

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти
магістр

на тему: «Економна система контролю роботи польових обприскувачів»

КРМ. 133ГМмд_23.00.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
«Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»
ступеня вищої освіти магістр
групи 133ГМмд_23
ЮДКО Владислав
Керівник: докт. техн. наук, доцент
ВЕТОХІН Володимир

Полтава – 2023 року

ВСТУП

Традиційна технологія розпилення широко відома фермерам і виробникам, але процес розпилення привертає все більше уваги з боку агрохімічної промисловості через ефективність застосування та вплив на навколишнє середовище. Здатність точно контролювати та реєструвати швидкість потоку з машини для нанесення є важливою.

Типовий польовий обприскувач має резервуар, який містить розбавлений хімічний засіб для застосування. Насос буде переміщувати рідину з резервуара через різні сантехніки, регулюючі клапани та колектори до ряду форсунок, розподілених по широкій штанзі. Традиційно недоцільно активно контролювати швидкість потоку на кожній форсунці в машинах для розпилення. Зазвичай на головній живильній лінії встановлено лише один регулюючий клапан і витратомір. Оператори можуть лише контролювати та регулювати загальну швидкість потоку. Система покладається виключно на однорідність між наконечниками сопел для рівномірного розподілу потоку.

Потенційні проблеми виникають, якщо насадка використовувалася тривалий час і зношилася. Можливий витік, або корозія отвору, або частки бруду можуть заблокувати отвір, що спричинить більший або менший потік, ніж очікувалося. Крім того, за деяких обставин оператор може захотіти змінити швидкість потоку для різних форсунок. Наприклад, на рис. 1.1 показана ситуація, коли обприскувачі роблять повороти. Швидкість внутрішньої форсунки менша, ніж зовнішня, тому область, охоплена внутрішньою форсункою, отримуватиме більшу кількість хімікатів, ніж зовнішня область. Щоб виправити це, очікується, що форсунки матимуть різну швидкість потоку.

Одним з рішень цієї проблеми було б встановити датчик витрати на кожну форсунку, щоб полегшити контроль рівня форсунки. На жаль, поточні моделі комерційних обприскувачів можуть мати штанги шириною до 36 м (приблизно 120 футів) або більше. Типова відстань між соплами на штанзі становить 51 см (20 дюймів), що означає, що на 36-метровій штанзі буде 72 сопла. Щоб реалізувати цей рівень контролю, важливо зменшити вартість кожного датчика для керування

машиною. Відповідно до сучасних технологій важко знайти комерційно доступний датчик за прийнятною ціною за відносно низькі витрати.

Рисунок 1.1 Ескіз розпилювальної машини, що робить повороти

Ця стаття представляє нову техніку вимірювання швидкості потоку через одну форсунку, яка врівноважує точність технології із загальною вартістю пристрою.

РОЗДІЛ I. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ, ЩО СТОСУЮТЬСЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮВАННЯ ПОТОКУ ВОДИ

1.1. Огляд контрольного обладнання для оприскувачів

У розпилювачі сопло — це сконструйований отвір, який створює певний малюнок розпилення, коли рідина знаходиться в розпилювачах. У цьому дослідницькому проекті використовувалися насадки виробництва Wilger (Лексінгтон, Теннесі). На малюнку 1.2 показано різні типові конфігурації сопел.

Рисунок 1.2 Різні конструкції наконечників сопел

В основному існує 3 рівні контролю, які можна застосувати на польових обприскувачах. На самому базовому рівні потужність розпилювача контролюється шляхом регулювання тиску в системі. У цьому сценарії слід точно контролювати швидкість руху машини, щоб підтримувати належну норму внесення. Другий рівень керування додає функцію автоматичної компенсації швидкості машини. Останній тип, який застосовувався з цим датчиком, використовує GPS-контроль.

З розвитком технології GPS все більше і більше машин використовують технологію автоматичного керування секціями (ASC). Система навігації на основі

GNSS використовується для автоматичного вмикання та вимикання секцій машини, щоб інструмент не перекривав сусідні смуги або інші раніше оброблені ділянки (Alabama A&M та Auburn Universities et al., 2011). Розширений контроль потоку необхідний для досягнення мети контролю або швидкості. (Університети Алабами A&M та Оберн та ін.).

1.2. Огляд техніки вимірювання потоку

Існує багато способів вимірювання витрати. Основні методи можна класифікувати за способом дії, наприклад, механічні, тиск, оптичні, вихрові та ультразвукові. (Нік, 2012)

Це підходить для вимірювання падіння тиску, щоб визначити швидкість потоку. Пристрої з трубкою Вентурі та пілотною трубкою використовують теорію тиску. Трубка Вентурі має в трубопроводі частину меншого діаметра (рис. 1.3). Секція меншого діаметра повинна бути від $0,224D$ до $0,742D$. Коли потік проходить через трубу, буде падіння тиску від верхнього до нижнього потоку, і швидкість потоку пропорційна різниці тиску. (Asyiddin, 2007).

Рисунок 1.3 Принцип венчурної труби (Asyiddin, 2007)

Венчурна труба широко використовується для чистої, брудної або в'язкої рідини (Sanjaya Kumar, 2008), але вона не підходить для цього проекту, оскільки її розмір завжди великий порівняно з бажаним.

Турбінний витратомір використовує механічну енергію рідини для обертання лопатевого ротора (рис. 1.4). Це непрямий датчик. Кількість обертів лопатки пропорційна швидкості потоку (Frenzel, et al., 2011). Модулі прийому сигналів датчиків витратомірів турбіни встановлені за межами поточного потоку, тому він не має занадто багато обмежень потоку. Витратомір для турбіни дуже дорогий, тому він може не підійти для нашого проекту.

Рисунок 1.4 Внутрішня структура турбінного витратоміра
Ультразвукові датчики потоку (рис. 1.5) використовують вплив рухомої рідини на ультразвуковий імпульс, що надсилається через потік потоку (Kumar, 2008).

Рисунок 1.5 Ескіз ультразвукового витратоміра (Kumar, 2008).

Основним методом виявлення є вимірювання фазового зсуву між хвилею в бік низхідної та верхньої течії (Джон, 2013). Рівняння для вимірювання таке:

$$v = \frac{KP^2}{2L} \left(\frac{1}{t_d - t_u} \right) \quad (1)$$

де K – коефіцієнт, P – діагональна довжина між датчиками, L – горизонтальна відстань між датчиками, а t_d , t_u представляють час проходження вгору та вниз за течією (N.Asyiddin, 2007). Оскільки ультразвукова техніка використовується для виявлення сигналів із високою точністю, що значно перевищує вимоги до вартості в цьому проекті, цей датчик не підходить для застосування тут.

За останні 30 років вихрова техніка стала основною технікою (Mattar and Vignos, Vortex Shedding Tutorial). Він використовує явище під назвою ефект Кармана, яке означає, що коли потік проходить повз обривне тіло, він створює вихори вниз за течією (рис. 1.6); (Йодер, 2010).

Рисунок 1.6 Ефект Кармана та принцип роботи вихрового витратоміра (Yoder, 2010).

Частота вихору пов'язана зі швидкістю потоку, а остаточне рівняння для витратоміра виглядає так:

$$f = \frac{S_t \cdot v}{d} \quad (2)$$

де f — частота вихору, tS — число Струхалія, на яке впливають матеріали, v — швидкість рідини, d — діаметр труби (Mattar and Vignos, Vortex Shedding Tutorial).

Вихровий витратомір широко використовується для вимірювання потоку, але він матиме проблеми з низькими витратами в цьому застосуванні, оскільки він створюватиме нерегулярні вихори (Yoder, 2010).

1.3. Огляд науково-дослідницьких робіт

Різні дослідницькі групи все ще проводять багато досліджень, щоб удосконалити методи та зробити більш вірогідним використання вібрації та акустичних сигналів для вимірювання швидкості потоку. Одне випробування проводив Баладже Дханрам Равічандран (2002). Ціль цієї мішені полягала в тому, щоб контролювати дихання людей, досліджуючи звук свистка в їх диханні. Вони знайшли залежність між швидкістю потоку та частотою. Їхній метод перевірили за допомогою циліндрів з повітрям із контрольованим тиском у водяній бані з підтримкою температури 37 °C, що відповідає умовам дихання людини. Симульоване дихання проходило через свисток, де випуск був підключений до витратоміра. Частотна характеристика певної швидкості потоку була записана за допомогою мобільного телефону. Для аналізу даних було застосовано алгоритм FFT. Швидкість потоку регулювали шляхом зміни тиску, і реєстрували частотні характеристики для різних швидкостей потоку.

Принцип полягав у тому, що коли людина дихає через трубу, це викликає резонанс. Довжина хвилі була підігнана до основної моди коливань, яка є $f = v/(4L)$ що призвело до висновку $f = v/(4(L+0.4d))$, де v — швидкість звуку в повітрі, L — довжина резонатора, d — діаметр резонуючого матеріалу, f — перевірена резонансна частота.

Ще одне використання акустичних сигналів для вимірювання швидкості потоку було в ядерних технологіях (Еванс та ін., 2002). Не торкаючись і не перериваючи потік у трубопроводі, вони використали ряд мікрофонів на трубі та ультразвуковий промінь. Масив мікрофонів використовувався для вимірювання зменшення хвильових чисел у рідині, щоб отримати співвідношення між швидкістю потоку та зміною хвильових чисел. Після послідовного аналізу вони дійшли висновку, що:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -Cp'(x) \quad (3)$$

де $C = g/(A\gamma)$, це означало, що прискорення потоку було пропорційне коливанню тиску. Наступним кроком було знайти кореляцію стандартного відхилення (std) коливань труби від середньої швидкості потоку рідини. Швидкість рідини можна виразити як:

$$u = \bar{u} + u' \quad (4)$$

де \bar{u} є середньою швидкістю а u' є швидкістю коливання. Більше того, вони виявили, що коливальний елемент \bar{u} можна виразити як

$$\bar{u} = \sqrt{\bar{m}}, \quad (5)$$

де $\bar{m} = u'^2$. І вони визначаються як

$$\frac{\sqrt{\bar{m}}}{\bar{u}} = \sqrt{\frac{\bar{m}}{\bar{u}^2}} \quad (6)$$

який отримав назву Інтенсивність турбулентності. Тоді за визначенням і розрахунком:

$$\frac{\sqrt{\bar{m}}}{\bar{u}} = \sqrt{\frac{\bar{m}}{\bar{u}^2}} = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N [u_i(t) - \bar{u}]^2}{\bar{u}^2} = C, \quad (7)$$

Після деяких змін вони отримали:

$$\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [u_i(t) - \bar{u}]^2 = \frac{NC}{N-1} \bar{u}, \quad (8)$$

де ліва сторона була визначення стандартного відхилення вибірки.

Вони використовували акселерометр РСВ, щоб отримати сигнал із труби. Однак, коли вони провели перетворення ШПФ із сигналів у часовій області, вони виявили, що воно мало дуже невеликий зсув пікової частоти в частотній області. Наприклад, при швидкості потоку 1311 л/хв пікова частота припадала на 5,906 Гц, тоді як при швидкості потоку 4161 л/хв пікове значення припадало на 5,937 Гц, що не було хорошим орієнтиром. Тому вони вирішили аналізувати шум сигналу, який

був представлений як стандартне відхилення частотної області. Нарешті вони виявили майже квадратичну залежність від шуму сигналу та швидкості потоку. На результат також впливатиме матеріал труби та діаметр труби, але коли встановлено один параметр, результат завжди буде майже квадратичним.

Кіма та ін. (2002) запропонували прикріпити масив мікрофонів до поверхні труби для вимірювання акустичного сигналу (рис. 1.7). На одному кінці було джерело звуку, гучномовець, а інший кінець був просто пасивним закінченням. Вони виявили такий зв'язок між тим, як звук поширюється через трубу:

$$P(f, x) = P^+(f)e^{(-j\gamma^+x)} + P^-(f)e^{(-j\gamma^-x)}, \quad (9)$$

де $P(f, x)$ – частотний спектр акустичного тиску в місці x . $P^+(f)$ і $P^-(f)$ – спектри акустичного тиску вниз і в напрямку потоку відповідно, а γ^+ і γ^- були позначені як постійні поширення акустичної хвилі в кожному напрямку.

Рисунок 1.7 Експериментальне розташування мікрофонної решітки на трубі, як представлено Кіма та ін., 2002

За допомогою розрахунків вони дійшли висновку, що швидкість потоку в трубі можна виміряти за допомогою змінних хвильового числа, k , і різниці між хвильовими числами в нижньому та верхньому напрямках. Нарешті, швидкість об'ємного потоку, Q , описується як:

$$Q = \frac{-(k_0 + \sigma) + \sqrt{(k_0 + \sigma)^2 + 4(\angle G_1 / 2\Delta x)}}{\angle G_1 / \Delta x} \frac{\pi d^2}{4} c_0, \quad (10)$$

де Δx – відстань між двома послідовними датчиками, k – хвильове число, k_0 – хвильове число вільної середньої хвилі, а σ – константа затухання.

У 2012 році Какута та ін. провели деякі дослідження для розробки датчика вібрації з широким діапазоном частот за допомогою мікрофона (рис. 1.8). Вони заявили, що швидкість точки в рідині розглядається як суперпозиція середнього значення \bar{u} і флуктуаційного значення u' . Швидкість була представлена як $u = \bar{u} + u'$, де \bar{u} і u' були розраховані з достатньо довгим T наступним чином:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot dt \quad (11)$$

$$u' = \frac{1}{T} \int_0^T u' \cdot dt \quad (12)$$

Рисунок 1.8 Модель швидкості води в трубці (Kakuta et al, 2012)

Вони також визначили потік у горизонтальному напрямку w і напрямку сили тяжіння v :

$$\bar{w} = \frac{1}{T} \int_0^T w \cdot dt \quad (13)$$

$$w' = \frac{1}{T} \int_0^T w' \cdot dt \quad (14)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot dt \quad (15)$$

$$v' = \frac{1}{T} \int_0^T v' \cdot dt \quad (16)$$

Таким чином, компонент швидкості, w , біля стінки сопла дорівнював 0, оскільки він був зупинений стінкою. У цій моделі швидкість потоку води підкоряється принципу Бернуллі, який виражений у:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const} \quad (17)$$

Припустимо, внутрішні тиски p_{v1} і p_{w1} , зовнішні тиски на стінку труби p_{v2} і p_{w2} . v_2 і w_2 слід опустити, оскільки v_2 і w_2 дорівнюють 0.

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_{v1}}{\rho} + gz_1 = \frac{p_{v2}}{\rho} + gz_2 \quad (18)$$

$$\frac{w_1^2}{2} + \frac{p_{w1}}{\rho} = \frac{p_{w2}}{\rho} \quad (19)$$

З відповідними підстановками вони перетворюються у:

$$\Delta p_v = \frac{\rho v_1^2}{2} + g \Delta z \quad (20)$$

$$\Delta p_w = \frac{\rho w_1^2}{2} \quad (21)$$

Тоді швидкість потоку була показана як:

$$u_1 = 2 \sqrt{2 \frac{\Delta p_u}{\rho}} \quad (22)$$

$$v_1 = 2 \sqrt{2 \frac{\Delta p_v - g \Delta z}{\rho}} \quad (23)$$

$$w_1 = 2 \sqrt{2 \frac{\Delta p_w}{\rho}} \quad (24)$$

Тому залежність між енергією та швидкостями була:

$$U(t) = \sqrt{u^2 + w^2 + v^2} = \sqrt{\frac{2}{\rho} (\Delta p_v + \Delta p_u + \Delta p_w - g \Delta z)} \quad (25)$$

Далі вони отримали співвідношення швидкості потоку Q з коливаннями тиску:

$$Q = C_1 \frac{d_p^2}{2} \pi \sqrt{2 \frac{\Delta p_u}{\rho}} \quad (26)$$

На основі наведених вище рівнянь вони розробили датчик із мікрофоном. Описано будову датчика. Вони покрили камеру герметичною плівкою, щоб утримати атмосферний тиск у камері, щоб її можна було використовувати як датчик вібрації. Плівка під тиском викликала вібрацію внаслідок вхідної вібрації. Вібрація буде передана пневматичній пружині через коливання внутрішнього атмосферного тиску.

Вищезазначені передові експерименти все ще знаходяться на експериментальній фазі. Таким чином, для цієї програми необхідно було знайти інший спосіб визначення швидкості потоку.

1.4. Висновки за розділом. Мета і завдання дослідження

Метою цього проекту було розробити недорогий датчик витрати, який можна було б використовувати на рівні сопла сільськогосподарського польового обприскувача. Сучасні датчики швидкості потоку дуже дорогі, тому на машині зазвичай використовується лише один датчик для моніторингу швидкості потоку всієї системи. Оскільки між форсунками можливі коливання витрати, бажано контролювати потік на кожній форсунці. Датчик, розроблений у рамках цього проекту, був би досить недорогим, щоб відтворити його на штанзі розпилювача. Датчик повинен бути надійним щодо подавлення завад навіть у поганих умовах, типових для сільськогосподарської польової техніки, і мати відносно високу точність.

Задача 1. Порівняння двох методів: вібрації та акустики. Коли рідина тече через труби та сопло на розпилювачі, це спричинить вібрацію труби та акустичну вібрацію, яка є поєднанням тертя та завихрення в потоці. Першою метою було визначити, чи однакові ці два режими вібрації та результуючі частоти. Після порівняння вібрації та акустичних сигналів було обрано найкращий метод вимірювання відповідно до роздільної здатності, вартості, розміру тощо.

Ціль 2. Порівняння різних місць для кріплення датчиків. Після визначення найкращого методу вимірювання для цього проекту було проведено повторні експерименти, щоб визначити найкраще розташування датчика відносно сопла. Усі

ці випробування проводилися з використанням одного загального наконечника сопла.

Задача 3. Вибір відповідної техніки для обробки даних. Після вибору найкращого місця для датчика було проведено кілька повторних експериментів, щоб визначити надійне калібрування датчика для вимірювання швидкості потоку. Було введено та застосовано кілька різних методів обробки даних для вибору найбільш прийняттого співвідношення між вихідним сигналом датчика та швидкістю потоку.

Задача 4. Застосуйте техніку до кількох обраних насадок. Коли було визначено характерне співвідношення для одного наконечника сопла, експерименти повторювали з різними часто використовуваними наконечниками сопла. Ті самі співвідношення були застосовані, щоб побачити, чи калібрування дійсні лише для одного сопла, чи їх можна застосувати до більш широкого діапазону наконечників сопел.

РОЗДІЛ II. ТЕСТИ З АКУСТИЧНИМ СИГНАЛОМ І ВІБРАЦІЙНИМ СИГНАЛОМ

2.1. Планування експериментальної установки

Першою метою цього проекту було визначити, чи акустичний сигнал від сопла був таким самим, як вібрація поверхні корпусу та наконечника сопла. Якби вони були однаковими, можна було б легко вивчити акустичний сигнал, вивчивши вібраційний сигнал, виміряний за допомогою знайомого акселерометра. З іншого боку, якби акустичний сигнал відрізнявся від сигналу вібрації, тоді виникла б потреба розглянути сутність цих сигналів. За що вони виступали? Яка між ними була різниця? Яке з них матиме більший потенціал для визначення продуктивності потоку сопла?

Ця частина проекту була зосереджена на вимірюванні швидкості потоку за допомогою мікрофона та акселерометра. Ці два датчики перевіряли в одному місці відносно сопла, а результати порівнювали в частотній області. Це порівняння датчиків було використано, щоб зрозуміти значення сигналів і з'ясувати причину відмінностей. Нарешті, було зроблено висновок щодо того, чи приведуть ці два методи до однакових результатів і який метод є кращим для цього проекту.

На малюнку 3.1 показано випробувальний стенд, який використовувався в експериментах. Він складався з секції штанги комерційного обприскувача. Секція стріли мала чотири насадки, але в експерименті використовувалася лише одна. Для подачі води в бон використовувався насос і живильний бак. Клапан регулювання потоку (модель LCR05LPM, Alicat Scientific, Tucson, AZ) використовувався для контролю потоку води до сопла.

Рисунок 3.1 Огляд випробувального стенду

У цій частині дослідження використовувалися наступні датчики: Мікрофон: BL-21994-000 (Knowles, Itasca, IL), Акселерометр: ADIS 16228 (Analog Devices, з комплектом ADISUSBZ), Плата збору даних: NI-USB 4431 (National Instrument, Остін, Техас), Насадка: DR80-04 (Wileger Industrial Ltd., Lexington, TN), Програмне забезпечення: LabVIEW, Matlab, ADIS 16228 Evaluation Software, NI-MAX.

У цьому проекті для збору даних для аналізу використовувалася спеціалізована плата збору даних (DAQ). Перевага використання плати DAQ полягає в тому, що мікрофон можна чітко контролювати для впевненості в калібруванні рівня напруги та звукового тиску та вибірці частоти. Враховуючи сумісність з LabVIEW, було обрано NI-USB 4431 фірми National Instrument (рис. 3.2). Він має 4 24-бітні аналогові входи та 1 24-бітний аналоговий вихід, де всі вони є з'єднаннями BNC. Частота дискретизації може досягати 102,4 кСм/с. Крім того, режим вхідного з'єднання має вибір змінного/постійного струму.

ADIS 16228 (рис. 3.5) була повною системою визначення вібрації, яка поєднувала тривісне прискорення з розширеною обробкою сигналів у часовій та частотній областях. Обробка в частотній області включала 512-точкове реальне БПФ для кожної осі разом із усередненням БПФ, що зменшувало варіацію рівня шуму для кращої роздільної здатності (таблиця даних ADIS 16228). Сам датчик мав порт SPI для передачі даних і команд із комплектом ADISUSBZ (рис. 3.6), який перетворював сигнал SPI на сигнал USB, який можна було підключити до ПК для

збору даних. Програмне забезпечення для оцінки, що постачалося разом з акселерометром, використовувалося для автоматичного створення частотних графіків і керування акселерометром.

Рисунок 3.2 Плата збору даних NI-USB 4431

NI-USB 4431 добре підходить для запису звуку та вібрації з таких причин:

1. Він має високу частоту дискретизації (до 102,4 кГц), що означає, що частота сигналу може досягати 51,2 кГц без накладення спектрів.
2. NI надає допоміжне програмне забезпечення для звуку та вібрації, яке може автоматично виконувати аналіз сигналу, наприклад фільтрування, вікна, усереднення та аналіз часової та частотної області.

NI-USB 4431 живився від шини USB, тому після підключення до ПК він автоматично вмикався. Коли плата підключена до ПК, вона автоматично встановить диски та відповідне програмне забезпечення. Для цього проекту був обраний режим зв'язку змінного струму, а частота дискретизації була встановлена на найвищу, яка становила 100 кГц.

У цьому тесті використовувався BL-мікрофон Knowles (рис. 3.3). Це високоякісний мікрофон, який давав відносно точні та надійні результати. Для ініціалізації та використання мікрофона було виконано наступні конкретні завдання.

1. Схема відстеження джерела (рис. 3.4) була побудована на основі пропозиції з літератури виробника.
2. Вихід схеми було підключено до плати DAQ, а вихід USB плати DAQ підключено до ПК.
3. LabVIEW VI було створено для взаємодії з DAQ та керування збором даних.

Рисунок 3.3 Knowles BL-21994

Рисунок 3.4 Джерело Наступна схема для BL-21994

Рисунок 3.5 Акселерометр ADIS 16228 із з'єднувальною платою

Рисунок 3.6 Комплект зв'язку ADIS 16228 SPI – USB

Існувало 4 режими роботи акселерометра для різних цілей: ручний режим БПФ, автоматичний режим БПФ, режим ручного захоплення часу, режим реального часу. Режим було обрано шляхом встановлення правильного значення регістру REC_CTRL1 (базова адреса=0x1A) (табл. 3.1). У цьому тесті використовувалося лише ручне ШПФ. Після встановлення нової швидкості потоку використовувалася команда на VI, щоб ініціювати періодичне отримання спектрального запису.

Таблиця 3.1 Режими конфігурації акселерометра ADIS 16228.

REC_CTRL1[1:0]	Режим
00	Ручний FFT режим
01	Автоматичний FFT режим
10	Ручний режим фіксації часу
11	Режим реального часу

Акселерометр кріпився з одного боку корпусу сопла за допомогою ізоляційної стрічки. Акселерометр довелося кріпити безпосередньо до поверхні корпусу сопла; інакше вібраційний сигнал різко ослабне. Дані ШПФ по одній або трьох осях, зібрані за допомогою ADISUSBZ, зберігалися у файл електронної таблиці для подальшої обробки та аналізу.

2.2. Проведення досліджень

Першим завданням було використання акселерометра для вимірювання вібрації сопла. Було розроблено три групи тестів. У кожній групі було проведено п'ять різних тестів для швидкості потоку від 1,20 л/хв до 1,60 л/хв. Відмінності між п'ятьма групами полягали в частоті дискретизації та динамічному діапазоні. Параметри наведено в таблиці 3.2. Оскільки кількість точок вибірки була однаковою (10240), було легко визначити діапазон частот, який може бути корисним.

Зменшення динамічного діапазону підвищило точність динамічного вимірювання. Оскільки очікувалося, що вібрація сопла буде дуже незначною, для забезпечення найкращої роздільної здатності було обрано найменший діапазон (0-1 g).

Результати експериментів (рис. 3.7-3.9) показали чутливість шуму до швидкості потоку та тенденцію амплітуди вібрації до швидкості потоку. Було помічено, що акселерометр дуже чутливий до шуму. З тесту 1 спостерігалися два піки між 0-200 Гц. Понад 400 Гц було занадто багато шуму; таким чином, краще було зосередитися на піках нижче 200 Гц. Зі збільшенням частоти дискретизації (рис. 3.7, 3.8) частотна характеристика стала дуже шумною.

Таблиця 3.2 Конфігурація частоти дискретизації та діапазону для 3 тестів

Номер тесту	Частота вибірки (Гц)	Динамічний діапазон (г)
Дослід 1	1280	0 – 1
Дослід 2	5120	0 – 1
Дослід 3	10240	0 – 1

Рисунок 3.7 Вихідний сигнал акселерометра з частотою дискретизації 1280 Гц

Рисунок 3.8 Вихідний сигнал акселерометра з частотою дискретизації 5120 Гц

Рисунок 3.9 Вихідний сигнал акселерометра з частотою дискретизації 10240 Гц

Коли частота дискретизації була низькою, домінуючою вібрацією була вісь X, але після збільшення частоти дискретизації домінуючою вібрацією стала вісь Z. Це означало, що у вібрації по осі Z переважала висока частота, тоді як у діапазоні низьких частот вібрація по осі X була більш помітною. А на низькій частоті пікова частота виявилася однаковою по 3 осях.

Потім було важливо порівняти дві пікові частоти нижче 200 Гц для різних швидкостей потоку (Таблиця 3.3). Цікаво, що два піки не змінювалися зі швидкістю потоку. Першим піком був висновок про потужність, який буде обговорюватися далі в розділі 5. Таким чином, не відбулося жодного зсуву пікової частоти для вібрації сопла, коли швидкість потоку зростала.

Таблиця 3.3 Дві пікові частоти різної швидкості потоку до 200 Гц

Дебіт (л/хв)	1-а пікова частота (Гц)	2-а пікова частота (Гц)
1.2	60	120
1.3	60	120
1.4	60	120
1.5	60	120
1.6	60	120

Для порівняння з вібраціями, виміряними акселерометром, мікрофон був закріплений у тому самому місці на поверхні корпусу сопла, але відведений від поверхні на дуже коротку відстань. Ця відстань була необхідна, оскільки рівень звукового тиску в джерелі звуку буде нескінченним, і це може пошкодити мікрофон. Швидкість потоку змінювалася від 1,20 л/хв до 1,60 л/хв, коли реєструвалися спектральні сигнатури. Вимірний діапазон частот був від 0 до 24000 Гц, що було набагато більше, ніж обмеження мікрофона (10000 Гц).

На рисунку 3.10 показана частотна характеристика для 5 різних витрат. Порівнюючи аудіосигнал із вібраційним сигналом, виявилось, що аудіосигнал не мав стільки шуму навіть на високій частоті дискретизації.

Рисунок 3.10 БПФ вихідного сигналу мікрофона зі швидкістю потоку від 1,2 л/хв до 1,6 л/хв

Далі слід було порівняти результат при тій же швидкості потоку. Оскільки швидкість потоку впливала лише на сигнали нижчого частотного діапазону, достатньо було побудувати відповідь до 1000 Гц (рис. 3.11-3.15). Порівняння показало, що вібрація від корпусу сопла та акустична вібрація не однакові.

Рисунок 3.11 Порівняння результатів акселерометра (вгорі) і мікрофона (внизу) при швидкості потоку 1,2 л/хв.

Рисунок 3.12 Порівняння результатів акселерометра (вгорі) і мікрофона (внизу) при швидкості потоку 1,3 л/хв

Рисунок 3.13 Порівняння результатів акселерометра (вгорі) і мікрофона (внизу) при швидкості потоку 1,4 л/хв

Рисунок 3.14 Порівняння результатів акселерометра (вгорі) і мікрофона (внизу) при швидкості потоку 1,5 л/хв

Рисунок 3.15. Порівняння результатів акселерометра (вгорі) і мікрофона (внизу) при швидкості потоку 1,6 л/хв.

2.3. Висновки за розділом.

У цьому розділі робота була зосереджена на порівнянні двох потенційних методів визначення швидкості потоку через сопло: тестування вібрації сопла за допомогою акселерометра та тестування акустичної вібрації за допомогою мікрофона. Першим завданням було перевірити, чи однакові дві вібрації. Для порівняння виявилось, що результати не однакові, що означає, що два режими вібрації не однакові.

По-друге, було важливо знати джерело вібрації. За допомогою акселерометра потік через сопло викликав вібрацію, і ця вібрація передавалась на акселерометр, тому він вимірював вібрацію самого сопла. Однак мікрофон отримав вібрацію повітря, спричинену вібрацією сопла. Коли насадка тремтить, повітря в зазорі між поверхнею насадки та мікрофоном починає вібрувати, тому мікрофон виявляє вібрацію повітря. Це пояснило б, чому результати були різними.

Нарешті, вибором, який буде використано, був мікрофон, оскільки його вихід змінювався зі швидкістю потоку. Крім того, найдешевший акселерометр коштуватиме близько 40 доларів, тоді як мікрофон коштуватиме лише 2-3 долари за

штуку, тому використання мікрофона було б доцільнішим у застосуванні з кількома насадками.

РОЗДІЛ III. ВИБІР ЛОКАЦІЇ ДЛЯ МІКРОФОНУ

3.1. Матеріали та методика

У минулому розділі було порівняно два методи вимірювання швидкості потоку сопла, і вимірювання акустичної вібрації було обрано як найкращий метод для застосування в цьому проекті. Наступне питання, на яке потрібно відповісти, полягало в тому, де має бути розташований датчик? У цьому розділі розглядається вибір найкращого розташування датчика відносно корпусу сопла та наконечників сопла.

Величезний вплив на результат мала відстань між соплом і мікрофоном. Якщо мікрофон був надто далеко, акустичний сигнал у повітрі незабаром послабшав би, тому отриманий мікрофоном сигнал може бути дуже дрібним і непридатним для виявлення та аналізу. Якщо датчик був прикріплений близько до наконечника сопла, він може бути пошкоджений водою або, принаймні, під впливом крапель води. Також важливо враховувати вартість виготовлення системи кріплення для мікрофона, особливо якщо мікрофон інтегровано з корпусом або наконечником насадки.

Необхідно взяти до уваги такі фактори: вартість виробництва, уникнення пошкодження водою та підтримання достатньої інтенсивності сигналу. У цьому розділі описано серію тестів, які були проведені для визначення найкращого розташування мікрофона відносно сопла. Мікрофон: BL-21994-000 (Ноулз, Ітаска, Іллінойс) Програмне забезпечення: Matlab, Labview, Pro/e. Наконечник сопла: Wilger MR80-04. Налаштування обладнання та програмного забезпечення описано в розділі 3.

Щоб визначити найкраще розташування мікрофона, було виконано наступні конкретні завдання.

- a) Визначте можливі положення для мікрофона на насадці або навколо неї.
- b) Запишіть акустичну характеристику для різних витрат у кожному з вибраних місць.

с) Проаналізуйте та порівняйте результати, щоб визначити найкраще місце для подальшого тестування.

3.2. Експерименти із можливими позиціями мікрофонів

Було визначено три можливі розташування мікрофона відносно наконечника сопла (рис. 4.1). Оскільки кінчик сопла був симетричним, передбачалося, що акустичний сигнал, що передається в протилежних напрямках, буде ідентичним; таким чином, потрібно було враховувати лише один октант, що зменшувало кількість необхідних експериментів.

У октанті 1 було вибрано кілька місць для перевірки датчика. Місцем А було місце трохи вище наконечника сопла. Місце В було трохи нижче кінчика, але близько до поверхні розпилення. Місце С знаходилося в одній горизонтальній площині з кінчиком сопла.

Рисунок 4.1 Ескіз типового наконечника сопла, що показує три можливі розташування датчика мікрофона.

Датчик було перевірено в положенні А, яке було дуже близько до поверхні корпусу сопла, але не було прикріплено до нього, як описано в розділі 3. Як і підозрювалося, акустична вібрація була там дуже незначною, оскільки оболонка

сопла була твердою, а коливання повітря, спричинені соплом, були дуже незначними.

Було проведено п'ять тестів з використанням мікрофона при швидкості потоку від 1,2 л/хв до 1,6 л/хв. Діаграма частотної характеристики (рис. 4.2) не показала жодної тенденції або кореляції зі швидкістю потоку. Найнижча швидкість потоку мала найвищу амплітуду пікової частоти, тоді як при 1,4 л/хв амплітуда пікової частоти була найнижчою.

Рисунок 4.2. Аудіочастотна характеристика з датчиком, у позиції А

Графік середнього звукового тиску (рис. 4.3) показав, що коли швидкість потоку зростала, середній тиск не змінювався з тією ж тенденцією, що й швидкість потоку. Таким чином, недобре розміщувати датчик у точці А, оскільки він давав занадто мало інформації для визначення швидкості потоку.

Рисунок 4.3 Середня амплітуда при різних витратах.

Позиція В була дуже важливою для розгляду, оскільки її було легко виготовити та зручно вимірювати потік. Було проведено тринадцять випробувань при швидкості потоку від 1,0 л/хв до 2,2 л/хв. Частотна характеристика (рис. 4.4) показала високу реакцію на швидкість потоку на частотах нижче 5000 Гц, але досить низьку реакцію після цього. Таким чином, новий графік частотної характеристики був розділений до 5000 Гц (рис. 4.5).

Рисунок 4.4 Частотна характеристика в місці В

Рисунок 4.5 Частотна характеристика в місці В

Рисунок 4.6 Максимальна частота в 400-800 Гц

Наступним завданням було подивитися на потужність частотного сигналу. З попереднього результату було відомо, що більша частина потужності була зосереджена нижче 5000 Гц. Важливо було розрахувати потужність сигналу від 0–5000 Гц. На практиці розрахувати потужність акустичного сигналу було б дорого, тому було обчислено лише середнє значення та стандартне відхилення сигналу. Стандартне відхилення акустичного сигналу являло собою відхилення від середнього значення. На рис. 4.6 показано, що пікова частота при кожній швидкості потоку була зосереджена в діапазоні між 450 Гц і 750 Гц, що було відносно низьким у частотній області.

Середнє значення сигналу спочатку зростало зі швидкістю потоку, а потім зменшувалося при швидкості потоку вище 1,72 л/хв (рис. 4.7). Це не буде хорошим показником потоку, оскільки він не матиме однозначного відображення від швидкості потоку до середнього значення. Проблема була в тому, що мікрофон міг намокнути від бризок води. Експерименти повторили, і мікрофон висушили, коли швидкість потоку досягла 1,72 л/хв. Результати (рис. 4.9) показали кращий зв'язок. Після висихання мікрофона середнє значення показало тенденцію до зростання. Було очевидно, що вода поглинала датчик, через що результати були

непослідовними. Оскільки необхідно було постійно тримати датчик сухим, положення В було не дуже вдалим місцем для датчика.

Рисунок 4.7 Середнє значення та стандартне відхилення даних

Рисунок 4.8 Середнє значення та стандартне відхилення даних після висихання датчика перед тестом 172 л/хв.

Під час цього тесту мікрофон був прикріплений у тій же горизонтальній площині, що й вихідний отвір наконечника. Відстань до розетки не потрібно вказувати дуже точно, оскільки це не вплине на результат, який обговорюватиметься далі в цій частині. Випробування проводили 10 разів поспіль зі швидкістю потоку від 1,0 л/хв до 1,9 л/хв з кроком 0,1 л/хв. Було побудовано діаграму частотної характеристики (рис. 4.9), а потім проведено аналіз, щоб побачити, чи тенденції в характеристиках відповіді були безперервними. Загальна тенденція для цих кривих полягала в тому, що амплітуда зростала зі збільшенням швидкості потоку.

Рисунок 4.9 АЧХ для 10 послідовних тестів

При детальнішій оцінці спектральних відгуків від 0 Гц до 3000 Гц (рис. 4.10) стало зрозуміло, що амплітуда щоразу зростає, а пікова частота, здається, зміщується вправо зі збільшенням швидкості потоку. Це спостереження стане основою для подальших досліджень продуктивності датчика, розглянутих у розділі 5. Крім того, середній рівень звукового тиску та стандартне відхилення показали сильну кореляцію зі швидкістю потоку (рис. 4.11, 4.12).

Рисунок 4.10 АЧХ для 10 послідовних тестів на частоті 3000 Гц

Рисунок 4.11 Середній звуковий тиск для різних витрат

Рисунок 4.12 Стандартне відхилення для різних витрат

Зауважте, що ці 10 тестів проводилися без будь-якої зміни навколишнього середовища, тому результат довів, що краплі води не будуть серйозно впливати на мікрофон протягом певного періоду часу. Середні значення та стандартне відхилення амплітуди підтвердили постійну тенденцію до збільшення швидкості потоку та довели, що існувала широка відповідь швидкості потоку на багато характеристик сигналу. Було б легше вибрати один аспект для аналізу, щоб розрізнити швидкість потоку.

3.3. Висновки за розділом

У цьому розділі одним мікрофоном було перевірено три потенційні місця. Для першого, який був близько до поверхні сопла, результати показали, що не було очевидного показника швидкості потоку, що спостерігався за допомогою аналізу частотної характеристики, і було занадто багато шуму, особливо високочастотного. Друге місце виявилось більш перспективним як місце для тестування, оскільки воно має різні характеристики для кожної швидкості потоку, але якщо його протримати там певний період, воно буде зволожено краплями води. Після висихання мікрофона спостерігається та ж тенденція, що й раніше. Якщо мікрофон використовуватиметься в цьому місці, потрібно буде вжити інших заходів захисту, щоб зберегти мікрофон сухим. Нарешті, було обговорено розташування поблизу вихідного отвору наконечника сопла. Він показав дуже хороші характеристики в кожному аналізованому аспекті.

Крива АЧХ зсувалася і зростала зі збільшенням швидкості потоку. Стандартне відхилення та середня звукова потужність показали майже лінійну залежність від швидкості потоку в діапазоні низьких частот. Результат показав, що датчик не був мокрим після періоду випробувань. Тож це положення було б гарним місцем для утримання мікрофона. Тому для подальших експериментів було обрано місце С.

РОЗДІЛ IV. ПОСТ ОБРОБКА ОТРИМАНИХ ДАНИХ

4.1. Порівняння методів обробки даних

Після вибору найкращого датчика та місця встановлення наступним завданням було виконати більш ретельний аналіз продуктивності датчика та знайти способи використання датчика для визначення швидкості потоку через сопло. У цьому розділі в основному обговорюється аналіз експериментальних даних.

На малюнку 5.1 наведено приклад графіка інформації в частотній області для діапазонів витрат від 1,0 л/хв до 2,0 л/хв. Максимальна частота плати збору даних становила 50 кГц. Було відзначено кілька цікавих і потенційно корисних характеристик сюжету. Виразні піки спостерігалися на частотах 500 Гц, 7500 Гц і деяких інших високочастотних доменах.

Рисунок 5.1 Частотна характеристика акустичного сигналу для швидкості потоку 1,0 - 2,0 л/хв з мікрофоном Knowles BL-21994-000

При наближенні до частотного діапазону нижче 7 кГц (рис. 5.2, 5.3), що є верхньою межею для більшості мікрофонів, було зрозуміло, що амплітуда збільшується разом зі збільшенням швидкості потоку, а також, здається, є зсув у

частоті, на якій відбувся пік. Також спостерігався постійний імпульс із частотою 61 Гц, який впливав на процес підгонки кривої. Імпульс слід усунути, якщо він не мав нічого спільного з витратою, а був викликаний перешкодами джерела живлення.

Рисунок 5.2 Частотна характеристика для витрати 1,0 - 2,0 л/хв в 0-7000 Гц

Рисунок 5.3 Імпульсний сигнал, що виникає на частоті 61 Гц у частотній характеристикі

Нижче наведено конкретні завдання, які були виконані для подальшого аналізу акустичної інформації, зібраної за допомогою мікрофона:

1. Проаналізуйте дані у всьому діапазоні частот від 1 до 50 кГц з точки зору тренду середнього значення та стандартного відхилення амплітуди.

2. Проаналізуйте дані в діапазоні частот від 1 до 10 кГц, який був діапазоном частот мікрофона. Тенденції середнього значення та стандартного відхилення амплітуди порівнювали з результатами завдання 1.

3. Дослідіть причини появи фонменів на частоті 61 Гц.

4. Проаналізуйте амплітуду першого великого піку, який з'явився після аномалії 61 Гц.

5. Проаналізуйте зсув частотного розташування першого великого піку.

В експериментах використовували наступні ключові частини обладнання.

Мікрофон: Knowles BL-21994, CUI CMP-5247TF-K. Програмне забезпечення: Matlab, LabVIEW, Microsoft Excel, NI-Max. Плата збору даних: NI-USB 4431. Наконечники насадок: MR80-04

У цьому проєкті використовувалися два мікрофони: CUI CMP-5247TF-K і Knowles BL-21994. Метою використання двох різних мікрофонів було порівняння результатів. Оскільки Knowles BL-21994 має високу якість, результати мають бути відносно точними та надійними, але CUI CMP-5247TF-K буде більш реалістичним для цього застосування через його низьку ціну. Якщо вони дають подібні результати, то дешевший мікрофон буде доречним у цій програмі.

Для використання CUI CMP-5247TF-K (рис. 5.4) вимірювальна схема (рис. 5.5) повинна бути побудована відповідно до рекомендацій виробника. Потім вихід цієї схеми був підключений до системи збору даних.

Рисунок 5.4 Мікрофон CUI CMP-5247TF-K.

Рисунок 5.5 Схема вимірювання для мікрофона CUI CMP-5247TF-K

У 5.1 описано п'ять потенційних способів аналізу даних. Для перших двох нанесено середнє значення та стандартне відхилення для частотних діапазонів 0-50 кГц і 0-10 кГц (рис. 5.6 і 5.7). Було легко отримати деяку інформацію про амплітуду та силу сигналу щодо різних швидкостей потоку.

Спочатку був графік частотного діапазону 0-50000 Гц:

Рисунок 5.6 Середнє значення та стандартне відхилення амплітуди частотної характеристики в діапазоні частот 1-50 кГц.

Цікаво, що середнє значення амплітуди у всьому частотному діапазоні зростало зі збільшенням швидкості потоку, що вказувало на те, що з більшою швидкістю потоку середній звуковий тиск був більшим. Цього слід було очікувати. Тенденція стандартного відхилення показала, що коли швидкість потоку зростала, точки даних були більш рознесеними, що вказувало на те, що звуковий тиск на кожній частоті не збільшувався з однаковою тенденцією; деякі частоти зростали швидше, ніж інші.

Наступним завданням був аналіз частотного діапазону до 10 кГц, оскільки мікрофон був призначений для прийому звукової частоти. Крім того, зменшення діапазону аналізу зменшить час обчислення. Результати (рис. 5.7) показали тенденцію, подібну до попереднього аналізу. Середнє значення потужності сигналу мало різкіший тренд, ніж виявлено в аналізі всього діапазону. Це означало, що це буде більш помітний показник, ніж вибірка всього діапазону частот.

Рисунок 5.7 Середнє значення та стандартне відхилення амплітуди частотної характеристики в діапазоні частот 1-10 кГц

З наведених вище результатів було зроблено висновок, що середнє значення або стандартне відхилення можна використовувати як показник швидкості потоку. Занепокоєння полягало в тому, що під час фактичних польових випробувань програми виникне різновид непередбачуваного шуму, і важко буде зрозуміти, наскільки це вплине на результати. Крім того, стандартне відхилення також було

нестабільним еталонним стандартом, тому що на фермі мікрофон виявляв усілякі шуми, які могли з'являтися на різних частотах, тому це призводило до змін амплітуди в деяких компонентах частоти.

Таблиця 5.1 показує результати випробувань, повторених 5 разів для витрат 1,0-1,5 л/хв в діапазоні частот 0-10 кГц. У різних робочих середовищах середнє значення різко зміниться, тому воно не буде хорошим показником швидкості потоку.

Таблиця 5.1 Середня амплітуда для 5 тестів частотного діапазону 0-10 кГц в Па

Дебіт (л/хв)	Дослід 1 (10^{-2})	Дослід 2 (10^{-2})	Дослід 3 (10^{-2})	Дослід 4 (10^{-2})	Дослід 5 (10^{-2})
1.0	0,0189	0,0152	0,0176	0,0183	0,0199
1.1	0,0235	0,0224	0,0242	0,0232	0,0211
1.2	0,0287	0,0256	0,0290	0,0296	0,0276
1.3	0,0343	0,0312	0,0332	0,0322	0,0342
1.4	0,0405	0,0389	0,0395	0,0402	0,0412
1.5	0,0495	0,0452	0,0485	0,0473	0,0501

Було важливо отримати деяку інформацію з унікального піку амплітуди, що виникає при 61 Гц на всіх графіках. Перше завдання полягало в тому, щоб визначити, чи має пік амплітуди якийсь зв'язок зі зміною швидкості потоку. Якщо ні, було важливо вивчити причину імпульсної реакції. Таблиця 5.2 і малюнок 5.8 показують значення амплітуди при 61 Гц для різних швидкостей потоку. Кореляція швидкості потоку та амплітуди при 61 Гц не виявила чіткої тенденції чи зв'язку. Він демонстрував нерегулярну тенденцію зі збільшенням швидкості потоку, що означало, що він не був спричинений потоком.

Ще потрібно було з'ясувати, чому на частоті 61 Гц виникає імпульс. Якби це був лише екзогенний шум, необхідно було б використати певний метод фільтрації, щоб видалити його з частотної характеристики, щоб уникнути впливу на кінцеві результати. Було два можливих пояснення цього дивного явища: 1. Це було викликано вібрацією насоса. Оскільки мікрофони були закріплені на штанзі, вібрація могла передаватись від насоса до мікрофона через штангу. 2. Це було викликано перешкодами в електромережі. Шістдесят один герц досить близько до 60 Гц, що є частотою джерела змінного струму в США.

Таблиця 5.2 Пікова амплітуда при 61 Гц для витрат від 1,0 -2,0 л/хв

Дебіт (л/хв)	Пікова частота (Гц)	Амплітуда (Па)
1	61	0,007663
1.1	61	0,007564
1.2	61	0,007614
1.3	61	0,007435
1.4	61	0,007520
1.5	61	0,007597
1.6	61	0,007659
1.7	61	0,007453
1.8	61	0,007261
1.9	61	0,007170
2	61	0,007387

Рисунок 5.8 Пікова амплітуда при 61 Гц для витрат від 1,0 до 2,0 л/хв

Щоб перевірити припущення, було проведено два тести з нульовою швидкістю потоку, але один із працюючим насосом і другий з вимкненим. За результатами двох експериментів (рис. 5.9) було зрозуміло, що пік відбувся незалежно від того, був увімкнений чи вимкнений насос. Насправді амплітуда сигналу була сильнішою, коли насос вимкнено, тому це не було спричинено впливом вібрації насоса. Тоді це може бути спричинено перешкодами живлення. Відповідно до технічного опису пристрою збору даних, синфазна напруга, що

змінюється в часі, була підключена до цікавого сигналу, який має частоту близько 60 Гц. Існувала висока ймовірність того, що на інформацію про вибірку вплинуло джерело живлення змінного струму. Для підтвердження цього було проведено два тести. У цих тестах використовувався пасивний мікрофон. Результати показали відсутність перешкод живлення (рис. 5.10). Це означало, що коли джерело живлення змінного струму не використовувалося для подачі напруги на мікрофон, перешкоди змінного струму були усунені.

Рисунок 5.9 Частотна характеристика двох тестів при нульовій швидкості потоку з працюючим насосом і без нього.

Рисунок 5.10 АЧХ з пасивним мікрофоном при нульовій швидкості потоку.

Наступним завданням було зосередити аналіз на першому великому піку амплітуди (рис. 5.11). Діаграма показала, що для кожної швидкості потоку здавалося, що існує унікальний пік. Взагалі кажучи, пікова амплітуда та частота зсуваються зі збільшенням швидкості потоку. Як обговорювалося вище, амплітуда не була надійним індикатором, оскільки амплітуда на кожній частоті буде змінюватися зі змінами навколишнього середовища або близькості мікрофона. Таким чином, аналізи мали звернутись до частотного розташування піку, оскільки очікувалося, що він буде надійнішим, ніж інші показники.

Рисунок 5.11 АЧХ мікрофона BL-21994-000 для частотного діапазону 0-3000 Гц

Щоб надійно описати частотну характеристику, необхідно було запровадити метод підгонки кривої для згладжування та підгонки даних. Після згладжування графіка було б легко розпізнати пікові частоти та порівняти їх. Існує три загальні способи підгонки кривих: підгонка за найменшими квадратами, нелінійна підгонка та підгонка кривої згладжування. Метод найменших квадратів призначений для мінімізації квадрата похибки між вихідними даними та прогнозованими даними з рівняння, і він простий і добре зрозумілий. Існує кілька методів підбору найменших квадратів: лінійний, поліноміальний, степеневий і метод Гауса. Нелінійну підгонку також називають підгонкою нелінійної регресії. Як правило, методи машинного навчання використовуються для непараметричної регресії. Для нелінійної регресії

передбачено три способи: алгоритм Гаусса-Ньютона, алгоритм градієнтного спуску та алгоритм Левенберга-Марквардта. Підгонка кривої згладжування відрізняється від двох інших методів тим, що вона не дає визначеної функції, оскільки використовується, коли немає рівняння для представлення кривої. Існує кілька способів створення кривої згладжування: кубічний сплайн, інтерполяція та зваження (KaileidaGraph. Curve Fitting Guide). У цьому проекті, оскільки визначене рівняння було остаточно бажаним, остання категорія не була використана. Зазвичай розрахунок вручну для отримання гарної відповідності кривої справді складний і непрактичний. Використовувався інструмент `cftool curve and surface fitting` у Matlab. `Cftool` мав на вибір різноманітні моделі, щоб знайти правильний варіант.

Щоб використовувати `cftool`, можна використати команду `cftool` з іншими введеннями або просто ввести `cftool`. Він автоматично відкриє меню `cftool`, коли програма перейде до цього кроку. Після відкриття `cftool` слід ввести вихідні дані x і y , якими в даному випадку були частотний діапазон у Гц (x) і відповідна амплітуда в паскалях (y). Тоді оператор міг вибрати різні параметри в меню, такі як гладка, підгонка або аналіз. Шляхом проб і помилок було застосовано дві моделі для опису та представлення кривої частотної характеристики: поліноміальну та гауссову.

Поліноміальна модель була:

$$p(x) = \sum_{i=1}^N p_i x^{i-1} \quad (27)$$

яка була комбінацією різних порядків x , де N було пов'язано з найвищим порядком, який потрібно оцінити. У Matlab найвищий порядок міг бути 9, таким чином N було 10. Хорошим моментом використання полінома як підходящої моделі для цього проекту було те, що він пропускав би викидні точки, які були далеко від даних. Модель Гауса була:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i e^{-\frac{(x-b_i)^2}{c_i}} \quad (28)$$

яка була комбінацією різних хвиль \sin і \cos . У цьому рівнянні, a_i амплітуда, b центр ваги, c відносна пікова ширина, n кількість піків для підгонки, де в матлабі воно складає від 1 до 8.

Для аналізу були поставлені такі цілі:

1. Підібрана крива повинна показувати хорошу оцінку вихідної кривої, а коефіцієнт контакту має бути відносно високим.

2. Помилка між вихідними даними та прогнозами має бути якомога меншою.

3. Час обчислення має бути якомога меншим, оскільки в реальному застосуванні він буде реалізований як процес реального часу за допомогою якогось вбудованого процесора.

4. Кожна підібрана крива повинна мати чіткі характеристики, які вказують швидкість потоку, і вона повинна бути надійною.

Результати аналізу визначатимуть: 1. яку модель слід використовувати, 2. який порядок використовувати, і 3. який частотний діапазон підходить для аналізу.

Спочатку модель Гауса була випробувана на вихідних кривих. Модель Гауса широко застосовується в різних галузях техніки. Найвищим порядком моделі Гауса був 8-й порядок, тому було неважко зіставити криву з різними порядками, щоб побачити, який з них найкращий.

Рисунок 5.12 Діаграма частотної характеристики при швидкості потоку 1,5 л/хв

Рисунок 5.13 Модель Гауса з порядком 1-8 для витрати 1,5 л/хв

Результати підібраних кривих з використанням порядків від 1 до 8 для витрати 1,5 л/хв з частотним діапазоном 0-7000 Гц (рис. 5.12, 5.13) показали, що коли порядок був нижче 5, алгоритм давав плавну криву, але він не показав належного представлення вихідних даних. Коли порядок збільшувався, криві були ближчими до вихідних даних, але вони демонстрували більше нерегулярності поблизу пікової частоти, що призвело до неможливості визначити надійне, помітне значення. Для того, щоб визначити, чи можна практикувати модель Гауса в цьому випадку, було випробувано модель 8-го порядку для витрат від 1,0-1,7 л/хв для частотного діапазону 0-3000 Гц (рис. 5.14).

Рисунок 5.14 Фітінг моделі Гауса з порядком 8 для витрати 1,0 -1,7 л/хв

Рисунок 5.15 Фітінг моделі Гауса з порядком 6 для витрати 1,0 -1,7 л/хв

Коли була випробувана модель Гауса 6-го порядку (рис. 5.15), вона все ще показала, що шум впливає на результат у вигляді низької швидкості потоку. Отже, необхідно було згладити вихідні дані та не враховувати пік шуму, який стався на 61 Гц, у процесі підгонки. Однак, враховуючи, що програма оброблялася в реальному часі, це збільшило б час обчислення. Таким чином, використовуючи модель Гауса, буде компроміс між точністю підгонки кривої та часом обробки. Від нього було важко відмовитися, тому що необхідно було мати точність, щоб передбачити швидкість потоку за дуже короткий період. Таким чином, наступним кроком був перехід до поліноміальної моделі, щоб побачити, чи допоможе вона краще, оскільки автоматично пропускати шум.

Наступним кроком було спробувати поліноміальну модель. Діапазон частот, розглянутий першим, був 0-7 кГц (рис. 5.16, 5.17). Було легко побачити, що підібрана крива повинна бути більшою за поліном другого порядку.

Рисунок 5.16 Діаграма частотної характеристики при витраті 1,5 л/хв

Рисунок 5.17

Найкращими поліноміальними моделями для діапазону частот 0-7 кГц були поліноміальні моделі 7-го, 8-го та 9-го порядку. Однією з можливих причин необхідності такого високого порядку було те, що обраний частотний діапазон був невідповідним. Коли розглядалися вужчі частотні діапазони 0-1 кГц, 0-2 кГц і 0-3 кГц (рис. 5.18, рис. 5.19 і рис. 5.20), відповідність була набагато кращою з поліномами нижчого порядку. Зауважте, що менший частотний діапазон потребує набагато менше часу обробки.

Рисунок 5.18 Підгонка поліноміальної моделі з порядком 4-8 для витрати 1,5 л/хв з частотним діапазоном 0-1000 Гц

Рисунок 5.19 Підгонка поліноміальної моделі з порядком 4-8 для витрати 1,5 л/хв з частотним діапазоном 0-2000 Гц

Рисунок 5.20 Підгонка поліноміальної моделі з порядком 4-8 для витрати 1,5 л/хв з частотним діапазоном 0-2500 Гц

Було проведено п'ять випробувань у 5 різних днів з однаковим діапазоном витрат від 1,0 л/хв до 2,0 л/хв з інтервалами 0,1 л/хв. У цих експериментах використовувалися два мікрофони: VL-21994-000 і CUI CMP-5247TF-K. Вони були закріплені в одному місці, щоб приймати сигнали одночасно. Після збору даних для 5 різних тестів діапазон частотного аналізу змінювався (0-1500 Гц, 0-2000 Гц, 0-2500 Гц, 0-3000 Гц), щоб визначити, який з них є найбільш підходящим.

Таблиці 5.3-5.6 і малюнки 5.21-5.28 показали пікову частоту для різних тестів із двома мікрофонами (зауважте, що в наступному обговоренні VL представляє

дорожчий мікрофон BL-21994-000, а CUI представляє дешевший CUI CMP-5247TF-К .)

Таблиця 5.3 Порівняння пікової частоти для 5 тестів з частотним діапазоном 0-1500 Гц для обох мікрофонів.

Flow Rate(lpm)	1 st Test		2 nd Test		3 rd Test		4 th Test		5 th Test	
	BL	CUI	BL	CUI	BL	CUI	BL	CUI	BL	CUI
1	115	96	112	94	115	95	110	94	113	94
1.1	138	110	138	111	134	109	134	109	133	109
1.2	159	129	157	126	153	127	161	131	160	130
1.3	184	152	178	152	177	148	189	162	186	161
1.4	202	176	200	176	203	181	195	167	201	180
1.5	220	202	235	234	233	218	229	219	223	211
1.6	250	270	255	272	255	271	256	272	250	267
1.7	288	317	284	306	277	312	288	317	302	325
1.8	318	345	318	345	308	338	294	331	316	345
1.9	331	352	349	368	351	367	356	371	352	369
2	378	386	380	384	379	385	369	380	345	371

Рисунок 5.21 Пікова частота від швидкості потоку для 5 тестів з мікрофоном BL.

Рисунок 5.22 Пікова частота від швидкості потоку для 5 тестів з мікрофоном CUI.

Таблиця 5.4 Порівняння пікової частоти для 5 тестів з частотним діапазоном 0-2000 Гц для двох мікрофонів

Flow Rate(lpm)	1 st Test		2 nd Test		3 rd Test		4 th Test		5 th Test	
	BL	CUI	BL	CUI	BL	CUI	BL	CUI	BL	CUI
1	112	108	111	107	112	108	110	107	111	107
1.1	131	122	131	122	129	121	129	121	127	120
1.2	153	139	151	137	147	137	153	140	154	141
1.3	180	162	174	160	173	158	186	170	182	167
1.4	201	184	200	185	202	187	195	179	201	186
1.5	219	203	232	218	230	212	226	211	222	208
1.6	247	236	251	240	249	236	254	244	250	239
1.7	283	275	283	271	276	269	287	277	289	277
1.8	312	308	309	303	310	305	297	292	313	306
1.9	340	329	345	340	346	339	348	344	347	344
2	368	375	368	377	369	379	361	370	348	350

Рисунок 5.23 Пікова частота від швидкості потоку для 5 тестів з мікрофоном BL.

Рисунок 5.24 Пікова частота від швидкості потоку для 5 тестів з мікрофоном CUI.

Таблиця 5.5 Порівняння пікової частоти для 5 тестів з частотним діапазоном 0-2500 Гц для двох мікрофонів

Flow Rate(lpm)	1 st Test		2 nd Test		3 rd Test		4 th Test		5 th Test	
	BL	CUI	BL	CUI	BL	CUI	BL	CUI	BL	CUI
1	115	118	115	116	115	117	114	116	115	116
1.1	131	131	132	131	131	131	131	131	130	129
1.2	149	146	148	145	146	144	149	146	151	147
1.3	173	165	168	163	168	163	176	171	173	169
1.4	194	186	194	187	195	189	191	184	195	188
1.5	218	210	228	220	226	214	225	216	220	212
1.6	247	240	251	242	249	239	253	244	250	242
1.7	282	272	283	270	275	267	284	273	285	274
1.8	308	299	303	293	306	296	293	285	306	295
1.9	328	314	331	320	340	326	339	325	336	327
2	369	348	367	350	366	346	363	343	346	335

Рисунок 5.25 Пікова частота від швидкості потоку для 5 тестів з мікрофоном Knowles BL-21994-000

Рисунок 5.26 Пікова частота від швидкості потоку для 5 тестів з мікрофоном CUI CMP-5247TF-K

Таблиця 5.6 Порівняння пікової частоти для 5 тестів з частотним діапазоном 0-3000 Гц для двох мікрофонів

Flow Rate(lpm)	1 st Test		2 nd Test		3 rd Test		4 th Test		5 th Test	
	BL	CUI	BL	CUI	BL	CUI	BL	CUI	BL	CUI
1	119	123	118	121	119	122	117	121	118	121
1.1	136	138	136	138	136	138	136	138	135	137
1.2	153	153	152	152	150	152	153	153	154	154
1.3	172	169	169	168	169	168	173	173	173	172
1.4	190	187	190	188	192	189	188	186	191	188
1.5	214	209	220	215	219	211	219	214	215	210
1.6	244	238	245	239	244	237	247	240	246	240
1.7	280	271	281	269	275	268	282	272	285	273
1.8	308	299	303	293	306	296	297	288	307	296
1.9	328	314	330	320	339	325	338	325	335	326
2	363	345	362	348	360	344	358	342	343	334

Рисунок 5.27 Пікова частота від швидкості потоку для 5 тестів з мікрофоном Knowles BL-21994-000

Рисунок 5.28 Пікова частота від швидкості потоку для 5 тестів з мікрофоном CUI CMP-5247TF-K

Порівнюючи чотири діапазони частот, які були протестовані, 2500 Гц показав найкращий результат. Коли діапазон було збільшено до 3000 Гц, була невелика різниця на кривій пікової частоти відносно діапазону 0-2500 Гц, тому на основі повторних тестів 0-2500 Гц було обрано як наш діапазон частотного аналізу.

Як обговорювалося раніше, було цікаво побачити, що обидва мікрофони мали досить близький результат для різних швидкостей потоку. Інтервали між кожною швидкістю потоку були дуже близькими. Обидві криві пікової частоти показують однаковий лінійний тренд зі швидкістю потоку.

4.2. Вплив різних позицій

У четвертому розділі положення мікрофона було вибрано таким чином, щоб датчик був закріплений біля вихідного отвору сопла в одній горизонтальній площині. Потім виникло питання про близькість мікрофона до насадки.

Чи вплине відстань між наконечником сопла та мікрофоном на продуктивність датчика?

Потім було проведено кілька тестів, щоб перевірити, чи вплинула відстань на результати. Вибрано три відстані: 1,0 см, 1,5 см, 2,0 см. На кожній відстані оцінювали чотири різні швидкості потоку: 1,0, 1,2, 1,4, 1,8 л/хв.

Таблиця 5.7 показує пікову частоту з вибраним методом для перевірених витрат. З таблиці було видно, що пікова частота зміщується вниз, коли відстань збільшується. Іншими словами, чим далі датчик був від наконечника сопла, тим нижча пікова частота.

Таблиця 5.7 Частота пікової амплітуди для різних відстаней між мікрофоном і соплом (Гц)

Flow Rate (lpm)	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm
1.0	169	122	111
1.2	176	163	149
1.4	220	197	176
1.6	271	252	226

Відповідно до закону Строка, у тому самому середовищі, в якому поширюється звук, вищі частоти затухають швидше, ніж нижчі, що може пояснити це цікаве явище. Таким чином, у майбутніх тестах місце розташування має бути вказано, оскільки воно сильно впливає на результат.

Таблиця 5.8 Пікова амплітуда для різних відстаней між мікрофоном і соплом (Па)

Flow Rate (lpm)	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm
1.0	0.5712	0.3112	0.2787
1.2	0.6432	0.5306	0.4139
1.4	0.7463	0.6237	0.4708
1.6	0.8190	0.7339	0.5982

4.3. Висновки за розділом

Тести, описані в цьому розділі, були спрямовані на визначення конкретного методу підгонки, який слід використовувати для отримання точної та гладкої підігнаної кривої. За допомогою підгонки кривої було виявлено значення пікової частоти та/або діапазон пікових частот для розрізнення кожної швидкості потоку.

У першій частині було обговорено кілька способів аналізу вихідних даних у частотній області, таких як середнє значення та стандартне відхилення в певному діапазоні частот. Висновок полягав у тому, що перший великий пік амплітуди буде хорошим показником швидкості потоку, оскільки він буде стійким незалежно від різних середовищ.

Вирішивши, яке значення буде критичним, було порівняно два основні методи підгонки: модель Гауса та поліноміальна модель. Аналізуючи підібрані криві, поліноміальна модель виявилася кращою. Модель Гауса могла б допомогти краще пояснити теоретичне підґрунтя експериментів, але вона не дала гладкої та надійної кривої. Поліноміальна модель могла забезпечити кращу відповідність вихідній кривій, і вона давала відмінне значення для різних витрат. У цій ситуації поліноміальна модель 9-го порядку була обрана для аналізу частотного діапазону 0-2500 Гц як основного методу для визначення швидкості потоку.

Наприкінці цієї частини було обговорено та перевірено за законом Строка вплив відстані до сопла. Чим ближче був розташований датчик, тим вище пікова частота; таким чином, у майбутніх аналізах має бути зазначено точне місце розташування.

Попередні випробування та результати, представлені в цьому дослідженні, були зосереджені на одному наконечнику сопла, зокрема наконечнику сопла MR 80-04 Combo-Jet виробництва Wilger, Inc., Лексінгтон, штат Теннесі. Аналіз акустичного сигналу показав хорошу стабільність для вказівки швидкості потоку через сопло.

Таким чином, судячи з результатів, методи, використані в попередніх розділах, спрацювали для інших наконечників сопел, що означає, що існує певна кореляція частотної характеристики зі швидкістю потоку на певній відстані. Для різних типів наконечників існуватимуть різні рівняння підгонки.

РОЗДІЛ V. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Охорона праці

Звернення до сільськогосподарського сектора за допомогою служб безпеки та гігієни праці та спеціальних служб професійної медицини є дуже важливим через той факт, що більшість людей у цьому секторі, наприклад, у Румунії (78%) працюють у мікрокомпаніях. Вони, з одного боку, не витрачають багато часу на пошук інформації та послуг з БГП, а з іншого боку, їх важко охопити національними програмами (60% людей, які працюють у сільському господарстві, є самозайнятими – більшість часу виконують усі види робіт) (Sud Muntenia, 2013) Іншою важливою причиною є той факт, що люди, які працюють у різних підсекторах сільського господарства, піддаються різним професійним ризикам, іноді не знаючи про наслідки та профілактичні заходи, які вони повинні застосовувати. Приклади включають ризики навколишнього середовища (порошок, вібрація, високі/низькі температури, пряме сонячне світло, високий рівень шуму тощо), ризики, пов'язані з поставою, біологічні та хімічні ризики (пестициди, інсектициди, вакцинація, розпилена або ін'єкційна тощо). Результати різних опитувань (наприклад, Sud Muntenia. 2013) показують, що все ще є значні можливості для підвищення обізнаності про необхідність використання засобів індивідуального захисту та інших профілактичних заходів, особливо для працівників з тимчасовими контрактами, на низькокваліфікованих роботах або з низьким рівнем освіти. враховуючи те, що в цьому розділі наведено короткий опис дванадцяти підсекторів сільського господарства, визначених NACE, для кожного з яких включені деякі загальні дані, пов'язані з робочими процесами та часом, а також обладнання/інструменти, що використовуються для цих операцій, практики та/або речовини, що використовуються

Навпаки, у деяких сільськогосподарських операціях (екстенсивне/інтенсивне сільське господарство) і з огляду на специфіку завдань робоча сила є високоосвіченою (наприклад, персонал аквакультури навчається правилам і процедурам охорони здоров'я та техніки безпеки, оскільки нездатність належним чином керувати операціями може призвести до економічних втрат) або навіть

потрібно бути дуже кваліфікованою людиною (наприклад, механізовані, автоматизовані, комп'ютеризовані ферми). Існують також підгалузі, у яких люди потребують лише навчання на робочому місці – як у випадку з шовківництвом чи бджільництвом (люди іноді відвідують навчальні курси, організовані місцевими Agricultural Advisers), або на свино- чи вівчарських фермах, де люди навчаються виконувати різноманітні прості завдання та можуть отримувати добрі результати. Як правило, це означає, що традиційні цикли виробництва та ведення сільського господарства базуються на довших виробничих циклах і на людях, які, як правило, навчені робота, тоді як для інтенсивного сільського господарства, яке передбачає короткі цикли та механізовані та автоматизовані процеси, ймовірно, буде більш високоосвічений та навчений персонал.

5.2 Екологічна експертиза

Інтенсивне сільськогосподарське виробництво тісно пов'язане із застосуванням засобів захисту рослин, а також використанням польових обприскувачів. При застосуванні інтенсивних технологій посіви обробляють пестицидами кілька разів за вегетаційний період. Усі хімічні засоби, що застосовуються для захисту рослин, більшою чи меншою мірою небезпечні для здоров'я людини та навколишнього середовища. Особливо небезпечним є використання неперевіраних і несправних польових обприскувачів, недотримання встановлених норм пестицидів, агротехнічних строків обробки, а також неправильне регулювання обприскувачів.

Стандарт ISO 14001 визначає основні заходи щодо створення та підтримки системи екологічного менеджменту. У дослідженні використано систему контролю для польових обприскувачів на основі даного стандарту. Система контролю включає технічні та організаційні заходи, що впливають на забруднення навколишнього середовища та здоров'я людини. Ця система включає аналіз факторів, планування, регулярну перевірку польових обприскувачів, навчання обслуговуючого персоналу та коригувальних заходів. Під час експлуатації польових обприскувачів необхідно стежити за локальним забрудненням атмосфери, ґрунту та води, що в свою чергу сприяє заглушенню сільськогосподарських культур і продукції тваринництва.

Рівні екологічного ризику включають накопичення пестицидів у навколишньому середовищі, а також екологічний ризик, пов'язаний із збільшенням захворюваності людини та зникненням окремих видів рослин і тварин. Запропонована система контролю польових обприскувачів може слугувати основою для розробки та впровадження системи періодичних перевірок польових обприскувачів. Система управління навколишнім середовищем для польових обприскувачів сприятиме більш ефективному захисту людей і навколишнього середовища.

5.3 Економічна ефективність

Для аналізу проектів використовують номінальні грошові потоки, тобто грошові потоки, що коригуються на рівень інфляції. Прогнозні індекси інфляції визначаються ринковими дослідженнями та аналізом підприємства й надаються учасникам інвестиційного процесу для подальшого використання як частина припущень, що використовуються на етапі оцінки та планування. Використання будь-яких інших індексів інфляції не допускається.

Облік зміни вартості грошей у часі проводиться шляхом застосування дисконтуючого фактору до чистого потоку грошових коштів. Дисконтуючий фактор розраховується на основі середньозваженої вартості капіталу, що визначається ринковими дослідженнями та аналізом підприємства. Якщо реалізація проекту запланована лише за запозичені (кредитні) кошти з цільовою ознакою, як середньозважена вартість капіталу застосовується вартість кредитних коштів, які отримані під реалізацію даного проекту.

З точки зору виділення економічних ефектів запровадження системи контролю польових обприскувачів, то розрахунки було виконано за допомогою методу аналізу змін. Тобто у проекті враховуються тільки зміни, які вносить проект у показники діяльності бізнес-одиниці/підприємства у порівнянні з діяльністю бізнес-одиниці/підприємства без проекту. Інвестиційна оцінка відображає поступові віддачу від зміни, які вносить проект. Методом порівняння є одночасний аналіз двох варіантів: діяльність бізнес-одиниці/підприємства з проектом і без проекту.

Результатом проекту буде різниця результатів між двома варіантами. Із врахуванням чисельності парку обприскувачів середньостатистичного фермерського господарства та підвищення продуктивності роботи системи орошення, економічний ефект від впровадження запропонованого пристрою контролю розпилення може складати в середньому 120 тис. грн на рік на одному обприскувачі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

За допомогою підгонки кривої було виявлено значення пікової частоти та/або діапазон пікових частот для розрізнення кожної швидкості потоку.

У першій частині було обговорено кілька способів аналізу вихідних даних у частотній області, таких як середнє значення та стандартне відхилення в певному діапазоні частот. Висновок полягав у тому, що перший великий пік амплітуди буде хорошим показником швидкості потоку, оскільки він буде стійким незалежно від різних середовищ.

Вирішивши, яке значення буде критичним, було порівняно два основні методи підгонки: модель Гауса та поліноміальна модель. Аналізуючи підібрані криві, поліноміальна модель виявилася кращою. Модель Гауса могла б допомогти краще пояснити теоретичне підґрунтя експериментів, але вона не дала гладкої та надійної кривої. Поліноміальна модель могла забезпечити кращу відповідність вихідній кривій, і вона давала відмінне значення для різних витрат. У цій ситуації поліноміальна модель 9-го порядку була обрана для аналізу частотного діапазону 0-2500 Гц як основного методу для визначення швидкості потоку.

Наприкінці цієї частини було обговорено та перевірено за законом Строка вплив відстані до сопла. Чим ближче був розташований датчик, тим вище пікова частота; таким чином, у майбутніх аналізах має бути зазначено точне місце розташування.

У цьому розділі одним мікрофоном було перевірено три потенційні місця. Для першого, який був близько до поверхні сопла, результати показали, що не було очевидного показника швидкості потоку, що спостерігався за допомогою аналізу частотної характеристики, і було занадто багато шуму, особливо високочастотного. Друге місце виявилось більш перспективним як місце для тестування, оскільки воно має різні характеристики для кожної швидкості потоку, але якщо його протримати там певний період, воно буде зволене краплями води. Після висихання мікрофона спостерігається та ж тенденція, що й раніше. Якщо мікрофон використовуватиметься в цьому місці, потрібно буде вжити інших заходів захисту, щоб зберегти мікрофон сухим. Нарешті, було обговорено розташування поблизу

вихідного отвору наконечника сопла. Він показав дуже хороші характеристики в кожному аналізованому аспекті.

Крива АЧХ зсувалася і зростала зі збільшенням швидкості потоку. Стандартне відхилення та середня звукова потужність показали майже лінійну залежність від швидкості потоку в діапазоні низьких частот. Результат показав, що датчик не був мокрим після періоду випробувань. Тож це положення було б гарним місцем для утримання мікрофона. Тому для подальших експериментів було обрано місце С.