі система була інтегрована з модулем LabVIEW, де було реалізовано попередній контроль входних параметрів і постійний моніторинг стану сенсора. Це дозволило оперативно реагувати на можливі відхилення та вчасно коригувати умови експерименту.

Таблиця 4.1 - Схема підключення контактів до ELVIS II

Контакт	Значення у ELVIS II
1	Вхід вольтметра
2	Gnd
3	5B
4	Gnd
5	5B

Так як сенсор працює до 3 В, по специфікації, потрібно зменшити входну напругу з 5 В до 2,5 – 3 В.

Таблиця 4.2 - Виміряні значення опору між контактами сенсорів

Контакт	R
1-2	388 Ом
3-4	31 Ом
1-5	388 Ом
1-6	650 Ом

Для цього на вхід нагрівача підключаємо три паралельно з'єднаних між собою резисторів з номінальним опором 100 Ом та отримаємо реальне значення у 34 (Ом). Так як значення опору між контактами 3 та 4 $R_{3-4} = 31$ (Ом) отримаємо дільних напруги з робочою напругою в 2,4 В на вході сенсора 3 (нагрівача).

На зображенні рисунок. 4.7 продемонстровано процес подачі живлення на сенсор через попередньо зібрану схему дільника напруги. Застосування трьох паралельно з'єднаних резисторів дозволило точно відтворити номінальний опір, необхідний для стабілізації напруги на рівні, безпечному для нагрівача. Проведені вимірювання показали, що напруга на контакті 3 становила близько 2,4 В, що повністю відповідає рекомендованому робочому діапазону.

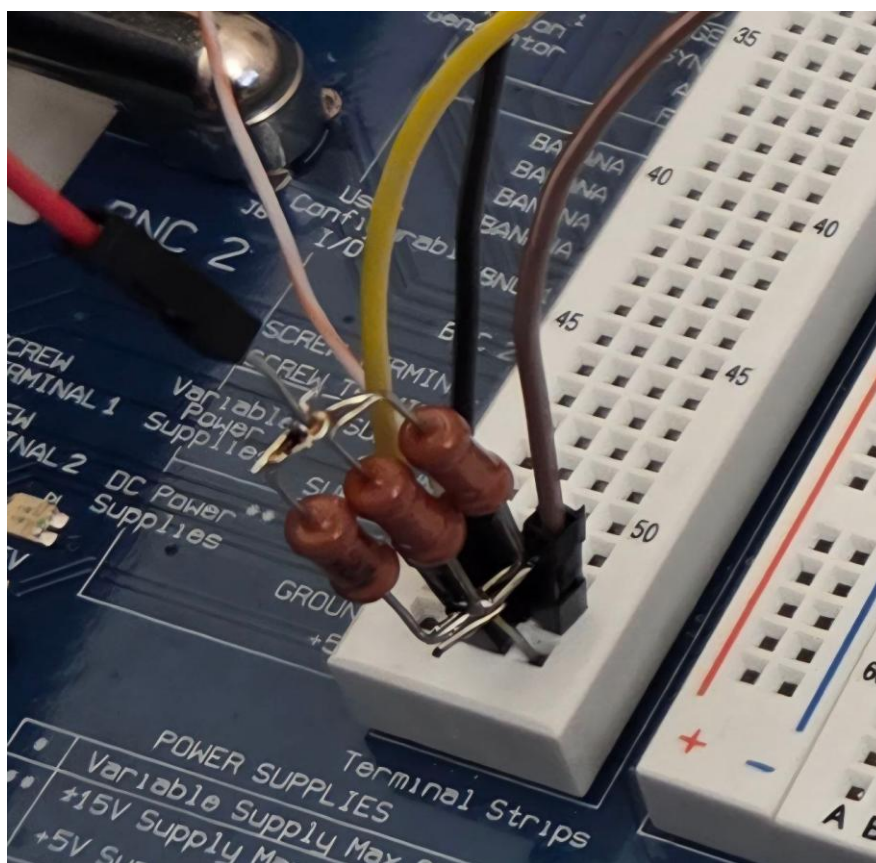


Рисунок 4.7 - Фото підключення сенсора до живлення

Особливістю цього етапу було те, що навіть незначні коливання напруги на нагрівачі призводять до значних змін тепловідведення і, як наслідок, похибки у вимірюванні швидкості повітря. Тому для стабілізації напруги було використано фільтр низьких частот, що додатково зменшувало пульсації.

На Рисунок. 4.8 наведено результати вимірювання напруги на сенсорі після подачі живлення. Валові покази свідчать про правильність визначення робочої точки системи та відсутність нестабільності у першому циклі роботи. Окремо було оцінено тепловий дрейф, який виникає протягом перших 3–5 хвилин після включення живлення. Саме тому перед початком калібрування система витримувалася в усталеному режимі не менше 10 хвилин.

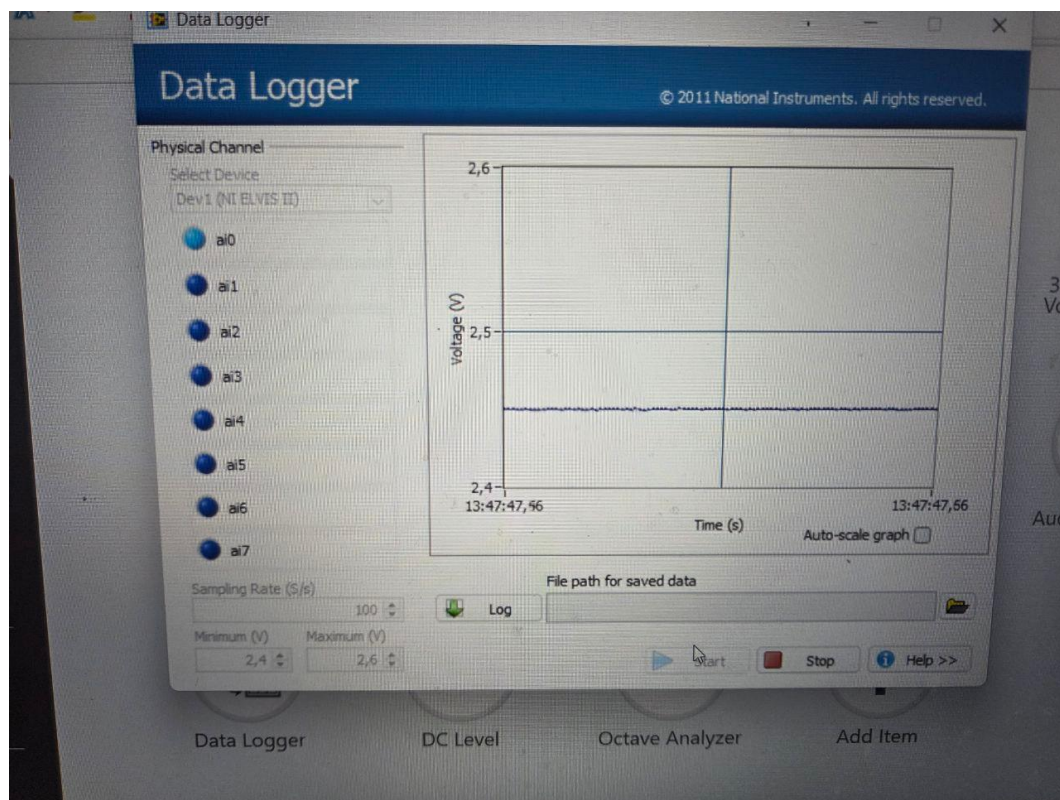


Рисунок 4.8 - Значення напруги на сенсорі після підключення живлення

Відповідно до рекомендацій виробника, стабілізаційний період є критично важливим для точності вимірювань, оскільки недотримання цього інтервалу може призвести до завищення показів на 3–5 %.

Розміщення двох сенсорів, показане на Рисунок. 4.9, було обране для забезпечення максимальної повторюваності вимірювань у режимі послідовного обдування. Важливо, що між сенсорами було витримано необхідну відстань, яка забезпечувала відсутність взаємного впливу теплових полів. Завдяки цьому вдалося порівняти характеристики двох сенсорів одночасно і оцінити стабільність їхньої роботи в однакових умовах.

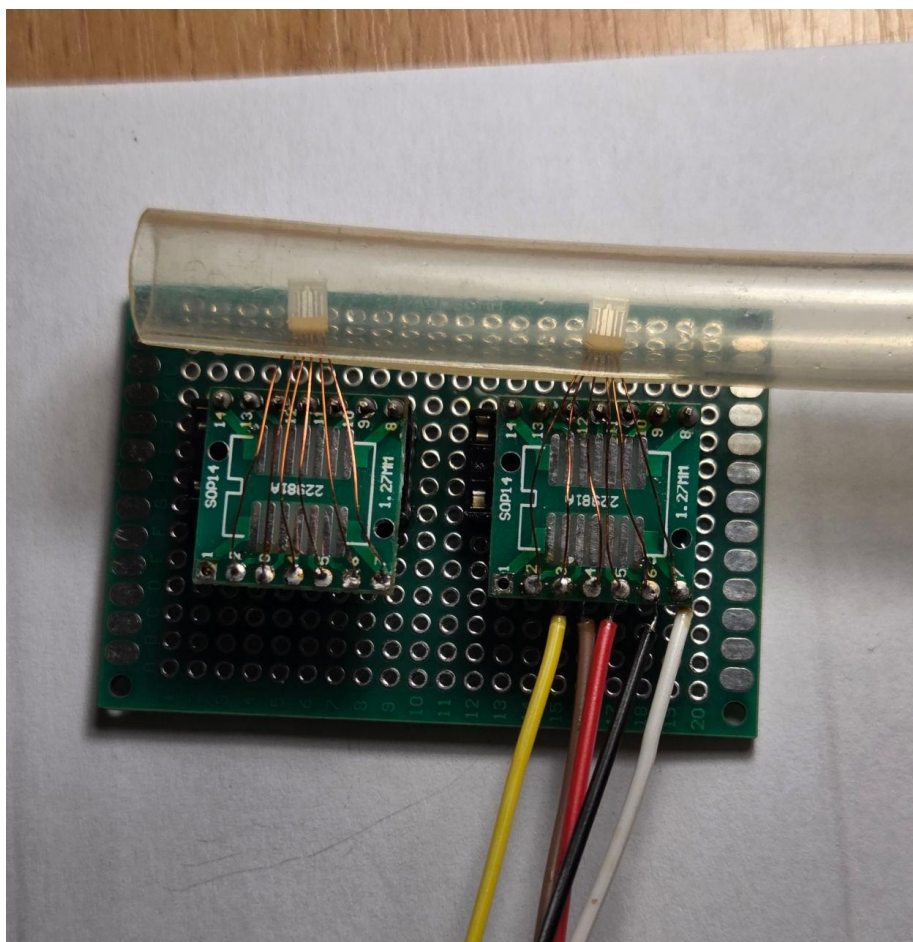


Рисунок 4.9 - Фото розміщення обох сенсорів на платі

Це дозволило побачити, що значного відхилення між показами послідовних сенсорів не спостерігалось, що підтверджує високу повторюваність конструкції FS2T і правильність побудови вимірювальної схеми.

На рисунку 4.10 показано підключення плати до стенду NI ELVIS II, який відіграє ключову роль у формуванні вимірювальної системи. Стенд забезпечує не лише точний збір аналогових сигналів, але й можливість їхньої обробки у реальному часі. Всі вимірювання виконувалися у диференціальному режимі для мінімізації впливу синфазних шумів.

Як показала практика, використання ELVIS II суттєво підвищило точність експериментів, оскільки апаратна фільтрація та висока розрядність АЦП дозволили фіксувати навіть найменші зміни напруги на мостовій схемі. Реалізація віртуального приладу в LabVIEW забезпечила зручність виконання багаторазових серій вимірювань із подальшою автоматичною обробкою та збереженням результатів.

Після підключення плати до стенду через трубку було подано потік газу зі швидкістю ~ 0.5 м/с, але через різницю діаметрів трубки та виходу генератора потоку: $S_1 = \pi \text{ см}^2$, $S_2 = 2,25\pi \text{ см}^2$ маємо отримати швидкість потоку меншу у 2,25 рази за формулою:

$$v = \frac{Q}{S}, \quad (18)$$

де v – швидкість потоку, Q – об’єм газу, що проходить за одиницю часу, S – площа поперечного перерізу.

Отримані під час експериментів значення напруги та покази еталонного анемометра (Рисунок 4.11- 4.13) дали змогу виконати первинне калібрування сенсора. На цьому етапі було встановлено, що залежність вихідної напруги від швидкості повітря має виражений нелінійний характер, що узгоджується з теоретичними моделями, розглянутими у розділі 2. Зокрема, при малих швидкостях залежність є майже лінійною, що дає можливість застосувати апроксимацію першого порядку. При збільшенні швидкості виникає насичення, характерне для термоанемометричних сенсорів[27].

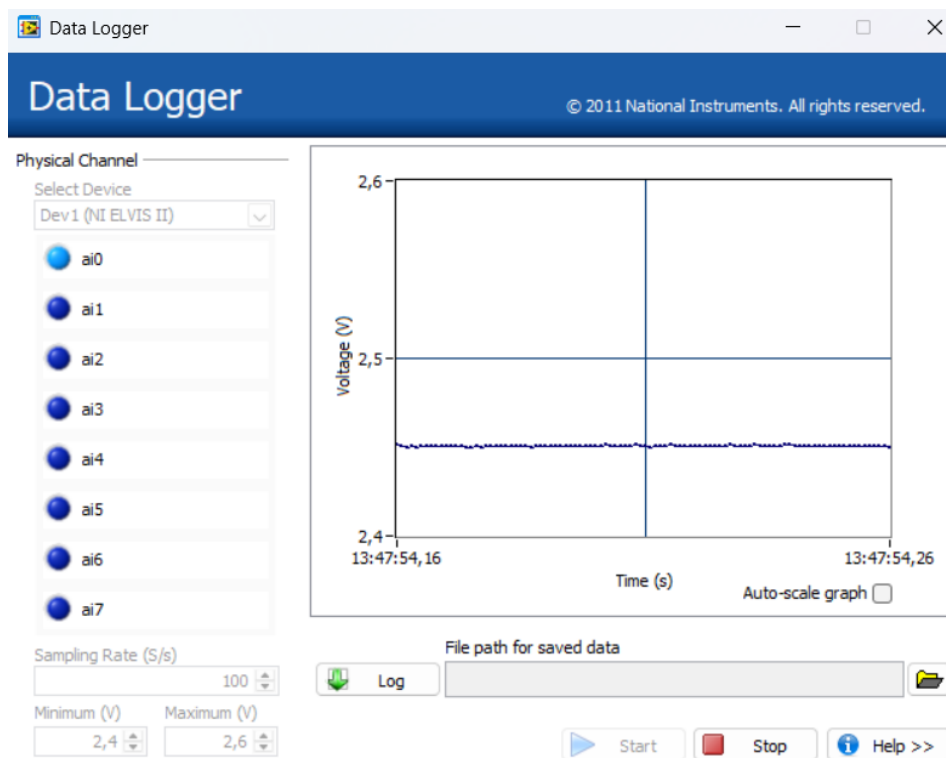


Рисунок 4.10 - Дані з вольтметра при швидкості потоку 0 (м/с)

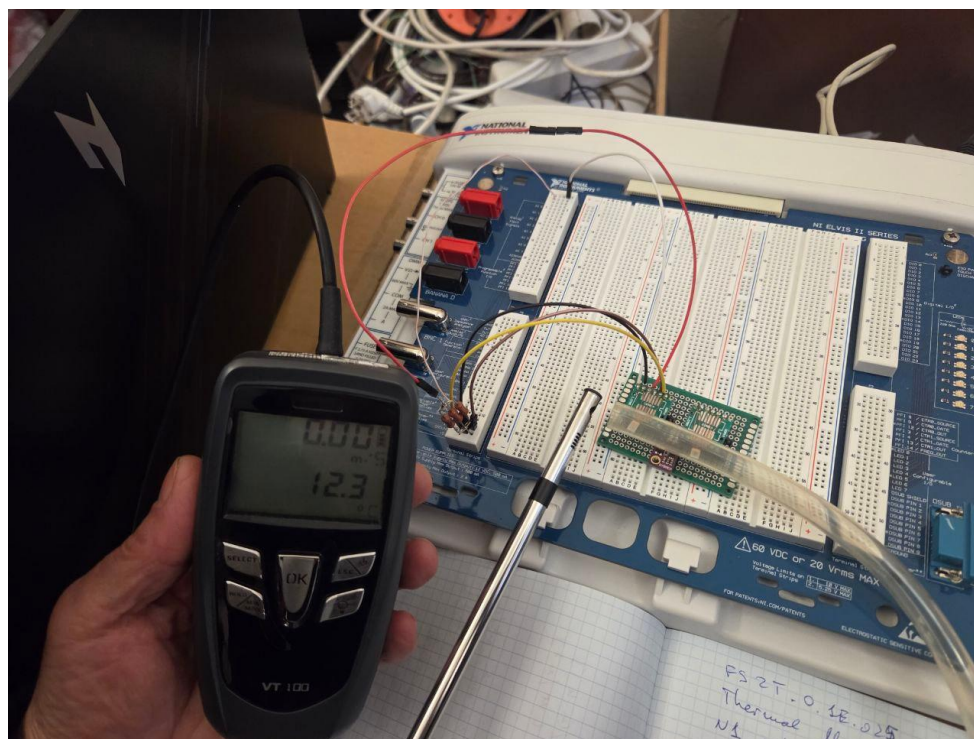


Рисунок 4.11 - Фото значення анемометра при 0 (м/с)

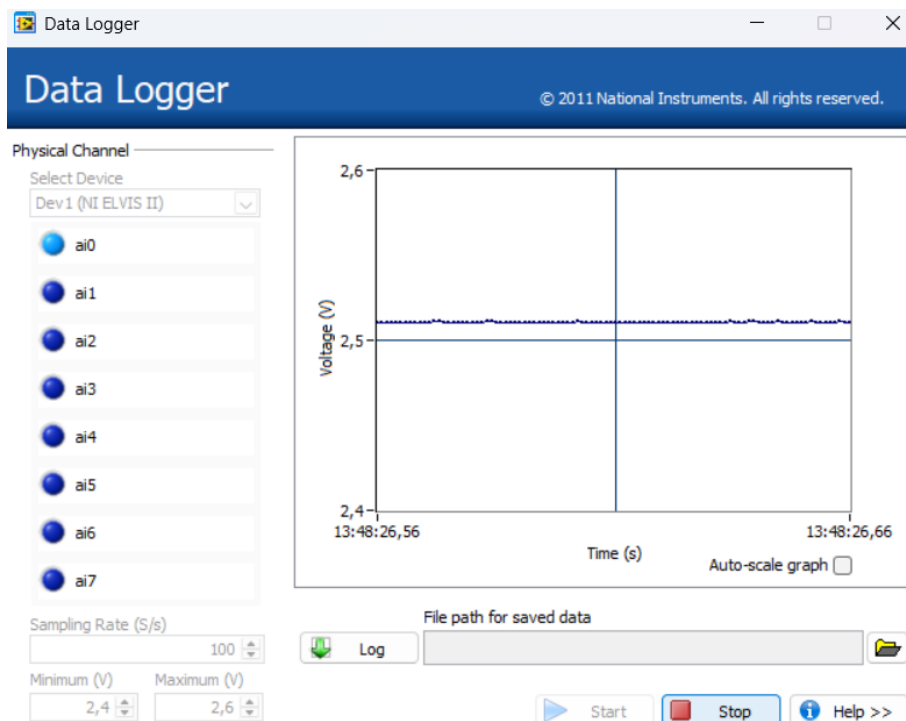


Рисунок 4.12 - Дані з вольтметра при включенні генератора на швидкість 0,5 (м/с)

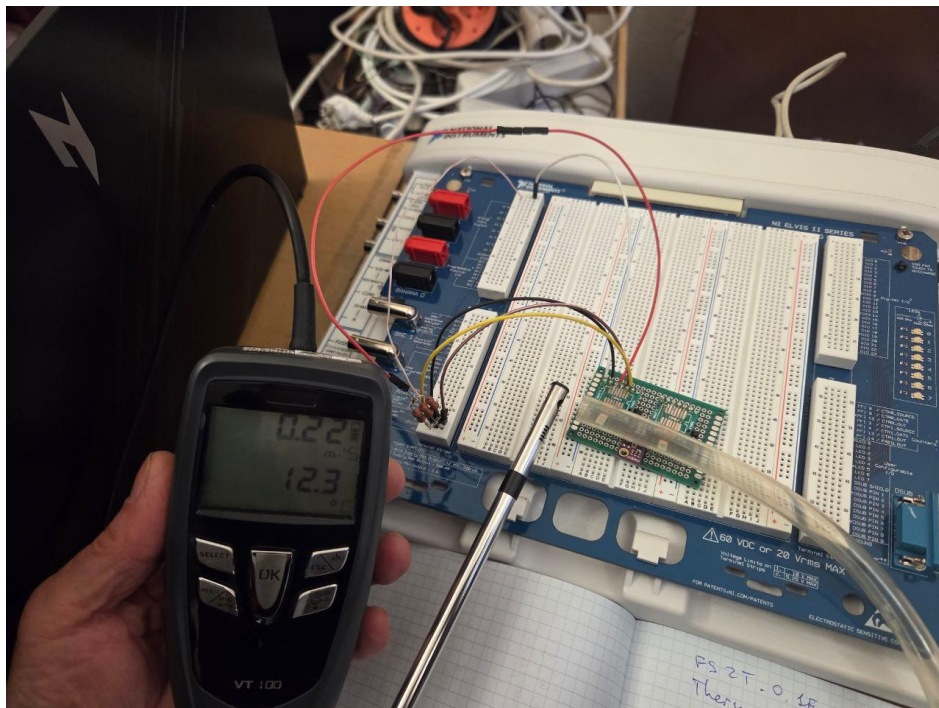


Рисунок 4.13 - Фото покази еталонного анемометра при швидкості потоку
0,20 +/- 0,05 (м/с)

Отримані дані стали основою для подальшого визначення емпіричних коефіцієнтів рівняння Кінга та формування калібрувальної залежності.

Після проведення первинного калібрування було зібрано працездатну калібровану схему та було проведено тестування у природніх умовах – обдув сенсорів без трубки з регульованою швидкість потоку та перевірено працездатність як у діапазонах 0-1 м/с так і при більшому 0-100 м/с рисунок 4. 14.

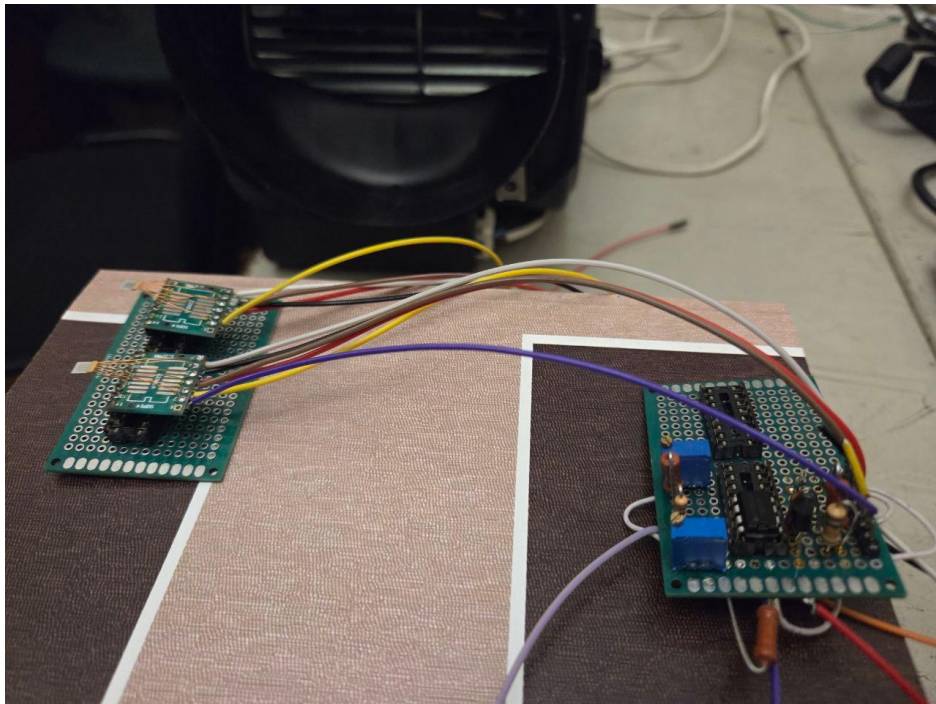


Рисунок 4.14 - Тестування в умовах наближених до реальних

Виконавши дане тестування ми отримали і підтвердили значення виробника в діапазоні 0.2 - 0.8 м/с при 1В та 0.5 – 20 м/с при 3В зворотної напруги , але при збільшені швидкості потоку вище зазначених діапазонів збільшення напруги різко зменшувалось та за +10% від граничних значень транзистор виходив на режим насичення, що свідчить про можливі недоліки у схемі або її компонентах.

Розділ 5

Аналіз результатів

Отримані результати моделювання дали змогу не лише підтвердити працездатність застосованої електричної схеми, але й оцінити вплив окремих параметрів на чутливість та точність вимірювань. При цьому важливо, що моделювання демонструвало якісну відповідність зі спостереженнями, наведеними у розділі 4: зокрема, характер зміни вихідної напруги при низьких і середніх швидкостях практично збігався з експериментально отриманими даними. Це свідчить про правильність вибору методики моделювання та адекватність використаних математичних залежностей. Суттєвою перевагою виконаного моделювання є те, що воно дозволило заздалегідь виявити можливі обмеження роботи схеми, наприклад - перенасичення нагрівача при надмірному підвищенні швидкості або зміщення робочої точки при коливаннях температури.

Для моделювання застосовано мостову схему з двома активними елементами FS2 та двома компенсаційними резисторами, підключеними через віртуальний підсилювач. Усі параметри відповідали характеристикам, наведеним у технічній документації виробника. За допомогою вбудованих засобів NI ELVIS II було експериментально розраховано вплив напруги живлення та швидкості потоку на зміну вихідного сигналу. Застосування мостової схеми виявилось оптимальним рішенням, оскільки вона забезпечує хорошу чутливість до малих змін опору терморезисторів. При моделюванні було підтверджено, що найбільший вплив на сигнал має симетрія плечей моста: навіть незначний дисбаланс у номіналах резисторів призводив до зсуву нуля та викривлення калібрувальної функції. Це особливо помітно при низьких швидкостях, де зміни опору є мінімальними. Крім того, моделювання дозволило оцінити вплив форми та частоти шумів, що виникають у реальних вимірюваннях, та

підібрати оптимальні параметри фільтрації. Віртуальні інструменти NI ELVIS II також дозволили наочно відстежити теплову поведінку нагрівача та підтвердити нелінійний характер тепловіддачі, притаманний тонкоплівковим сенсорам.

Отримані результати показали, що сенсор FS2 має типовий для термоанемометрів нелінійний характер роботи. У зоні низьких швидкостей (до 1,5 м/с) залежність напруги від швидкості є майже лінійною, а при збільшенні швидкості спостерігається насичення, зумовлене обмеженням тепловіддачі. Нелінійність характеристик також була підтверджена експериментальними вимірюваннями: графіки, отримані під час реальних тестів, продемонстрували аналогічну форму залежності. Це підтверджує, що сенсор FS2 коректно працює у своєму робочому діапазоні і що основні фактори, які формують сигнал (тепловіддача, тепловий баланс та опір нагрівача), відтворюються у моделі адекватно. Особливо важливою є зона низьких швидкостей, оскільки вона є найбільш чутливою до змін і визначає придатність сенсора для точних вимірювань у діапазоні малих швидкостей. Насичення на високих швидкостях — типовий ефект, який підтверджує теплову природу сенсора: у певній точці збільшення швидкості повітря вже не забезпечує пропорційного зростання тепловіддачі через обмеження теплообміну.

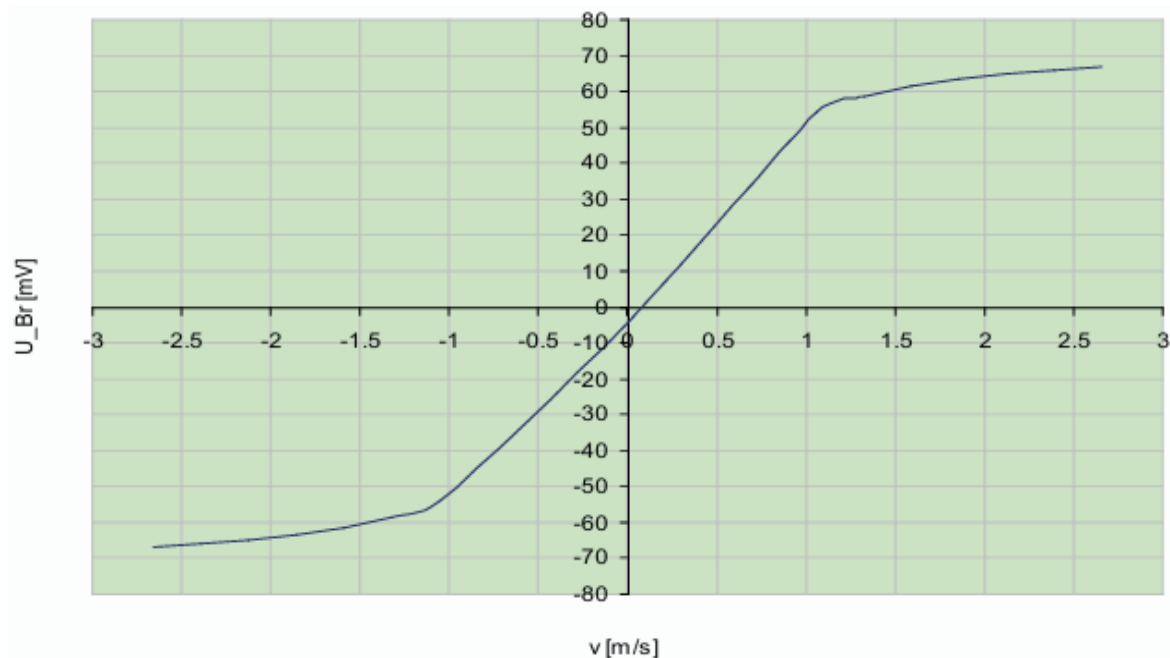


Рисунок 5.1 - Графік залежності напруги від швидкості потоку газу[12]

Особливу увагу приділено впливу температури навколишнього середовища. Без компенсації зміна температури на ± 10 °C викликала відхилення сигналу на 3–5 %, тоді як після введення температурного коефіцієнта корекції, розрахованого на основі властивостей платини, похибка зменшилася до менше ніж 1 %. Це підтверджує ефективність застосування температурної компенсації при практичному використанні сенсора.

Під час моделювання динамічної реакції було встановлено, що час відгуку системи становить близько 500 мс, що є хорошим показником для теплових анемометрів. Це дозволяє використовувати FS2 не лише для статичних вимірювань, а й для реєстрації швидких змін потоку - наприклад, у вентиляційних каналах, трубопроводах чи лабораторних аеродинамічних установках.

Застосування платформи NI ELVIS II дало змогу провести повне дослідження без виготовлення фізичного макета плати. Віртуальні прилади в середовищі LabVIEW відтворили всі етапи вимірювання - від генерації сигналу

моста до фільтрації, підсилення та оцифрування. Це дало можливість перевірити різні режими роботи, змінювати параметри живлення й спостерігати, як вони впливають на вихідний сигнал.

У процесі аналізу виявлено, що найкраща стабільність сигналу досягається при живленні сенсора постійною напругою 3 В та струмі близько 3 мА. Підвищення струму до 4 мА призводить до помітного зростання шуму через тепловий дрейф. Оптимальна частота зрізу фільтра низьких частот становить приблизно 20 Гц, що забезпечує баланс між швидкістю відгуку та пригніченням випадкових коливань сигналу. Це узгоджується з даними технічної документації, де також зазначено, що надмірне навантаження на нагрівач призводить до порушення теплового балансу і може викликати необоротні зміни його характеристики. Аналіз показав, що при зменшенні частоти зрізу нижче 10 Гц з'являється помітна інерційність вимірювальної системи, тоді як підвищення понад 30 - 40 Гц пропускає надлишковий шум, пов'язаний з мікроколиваннями потоку та електричними перешкодами. Таким чином, вибір параметрів живлення й фільтрації відіграє ключову роль для забезпечення стабільності вимірювань, що особливо важливо при подальшому використанні калібрувальної моделі для відновлення швидкості потоку.

Висновок

У магістерській роботі проведено дослідження принципів побудови та практичної реалізації системи вимірювання швидкості потоку на основі сенсора FS2. На основі теоретичного аналізу описано теплові процеси в сенсорі, визначено залежність між електричними параметрами та швидкістю потоку, а також обґрунтовано використання закону Кінга для побудови математичної моделі.

Розроблено електричну схему сенсорного вузла, підібрано елементи мостової схеми, підсилювача та фільтра сигналу. Виконано моделювання роботи системи та проведено експериментальне калібрування, що підтвердило правильність вибраного підходу. Отримані результати показали стабільність роботи сенсора, адекватну реакцію на зміну швидкості та прийнятну точність вимірювань.

Джерела

1. Bruun, H. H. Hot-Wire Anemometry : principles and signal analysis. Oxford : Oxford University Press, 1995. 507 p. Електронна версія: <https://external.dandelon.com/download/attachments/dandelon/ids/DE00487DDA823924CBB26C12574BF0040E47E.pdf> (дата звернення: 14.10.2025).
2. Wu, C.-H.; et al. MEMS thermal flow sensors : review (J. Micromech. Microeng., 2016) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424716300723> (дата звернення: 14.10.2025).
3. Ejeian, F.; Warkiani, M. Design and applications of MEMS flow sensors : review (2019) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.warkianilab.com/uploads/3/0/1/8/30183345/201911.pdf> (дата звернення: 14.10.2025).
4. Comte-Bellot, G. Hot-Wire Anemometry [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://acoustique.ec-lyon.fr/publi/comte-bellot_arfm76.pdf (дата звернення: 18.10.2025).
5. Federal Aviation Administration. Hot film and hot wire anemometry : technical report. FAA, 2004 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/fsr-0167.pdf> (дата звернення: 14.10.2025).
6. Flow Sensors & Modules : industrial product catalog [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.industry-online.com/uploads/products/documents/78968202-8b60.pdf> (дата звернення: 18.10.2025).
7. Djuzhev, N. A.; et al. Measurement system for wide-range flow evaluation and calibration (Sensors & Actuators A, 2021) [Електронний ресурс]. Режим доступу:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424721002958> (дата звернення: 14.10.2025).

8. Balakrishnan, V.; et al. Thermal flow sensors for harsh environments (Sensors, 2017) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5620666/> (дата звернення: 14.10.2025).

9. Huang, L.; et al. Micromachined Thermal Time-of-Flight Flow Sensors and Progress : review (2022) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9608152/> (дата звернення: 18.10.2025).

10. Kang, Q.; et al. A Reliability Analysis of a MEMS Flow Sensor (Sensors, 2023) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/21/8733> (дата звернення: 23.10.2025).

11. Innovative Sensor Technology AG. FS2 – Thermal gas flow sensor : datasheet FS2T.0.1E.025 [Електронний ресурс]. Ebnat-Kappel : IST AG, 2019. Режим доступу: <https://www.ist-ag.com/en/products/thermal-gas-flow-sensor-fs2> (дата звернення: 23.10.2025).

12. Innovative Sensor Technology AG. FS2T.0.1E.025 : product datasheet (Mouser copy) [Електронний ресурс]. Mouser Electronics. Режим доступу: https://www.mouser.com/datasheet/2/1426/fs2t_0_1e_025-2950469.pdf (дата звернення: 23.10.2025).

13. Innovative Sensor Technology AG. FS2 : compressed technical brochure (Flow Sens / FS2 technical note) [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/60379/download/460207/FS2_E2.2.2.compressed.pdf (дата звернення: 23.10.2025).

14. National Instruments. NI ELVIS II Series : user manual [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://engineering.unt.edu/ee/files/NI_ELVIS_II.pdf (дата звернення: 23.10.2025).
15. National Instruments. NI ELVIS II Series : specifications [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs-be.ni.com/bundle/372590b/raw/resource/enus/372590b.pdf> (дата звернення: 14.10.2025).
16. National Instruments. NI ELVIS II : quick reference / user guide [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.unm.edu/~pzarkesh/ECE321/lab/NI_ELIVS_II_Quick%20Reference%20Guide.pdf (дата звернення: 23.10.2025).
17. Russo, A. Practical aspects of hot-wire anemometry : limits and calibration (огляд) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/.../download/russo2011.pdf> (дата звернення: 04.11.2025).
18. Що таке анемометр. "Інтернет - магазин глушників і вихлопних систем." URL: <https://glushitel.zp.ua/ua/chto-takoe-anemometr.html> (дата звернення: 13.11.2025).
19. Анемометр Xintest HT-9829 с телескопічним зондом – Глушники ЗП для твого автомобіля. "Інтернет - магазин глушників і вихлопних систем." URL: <https://glushitel.zp.ua/ua/chto-takoe-anemometr.html> (дата звернення: 14.10.2025).
20. Glatzl, T.; et al. Hot film and calorimetric thermal air flow sensors realized by PCB technology (Sensors and Actuators, 2016) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://jsss.copernicus.org/articles/5/283/2016/jsss-5-283-2016.pdf> (дата звернення: 13.11.2025).

21. Baldwin, A.; Hudson, T.; Meng, E. A calorimetric flow sensor for ultra-low flow applications (IEEE Transactions, 2018) [Електронний ресурс]. Режим доступу:
https://biomems.usc.edu/publications/2018/2018_MEMS_calorimetric_flow.pdf
(дата звернення: 15.11.2025).
22. Портативний ультразвуковий витратомір газів GE TransPort PT878GC (DN 20 - 600) - ТОВ "НВП ВОДОМІР". ТОВ "НВП ВОДОМІР". URL: <https://vodomir.com.ua/ua/shop/odnokanalnyj-ultrazvukovoj-obemnyj-rashodomir-gaza-ge-transport-pt878gc/> (дата звернення: 17.11.2025).
23. Анемометр – прилад для визначення швидкості та напрямку руху потоку. Simvolt – вимірювальні прилади. URL: <https://simvolt.ua/anemometr-prilad-dlya-viznachennya-shvidkosti-ta-napryamku-rukhu-potoku/> (дата звернення: 14.11.2025).
24. Flow-Sens / FS2 application note : Flow Sens overview [Електронний ресурс]. Режим доступу:
<https://www.yumpu.com/en/document/view/43215658/flow-sens-fs2-measuring-small-and-high-flows-and-its-ist-ag> (дата звернення: 14.10.2025).
25. Qpedia. Understanding Hot-Wire Anemometry : application note [Електронний ресурс]. Режим доступу:
https://www.mouser.com/catalog/additional/ATS_Qpedia_Dec07_Understanding%20hot%20wire%20anemometry9.pdf (дата звернення: 14.11.2025).
26. Аналіз функціональних можливостей лабораторного комплексу з віртуальними вимірювальними приладами National Instruments elvis 2 (ni elvis 2). StudFiles .URL: <https://studfile.net/preview/14470252/page:2/> (дата звернення: 23.11.2025).
27. Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data : guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM, JCGM

100:2008) [Электронный ресурс]. Режим доступа:
https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf (дата
звернення: 29.11.2025).