

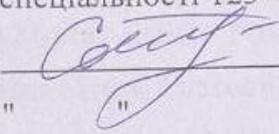
Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії  
Кафедра обчислювальної техніки

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

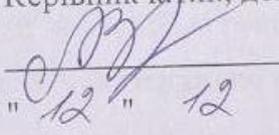
на тему:

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОБРОБКИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ В  
БАГАТОКАНАЛЬНІЙ АНАЛОГОВО-ЦИФРОВІЙ СИСТЕМІ

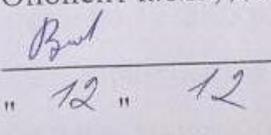
Виконав студент 2 курсу, групи 2КІ-24м  
спеціальності 123 — Комп'ютерна інженерія

  
Софіна О.А.  
" " 2025 р.

Керівник к.т.н., доц. каф. ОТ

  
Крупельницький Л.В.  
" 12 " 12 2025 р.

Опонент к.т.н., доц.каф ПЗ

  
Войтко В.В.  
" 12 " 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ОТ

  
д.т.н., проф. Азаров О.Д.  
" 16 " грудня 2025 р.

ВНТУ 2025

# ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії

Кафедра обчислювальної техніки

Рівень вищої освіти II-й (магістерський)

Галузь знань 12 — Інформаційні технології

Спеціальність 123 — «Комп'ютерна інженерія»

Освітня програма — «Комп'ютерна інженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ОТ

д.т.н., професор Азаров О.Д.

«25» 09 2025 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

студенту Софіїн Олександру Анатолійовичу

1 Тема роботи «Методи та засоби обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі» керівник роботи Крупельницький Леонід Віталійович, к.т.н., доц. каф. ОТ, затверджено наказом вищого навчального закладу від 24.09.2025 року № 313.

2 Строк подання студентом роботи 04.12.2025 р.

3 Вихідні дані до роботи: дані, що отримуються в результаті аудіо локації.

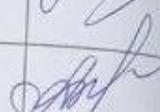
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, теоретичні основи обробки акустичних сигналів, аналіз технології обробки низькочастотних звукових сигналів, розробка програмного модуля, експериментальні дослідження та тестування, розрахунок економічної доцільності створення програмного модуля для обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): структурна схема АЦ-системи аудіолокації та ідентифікації об'єктів на місцевості,

зовнішній вигляд АЦ-системи портативного варіанту, зовнішній вигляд системи стаціонарного варіанту.

6 Консультанти розділів роботи представлені в таблиці 1.

Таблиця 1— Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	Крупельницький Леонід Віталійович, к.т.н., доц., доцент кафедри ОТ	25.09.2025	
5	Адлер Оксана Олександрівна, к.т.н., доц., доцент кафедри ЕПВМ	25.09.2025	
Нормоконтроль	Швець Сергій Ілліч, асистент кафедри ОТ	25.09.2025	

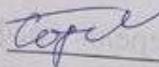
7 Дата видачі завдання 25.09.2025 р.

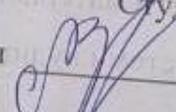
8 Календарний план виконання МКР приведений в таблиці 2.

Таблиця 2—Календарний план

№	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Підпис
1	Аналіз методів та засобів виявлення та розпізнавання звукових об'єктів	01.10.2025	
2	Аналіз технології обробки низькочастотних звукових сигналів	14.10.2025	
3	Експериментальні дослідження та тестування	16.11.2025	
4	Економічна частина	26.11.2025	
5	Попередній захист роботи	11.11.2025	
6	Оформлення пояснювальної записки і презентації	01.12.2025	
7	Перевірка якості виконання магістерської кваліфікаційної роботи та усунення недоліків	03.12.2025	
8	Захист МКР	16.12.2025	

Керівник роботи

Студент  Олег СОФІЙ

 Леонід КРУПЕЛЬНИЦЬКИЙ

## АНОТАЦІЯ

УДК 004.3

Софина О.А. Методи та засоби обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 123 — Комп'ютерна інженерія, Вінниця: ВНТУ, 2025. 106 с.

На укр. Мові. Бібліогр. 25 назв; рис.: 29; табл. 6.

У роботі розглянуто методи та засоби обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі. Проведено дослідження принципів акустичної локації та розпізнавання об'єктів. Розглянуто принципи роботи та структури багатоканальних систем, що використовують мікрофонні решітки для реєстрації й обробки акустичних сигналів.

Ключові слова: багатоканальні аналогово-цифрові системи, акустичні поверхні, мікрофонна решітка, низькочастотний сигнал, обробка акустичних даних.

## ABSTRACT

УДК 004.3

Sofyna O.A. Methods and means of processing acoustic signals in a multichannel analog-digital system. Master's qualification work in the specialty 123 —Computer Engineering, Vinnytsia: VNTU, 2025. 106 p.

In Ukrainian. Language. Bibliography. 25 titles; Fig.: 29; Table. 6.

The work considers methods and means of processing acoustic signals in a multichannel analog-digital system. The principles of acoustic location and object recognition are studied. The principles of operation and structure of multichannel systems that use microphone arrays for recording and processing acoustic signals are considered.

Keywords: multichannel analog-digital systems, acoustic surfaces, microphone array, low-frequency signal, acoustic data processing.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
<b>1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЗАДАЧ, МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ОБРОБКИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ</b> .....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
1.1 Огляд засобів обробки сигналів.....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
1.2 Принципи функціонування акустичних мікрофонних решіток .....	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
1.3 Часові та частотні характеристики звукових сигналів.....	24
1.4 Особливості обробки сигналів в акустичних решітках.....	30
<b>2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ ПРИ БАГАТОКАНАЛЬНІЙ ОБРОБЦІ В СИСТЕМІ МІКРОФОННОЇ РЕШІТКИ</b> .....	<b>33</b>
2.1 Огляд аналогово-цифрових систем .....	33
2.2 Структура багатоканальних систем .....	36
2.3 Цифрова обробка сигналу .....	50
<b>3 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОБРОБКИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ СИСТЕМАХ</b> .....	<b>55</b>
3.1 Поєднання систем обробки сигналів та багатоканальних систем .....	55
3.2 Специфікація акустичного обладнання .....	67
3.3 Алгоритмічні підходи до аналізу та ідентифікації акустичних даних .....	69
3.4 Взаємодія з користувачем .....	75
<b>4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТИ</b> .....	<b>76</b>
4.1 Вибір апаратного забезпечення .....	76
4.2 Вибір програмного забезпечення .....	78
4.3 Аналіз результатів.....	79
<b>5 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОБРАХУНКУ АКУСТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ В БАГАТОКАНАЛЬНІЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВІЙ СИСТЕМІ</b> .....	<b>83</b>

5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі.....	83
5.2 Розрахунок витрат на здійснення розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі ..	<b>Помилка!</b>
<b>Закладку не визначено.</b>	
5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі за її можливої комерціалізації потенційним інвесторам.....	91
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>Помилка! Закладку не визначено.</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>98</b>
<b>ДОДАТОК А</b> Технічне завдання.....	100
<b>ДОДАТОК Б</b> Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....	105
<b>ДОДАТОК В</b> Схема АЦ-системи аудіолокації та ідентифікації об'єктів на місцевості .....	103
<b>ДОДАТОК Г</b> Зовнішній вигляд АЦ-системи портативного варіанту.....	107
<b>ДОДАТОК Д</b> Зовнішній вигляд АЦ-системи стаціонарного варіанту.....	108

## ВСТУП

**Актуальність дослідження** полягає в тому, що обробка акустичних сигналів є однією з ключових технологічних складових сучасних інформаційно-вимірювальних систем і визначає їхню точність, швидкодію та функціональні можливості.

Вона охоплює широкий спектр застосувань — від медичних діагностичних приладів і систем контролю промислових процесів до розробки інтелектуальних сенсорних мереж і акустичної аналітики. Багатоканальні аналогово-цифрові системи (БКАЦС) забезпечують можливість одночасної реєстрації сигналів із багатьох джерел, що дозволяє підвищити точність, швидкодію та інформативність результатів обробки.

Завдяки розвитку обчислювальної техніки та цифрових алгоритмів аналізу, акустична обробка перетворилася на потужний інструмент дослідження та моделювання звукових полів. Актуальність теми визначається потребою в удосконаленні методів збору та цифрової інтерпретації акустичної інформації, що є основою для створення нових інтелектуальних систем аналізу сигналів. Подібні системи знаходять застосування у сфері промислової діагностики, безконтактному моніторингу стану обладнання, медицині, оборонних технологіях, транспорті та навіть у побутових пристроях з розпізнаванням звуку.

Метою дослідження є визначення, дослідження та вдосконалення методів і засобів обробки акустичних сигналів у багатоканальних аналогово-цифрових системах, а також оцінка їхнього потенціалу в сучасному технологічному середовищі.

Обробка акустичних сигналів передбачає використання звукових хвиль для отримання та аналізу інформації про властивості середовища або об'єктів. Такий підхід дозволяє визначати параметри просторового розподілу звуку, виявляти зміни у фізичних структурах, контролювати технічні процеси чи відстежувати об'єкти у навколишньому просторі. У цьому контексті БКАЦС виступають ключовим елементом, оскільки здатні одночасно фіксувати та обробляти велику кількість сигналів, що надходять з різних мікрофонів чи сенсорів.

Використання багатоканальних систем дозволяє досягти високої точності просторового аналізу звуку, здійснювати адаптивну фільтрацію шумів і підвищувати ефективність роботи алгоритмів розпізнавання. Це створює передумови для розвитку інтелектуальних систем, здатних не лише аналізувати акустичне середовище, а й автоматично реагувати на зміни у ньому.

Розвиток технологій обробки акустичних сигналів у багатоканальних системах є важливим етапом цифрової трансформації. Сучасні інженери прагнуть створити гнучкі системи, які можуть адаптуватися до різних умов роботи, забезпечувати реальний час обробки та високу точність визначення параметрів сигналів [1].

У цьому контексті дана робота має на меті спробувати зробити внесок у вдосконалення процесів збору, фільтрації та аналізу звукових сигналів у багатоканальних аналогово-цифрових системах. Отримані результати можуть бути використані в інженерних розробках, системах акустичного моніторингу, інтелектуальних пристроях, а також у галузі безпеки та автоматизації.

**Об'єктом дослідження** є багатоканальні аналогово-цифрові системи та їх здатність здійснювати реєстрацію й обробку акустичних сигналів у реальному часі.

**Предмет дослідження** — засоби та методи аналізу, фільтрації й цифрової обробки звукових даних у багатоканальних аналогово-цифрових системах, включаючи технічне забезпечення, алгоритмічні підходи, способи взаємодії з користувачем та програмні рішення для їх реалізації.

**Метою роботи** є проведення дослідження методів та засобів обробки акустичних сигналів у багатоканальних аналогово-цифрових системах, а також оцінка їх ефективності, точності та можливостей застосування в різних галузях техніки.

Для досягнення цієї роботи потрібно виконати такі **завдання**:

— визначення науково-технічної задачі, пов'язану з ефективною обробкою акустичних сигналів і шляхи її вирішення;

— дослідження теоретичних основ процесів формування, реєстрації та цифрової обробки акустичних сигналів;

- дослідження структури багатоканальних аналогово-цифрових систем, їх архітектури та особливостей цифрової обробки сигналів;
- визначення методів та засобів обробки, а також алгоритмів аналізу акустичних даних у БКАЦС;
- практична реалізація програмного модуля для обробки акустичних сигналів з урахуванням особливостей багатоканальної структури системи;
- проведення тестування програмного модуля, оцінення його ефективності і стабільності роботи;
- визначення розрахунку економічної доцільності впровадження розробленого рішення, рекомендації щодо його практичного використання.

**Методом дослідження** є аналітичний підхід до опрацювання теоретичної основи, експериментальні методи для перевірки ефективності алгоритмів, метод моделювання для відтворення процесів обробки сигналів, а також метод цифрової фільтрації для усунення шумів і покращення точності результатів.

**Новизна** — отримані результати дають можливість запропонувати ефективні способи поєднання методів цифрової обробки звуку з багатоканальними аналогово-цифровими системами. Це дозволяє підвищити точність аналізу, оптимізувати процеси фільтрації та автоматизувати оцінку параметрів акустичного середовища. Крім того, розроблені підходи можуть стати основою для побудови інтелектуальних систем контролю та моніторингу.

**Практичне значення роботи:** результати дослідження спрямовані на вдосконалення алгоритмів обробки акустичних сигналів, покращення ефективності взаємодії користувача з системою та розробку нових підходів до побудови адаптивних багатоканальних структур. Запропоновані рішення можуть бути використані в системах медичної діагностики, промислової акустики, робототехніки, системах безпеки та технічного моніторингу. Крім того, результати дослідження можуть стати підґрунтям для подальших наукових робіт у сфері цифрової обробки сигналів і штучного інтелекту.

**Апробація** результатів магістерської роботи: зроблено доповідь на Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026).

За результати магістерської роботи **опубліковано** 1 тезу доповіді : Методи та засоби обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі / О. А. Софіна, Л. В. Крупельницький // Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026). Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/schedConf/presentations?searchField=&searchMatch=&search=&track=1026>

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЗАДАЧ, МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ОБРОБКИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ

## 1.1 Огляд засобів обробки сигналів

Станом на сьогодні багато завдань сучасної промисловості, медицини, охорони довкілля, енергетики та оборони держави пов'язані з необхідністю високоточного моніторингу процесів, що базуються на використанні технічних засобів багатоканального збору й обробки низькочастотних акустичних сигналів. Такі системи дозволяють виявляти зміни у фізичних середовищах, діагностувати технічні об'єкти або проводити структурний аналіз за звуковими характеристиками. Прямих вітчизняних аналогів комплексних рішень у цій сфері наразі не існує. Доступна інформація про зарубіжні розробки є фрагментарною, часто конфіденційною або поверхневою, що ускладнює вивчення їхніх технічних принципів, архітектури, параметрів і алгоритмічних рішень.

Разом із тим, розвиток технологій збору акустичних даних у світі демонструє тенденцію до підвищення інтеграції апаратних і програмних засобів. Зростає попит на системи, які здатні не лише збирати дані, а й у реальному часі інтерпретувати їх для прийняття рішень. Це вимагає вдосконалення як алгоритмів цифрової обробки сигналів, так і засобів їх апаратної реалізації [2].

Незважаючи на відсутність прямих вітчизняних аналогів, українські науковці накопичили значний досвід у суміжних напрямках — зокрема, в радіотехніці, гідроакустичних дослідженнях, обробці зображень і математичному моделюванні фізичних процесів. Результати цих робіт створюють міцне підґрунтя для подальшого розвитку акустичних систем нового покоління.

Сучасні дослідники активно працюють над поєднанням принципів із різних областей акустики, цифрової обробки сигналів, мікроелектроніки та інтелектуальних обчислень. Завдяки цьому формується нове покоління апаратно-програмних рішень, здатних забезпечувати синхронну обробку великих обсягів звукової інформації з високою точністю. Розробка таких систем потребує комплексного підходу, де враховуються як фізичні процеси поширення звуку, так і математичні моделі його відтворення та аналізу.

У практиці промислового і наукового використання активно впроваджуються АЦП на комутованих конденсаторах з ваговою надлишковістю, оскільки вони мають низьке енергоспоживання, високий коефіцієнт корисної дії та добру сумісність із цифровими КМОН-технологіями. Такі перетворювачі забезпечують стабільну роботу навіть у складних умовах експлуатації, що робить їх перспективними для акустичних систем моніторингу та контролю.

Однак зі зростанням кількості каналів виникає потреба у вдосконаленні процесів калібрування та коригування параметрів. Одним із напрямів підвищення стабільності вимірювальних каналів є впровадження методів самокалібрування та самокорекції характеристик підсилювачів і перетворювачів. Це дає можливість компенсувати вплив випадкових відхилень, зменшити похибки та забезпечити ідентичність характеристик каналів.

Такі системи набувають особливого значення у галузях, де необхідна тривала безперервна робота без ручного втручання, наприклад, у морських гідроакустичних комплексах, безпілотних робототехнічних системах або системах медичної діагностики. Для цього розробляються алгоритми автоматичного визначення відхилень параметрів у реальному часі з подальшим цифровим коригуванням.

Під час проектування багатоканальних аналогово-цифрових систем значну роль відіграє архітектура вимірювальних трактів, що включає приймально-підсилювальні каскади, АЦП, системи синхронізації та модулі цифрової обробки. У сучасних схемотехнічних рішеннях усе частіше застосовується струмовий принцип підсилення, який характеризується низькою чутливістю до зовнішніх завад, високою лінійністю амплітудно-фазових характеристик та швидким відгуком системи.

Завдяки цьому досягається не лише стабільність амплітудно-частотних характеристик, але й зменшення часових затримок між каналами, що критично важливо для коректного порівняння сигналів. Висока точність синхронізації відкриває можливість використовувати такі системи для просторового аналізу акустичних подій і тривимірного моделювання звукового середовища.

Суттєву увагу дослідники приділяють також питанням оптимізації алгоритмів цифрової обробки сигналів. Класичні підходи часто не забезпечують необхідної продуктивності для роботи в режимі реального часу через обмеженість обчислювальних ресурсів. Тому розробляються паралельні та багатооперандні методи обчислення, які використовують властивості сучасних багатоядерних процесорів і графічних прискорювачів.

Важливою складовою є розробка методів інтелектуальної обробки, які дозволяють автоматично виявляти події або зміни у звуковому потоці без участі оператора. Це забезпечує можливість створення самонавчальних систем, здатних адаптувати свої алгоритми під конкретне акустичне середовище.

Ще одним напрямом розвитку є використання алгоритмів нечіткої логіки та штучного інтелекту для розпізнавання акустичних образів. Обернене логічне виведення, що базується на розв'язанні систем нечітких рівнянь, дозволяє ідентифікувати джерела сигналів навіть за наявності шумів чи перешкод. Нові підходи, що використовують нейронечіткі структури, поєднують здатність до навчання нейронних мереж із логічною інтерпретованістю нечітких правил.

У галузі розпізнавання звукових подій і сцен накопичено великий досвід закордонних досліджень. Вони активно використовують мел-частотні спектральні коефіцієнти, приховані Марківські моделі, нейромережеві структури та гібридні архітектури на основі Gaussian Mixture Models. Такі рішення ефективні для обробки великих масивів даних у режимі потокового моніторингу, що особливо актуально для систем безпеки, промислової діагностики та технологій «розумного міста».

Застосування глибоких нейронних мереж для аналізу акустичних сигналів дозволяє досягати високої точності класифікації навіть за складних умов, коли сигнали мають низьке співвідношення сигнал/шум. Цей підхід відкриває перспективи для створення інтелектуальних сенсорних систем нового покоління.

Сучасні тенденції розвитку акустичних систем зосереджуються на створенні адаптивних модулів, здатних автоматично підлаштовуватися під зовнішні умови. Для цього використовуються алгоритми адаптивної фільтрації,

машинного навчання та динамічної корекції фазових параметрів. Подібні системи стають основою нових підходів до аналізу акустичного середовища.

Крім того, розвивається напрям моделювання віртуальних акустичних середовищ для тестування систем у різних умовах. Це дозволяє дослідникам перевіряти стійкість алгоритмів без створення реальних прототипів, що скорочує час і вартість розробки.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету дослідження та комплекс завдань, спрямованих на вдосконалення методів і засобів цифрової обробки акустичних сигналів у багатоканальних аналогово-цифрових системах.

Метою роботи є підвищення точності, ефективності та надійності обробки низькочастотних акустичних сигналів шляхом удосконалення моделей, методів і апаратно-програмних засобів багатоканальних систем. Це передбачає розробку структурних схем, алгоритмів синхронної обробки та модулів адаптивного калібрування для покращення лінійності та стабільності системи.

Окремим завданням є створення узагальненої архітектури, що може масштабуватися залежно від кількості каналів, типів сенсорів і цільового застосування. Такий підхід дозволяє гнучко адаптувати систему до потреб конкретної галузі — від медичних приладів до військових комплексів пасивного акустичного моніторингу.

Завдання дослідження:

- розробити узагальнену модель багатоканальної системи збору й обробки низькочастотних сигналів;
- сформулювати технічні вимоги до її архітектури та функціональних модулів;
- провести аналіз структурних рішень у частині підсилення, фільтрації та аналогово-цифрового перетворення сигналів;
- дослідити вплив неідентичності вимірювальних каналів на точність перетворення;
- розробити методи автоматичного калібрування та цифрової компенсації похибок;

- побудувати схеми високоточних аналого-цифрових перетворювачів із надлишковими ваговими системами;
- розробити ефективні алгоритми визначення відхилень параметрів каналів у процесі роботи системи;
- запропонувати способи підвищення роздільної здатності та точності визначення характеристик сигналів;
- створити програмний модуль для симуляції та аналізу багатоканальної обробки даних;
- провести експериментальну перевірку запропонованих алгоритмів на тестових наборах сигналів;
- оптимізувати програмне забезпечення системи для роботи в режимі реального часу;
- запропонувати рекомендації щодо промислової реалізації та подальшого розвитку системи.

Для реалізації зазначених завдань використовується комплексний підхід, що поєднує методи цифрової обробки сигналів, математичного моделювання, теорії фільтрації та машинного навчання. Особлива увага приділяється адаптивним алгоритмам самокорекції вимірювальних каналів, які дозволяють автоматично компенсувати зміни параметрів під впливом зовнішніх чинників.

Таким чином, представлена робота спрямована на формування нової концепції обробки акустичних сигналів у багатоканальних аналогово-цифрових системах, що об'єднує інженерні, алгоритмічні та програмні рішення в єдину інтегровану систему аналізу звуку.

## 1.2 Принципи функціонування акустичних мікрофонних решіток

Акустичні мікрофонні решітки функціонують на основі узгодженої роботи множини просторово розташованих мікрофонів, які одночасно реєструють звуковий тиск у різних точках простору. Ключовим принципом є використання часових затримок приходу акустичної хвилі до кожного мікрофона: звук досягає сенсорів у різні моменти, залежно від геометрії решітки та напрямку поширення

хвилі. Ці міжмікрофонні затримки дозволяють обчислити кут приходу звуку та сформувати просторову діаграму спрямованості. На цій основі застосовується технологія променеформування, що підсилює сигнали з певного напрямку і пригнічує завади, забезпечуючи вибірково чутливість системи.

Для досягнення високої точності всі мікрофонні канали повинні мати узгоджені частотні та фазові характеристики. Попередня цифрова обробка включає фільтрацію, компенсацію апаратних похибок та нормалізацію сигналів. Принцип роботи передбачає створення математичної моделі хвильового фронту, яка дозволяє реконструювати акустичне поле та визначати координати одного або кількох джерел. Кореляційний аналіз між каналами використовується для визначення точних часових зсувів, що безпосередньо пов'язані з напрямком приходу хвилі. У складніших реалізаціях застосовуються адаптивні фільтри, які автоматично налаштовують вагові коефіцієнти променеформувача, забезпечуючи стійке пригнічення шумів та змінних завад [3].

Мікрофонна решітка працює з дискретизованими цифровими даними, що обробляються у реальному часі із застосуванням спектрального аналізу, FFT та параметричних методів. Це дає змогу будувати двовимірні або тривимірні акустичні карти, відстежувати рухомі об'єкти та формувати акустичні зображення сцени. Точність локалізації значною мірою залежить від калібрування геометричних та фазових параметрів решітки. Сукупність цих принципів забезпечує високоточне визначення положення джерел звуку, ефективно просторове розділення сигналів та створення детальних акустичних карт у багатоканальних аналогово-цифрових системах.

Сучасні інноваційні підходи до розпізнавання акустичних сцен та подій ґрунтуються на використанні EM-алгоритму для розділення Гаусових сумішей із врахуванням специфіки одночасного опрацювання декількох сигналів. Цей алгоритм є одним із найефективніших статистичних методів оптимізації, який дозволяє ітераційно оцінювати параметри моделей і поступово покращувати точність класифікації акустичних подій. Його перевагою є здатність до адаптації

при роботі з неповними або зашумленими даними, що особливо важливо у випадках, коли сигнали мають низьке співвідношення сигнал/шум.

Попереднє виділення корисних компонентів із шумового фону здійснюється на основі методів цифрової фільтрації, спектрального аналізу та часово-частотного перетворення. У процесі обробки сигналів використовуються адаптивні фільтри, які автоматично змінюють свої параметри залежно від динаміки вхідних даних. Такі підходи базуються на результатах, отриманих у системах візуальної діагностики та акустичного моніторингу, де багатоканальні вимірювання дозволяють підвищити достовірність і стійкість до завад.

Особливу роль відіграє узгоджене поєднання методів обробки сигналів і алгоритмів машинного навчання. Синтез традиційних статистичних моделей, таких як Gaussian Mixture Models, із нейронними мережами дає змогу підвищити точність класифікації за рахунок нелінійного відображення ознак. Це поєднання забезпечує глибше розуміння структури звукових подій і дозволяє виділяти ключові характеристики навіть у складних акустичних середовищах.

У даній роботі вдосконалено відомий метод кластеризації на основі EM-алгоритму, що дає змогу підвищити точність визначення параметрів багатовимірних моделей. Запропоновано новий метод адаптивного формування словника ознак, у якому враховуються особливості акустичного середовища, атмосферні умови та геометрія розташування мікрофонів. Такий підхід забезпечує гнучке оновлення бази ознак залежно від контексту середовища, що підвищує точність розпізнавання сигналів у змінних умовах.

Крім того, запропонований підхід враховує часову динаміку сигналів, що дозволяє не лише класифікувати звукові події, але й відстежувати їхню послідовність. Наприклад, це може бути корисним у системах моніторингу промислових процесів, де важливо не просто визначити факт промислових процесів, де важливо не просто визначити факт виникнення звукової події, а й проаналізувати її розвиток у часі.

Розроблені алгоритми розпізнавання інтегруються у програмне забезпечення багатоканальних аналогово-цифрових систем, що забезпечує їх практичну

реалізацію. Такий підхід дозволяє створювати розподілені системи збору та аналізу даних, які здатні працювати в режимі реального часу. Застосування цих алгоритмів дає змогу значно зменшити обсяг даних для зберігання та передавання, оскільки аналіз виконується безпосередньо під час запису сигналів.

Заплановані у роботі методи та їх реалізація відкривають нові можливості для створення структурно й алгоритмічно оптимізованих апаратно-програмних рішень для багатоканальних аналогово-цифрових систем моніторингу та обробки низькочастотних акустичних сигналів. У цих системах поєднуються підходи з таких галузей, як струмове підсилення, самокориговане аналого-цифрове перетворення, паралельна цифрова обробка, виділення акустичних і візуальних образів, нечітка логіка та нейромережеві технології.

Додатково у дослідженні розглядаються питання взаємодії алгоритмів обробки сигналів із апаратним забезпеченням, зокрема з цифровими мікроконтролерами, які виконують попередню обробку та синхронізацію даних. Така інтеграція дозволяє скоротити затримки обробки та покращити енергоефективність системи.

Унікальність запропонованих підходів полягає у поєднанні авторських рішень і перевірених методів із суміжних галузей. Це створює теоретичну основу для формування нового методологічного базису та забезпечує практичну реалізацію у вигляді експериментальних зразків багатоканальних АЦ-систем. Результати можуть бути застосовані як у лабораторних дослідженнях, так і в реальних умовах експлуатації.

До багатоканальних аналогово-цифрових систем вимірювання та обробки низькочастотних сигналів можна віднести кілька основних типів:

- інформаційно-реєстраційні системи для моніторингу з цифровим записом і можливістю подальшої обробки сигналів у режимі постаналізу або в реальному часі;
- вимірювальні системи, що взаємодіють безпосередньо з об'єктами контролю й фіксують відгуки на зовнішні акустичні збурення;

- медико-діагностичні комплекси, призначені для аналізу біоакустичних сигналів, таких як серцеві шуми чи дихальні коливання;
- системи технічної діагностики, які використовуються для виявлення дефектів у механічних або електронних пристроях за допомогою акустичного аналізу;
- активні та пасивні акустичні системи ідентифікації джерел звуку, які застосовуються у сфері безпеки, транспорті, робототехніці чи екологічному моніторингу.

Використання багатоканальних систем дає змогу отримувати багатовимірне представлення акустичного середовища, що істотно підвищує інформативність аналізу. Це дозволяє визначати напрямки надходження сигналів, оцінювати характеристики середовища поширення та виявляти приховані закономірності у даних.

Таким чином, запропоновані методи формують основу для створення вискоелективних систем обробки акустичних сигналів, що поєднують точність, швидкодію та адаптивність. Їх упровадження у промислові та наукові комплекси забезпечить підвищення рівня автоматизації моніторингових процесів і сприятиме розвитку нових технологій аналізу звукового середовища.

Структурні схеми АЦ-систем вимірювання, які наведено на рис. 1.1, 1.2, 1.3 використовуються для роботи з даними: вимірювально-інформаційної багатоканальної системи, моніторингової системи збору та обробки даних, а також системи вимірювань із активним впливом на об'єкт дослідження. Кожна схема ілюструє послідовність проходження сигналів від датчиків або входу через підсилювачі, комутатори, аналого-цифрові перетворювачі та контролери до електронно-обчислювальної машини.

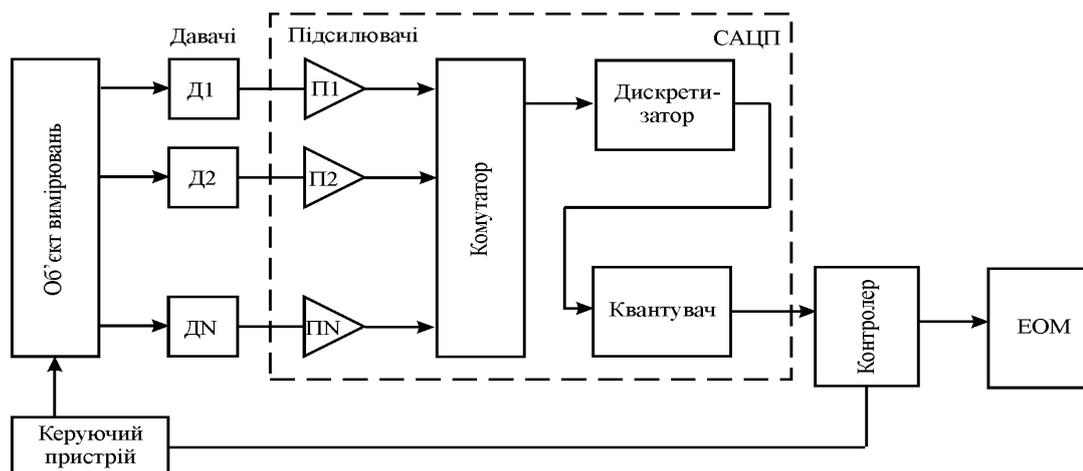


Рисунок 1.1 — Структура вимірювально-інформаційної багатоканальної системи

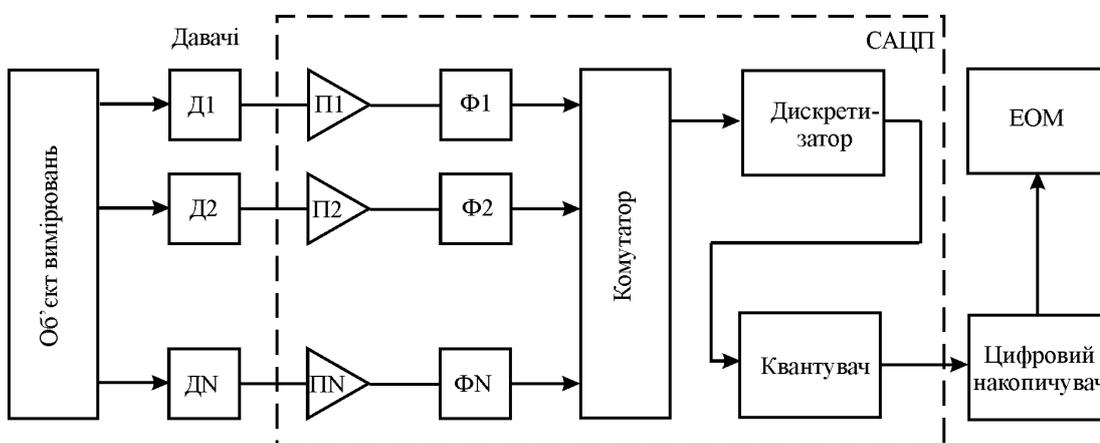


Рисунок 1.2 — Структура моніторингової системи збору та обробки даних

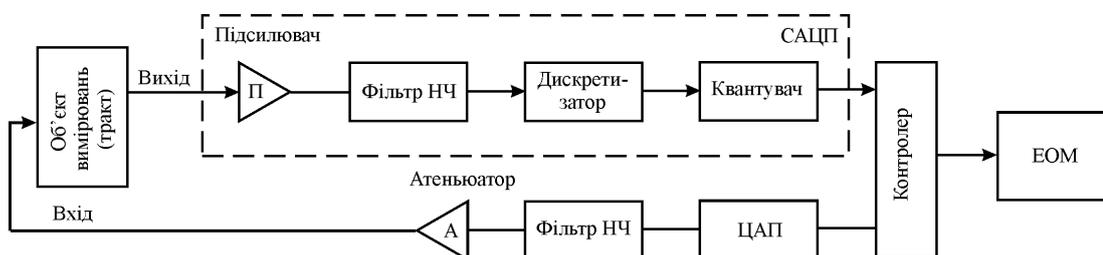


Рисунок 1.3 — Структура системи вимірювань із активним впливом на об'єкт дослідження

Вимірювальна складова у багатоканальних системах акустичної обробки включає такі основні елементи, як об'єкт вимірювання, сенсори фізичних величин,

підсилювачі нормалізації сигналів, фільтри низьких частот (ФНЧ), аналогові комутатори (АК), а також аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі (АЦП і ЦАП), контролери керування й інтерфейси для передавання даних до зовнішньої обчислювальної системи (ЕОМ). Усі ці компоненти утворюють єдину систему збору, перетворення та аналізу інформації, де кожен елемент впливає на точність кінцевого результату.

Сучасні вимірювальні комплекси передбачають високий рівень інтеграції апаратних і програмних модулів, що дозволяє забезпечити узгоджене функціонування сенсорних каналів і синхронне перетворення сигналів. У процесі розроблення таких систем особливу увагу приділяють стабільності метрологічних характеристик, температурній компенсації параметрів та адаптивному калібруванню.

Наведені АЦ-системи (рис. 1.1, 1.2, 1.3) насамперед поєднують спільні вимоги до точності, швидкодії та робочого частотного діапазону застосовуваних АЦП. Зазвичай розрядність вихідного двійкового коду таких перетворювачів становить від 16 до 24 бітів, що забезпечує високу роздільну здатність навіть для сигналів із малими амплітудами. Робочий діапазон частот зазвичай охоплює від 0 Гц до 100 кГц, що дає змогу обробляти як постійні, так і низькочастотні акустичні сигнали. Високоточне перетворення сигналів є критичним фактором для задач аудіоаналізу, акустичного моніторингу та дослідження інфразвукових процесів.

Розроблення АЦП та вимірювальних систем із такими характеристиками вважається одним із ключових напрямів сучасної електроніки як в Україні, так і за кордоном. Особливу увагу приділяють створенню пристроїв, здатних до самокалібрування та самокорекції, оскільки це дозволяє мінімізувати вплив похибок і зовнішніх факторів. Такі системи автоматично компенсують зміни характеристик елементів у процесі експлуатації, що підвищує стабільність вимірювань.

Слід зазначити, що до складу АЦ-систем входять також персональні комп'ютери або вбудовані контролери, які здійснюють управління процесом збору, обробки та відображення інформації. У межах сучасних комп'ютерно-керованих

систем АЦП і ЦАП повинні забезпечувати не лише високі метрологічні показники, але й такі системні властивості, як:

- сумісність з цифровими процесорами обробки даних;
- вбудовані механізми контролю працездатності;
- автоматичне калібрування метрологічних параметрів;
- можливість виконання попередньої цифрової обробки сигналу;
- уніфікованість структурних і конструктивних рішень аналогових та цифрових модулів;
- реалізація на базі великих і надвеликих інтегральних схем (ІС).

Варто підкреслити, що структурні рішення мають вирішальне значення для створення високоточних і стабільних АЦ-систем. Саме архітектура визначає рівень шумів, чутливість, швидкодію та точність перетворення. Сьогодні активно досліджуються нові методи цифрового калібрування, адаптивного фільтрування й алгоритми компенсації системних похибок.

Додатково розробляються методи математичного моделювання процесів обробки, що дозволяють прогнозувати поведінку системи на різних рівнях — від структурно-функціонального до конструктивного. Комплексне моделювання включає врахування впливу метрологічних параметрів, перехідних процесів і паразитних ємностей. Такі моделі дозволяють оцінювати загальну ефективність системи ще до її фізичної реалізації, що знижує витрати на розроблення і тестування.

Особливу увагу приділяють створенню моделей, які встановлюють зв'язок між метрологічними характеристиками окремих компонентів і загальною ефективністю АЦ-системи. Це дає змогу виявляти критичні елементи, що обмежують точність вимірювань, і оптимізувати конструкцію ще на етапі проектування. З огляду на специфіку роботи з низькочастотними сигналами, конструкція таких систем потребує високої стабільності в часі та температурної незалежності параметрів. Для цього застосовуються компенсуючі схеми, джерела опорної напруги з низьким дрейфом та термостабілізовані елементи. Це особливо

актуально для акустичних систем, де навіть незначні фазові або амплітудні спотворення можуть призвести до втрати достовірності результатів [4].

Під час проектування АЦ-систем для обробки низькочастотних сигналів виникає потреба не лише у високій точності, а й у забезпеченні стабільної взаємодії між аналоговими й цифровими вузлами. Для цього розробляються спеціальні інтерфейси синхронізації, що гарантують мінімальні часові зсуви між каналами. Одним із важливих завдань є оптимізація взаємодії між АЦП і цифровими процесорами для досягнення обробки сигналів у режимі реального часу.

Навіть за наявності на ринку високоточних імпортованих мікросхем АЦП і ЦАП, питання локальної адаптації залишається відкритим. Вітчизняні розробники прагнуть створити власні рішення, що враховують специфіку національної елементної бази, енергоспоживання та умов експлуатації. Такі розробки мають не лише наукову, а й стратегічну важливість для незалежності електронно-обчислювальної техніки.

Сучасні тенденції розвитку спрямовані на впровадження інтелектуальних систем керування АЦ-процесом, де штучний інтелект і машинне навчання використовуються для оптимізації параметрів калібрування та прогнозування похибок. Це дозволяє підвищити ефективність систем без збільшення складності їх апаратної частини.

### 1.3 Часові та частотні характеристики звукових сигналів

Часові та частотні характеристики звукових сигналів визначають їхню поведінку у часовій області та спектральному просторі, що дозволяє повноцінно описати структуру та властивості акустичних коливань. У часовій області сигнал представляють як зміну амплітуди звукової хвилі в кожен момент часу, що дає змогу оцінити його форму, тривалість, динаміку та рівень енергії. Часова характеристика дозволяє визначати імпульсні компоненти, перехідні процеси та моменти появи важливих подій у сигналі. Частотні характеристики описують, які частоти містяться у звуковому сигналі та з якою інтенсивністю вони представлені.

Для цього використовують перетворення Фур'є, що дозволяє перейти від часу до спектра [5].

У спектральній області сигнал розглядають як сукупність гармонічних складових, кожна з яких має власну частоту та амплітуду. Частотні характеристики необхідні для аналізу тембру, шумів, гармонік та резонансних явищ у сигналі. Важливим параметром є смуга частот, у якій сигнал має енергетично значущі компоненти. Поєднання часових та частотних характеристик дає можливість глибше розуміти природу звуку, забезпечує ефективну фільтрацію, виявлення об'єктів і розпізнавання акустичних подій у багатоканальних системах. Такий підхід лежить в основі сучасної обробки сигналів та є ключовим у побудові точних систем аналізу й моніторингу.

АЦ-система, призначена для локалізації звуку та ідентифікації об'єктів на місцевості, базується на принципах багатоканальної обробки низькочастотних акустичних сигналів, отриманих із мікрофонних решіток. Локалізація джерел звуку та дистанційне визначення їхніх характеристик є ключовими функціями таких систем, що широко застосовуються для автоматизованого контролю доступу, охорони територій, технічного моніторингу, а також у мультимедійних комплексах концертних залів, стадіонів і виставкових центрів.

Мікрофонна фазована решітка являє собою впорядкований масив сенсорів, які синхронно сприймають звукові хвилі з різних напрямків. Вона функціонує як просторово орієнтований приймач, що формує сигнал завдяки узгодженню фазових зсувів між каналами. Основний принцип роботи таких систем ґрунтується на цифровому сумуванні сигналів із введенням точних часових зсувів, що дозволяє фокусувати акустичну чутливість у заданому напрямку.

Отримані сигнали послідовно підсилюються у трактах низькочастотного підсилення, перетворюються в цифровий формат багатоканальними аналого-цифровими перетворювачами (АЦП) і передаються на обчислювальний модуль або персональний комп'ютер для подальшої обробки. У сучасних розробках такі системи часто оснащуються апаратними блоками попередньої фільтрації та

нейроподібними процесорами, що забезпечують обробку сигналів у реальному часі.

Після того як акустична хвиля досягає решітки, у вимірювальних каналах виникають часові затримки, зумовлені відстанню та напрямком до джерела звуку. Коригування цих затримок забезпечує можливість вибіркового прийому сигналів із певного просторового сектора, що є основою технології акустичного фокусування. Для усунення системних похибок застосовуються методи автоматичного калібрування каналів та компенсації фазових асиметрій [5].

Для досягнення максимальної точності положення кожного мікрофона калібрується за координатами та часовими характеристиками. Крім того, у системах такого типу реалізуються алгоритми компенсації фазових спотворень, адаптивної фільтрації та спектрального аналізу, які підвищують стійкість до шумів і фонових перешкод.

В останніх поколіннях АЦ-систем для локалізації звуку використовуються алгоритми машинного навчання, що здатні навчатися на прикладах реальних записів і розпізнавати акустичні події за характером спектральних ознак. Це значно підвищує ефективність виявлення сигналів у складних акустичних середовищах.

Розроблення інтелектуальних модулів локалізації дозволяє не лише визначати напрямок на джерело звуку, але й оцінювати відстань до нього за допомогою аналізу різниці часу прибуття сигналів (TDOA). У таких системах часто застосовується динамічна реконфігурація мікрофонних решіток, що дає можливість змінювати просторову орієнтацію чутливості в залежності від умов спостереження.

Для підвищення просторової роздільної здатності використовуються гібридні методи — поєднання кореляційних, спектральних і когерентних алгоритмів обробки, що дозволяють виявляти навіть слабкі джерела звуку в умовах високого рівня завад. Додатково реалізуються модулі оцінки достовірності сигналу, які відсіюють хибні виявлення, що особливо важливо для безпекових систем.

Таким чином, АЦ-система з мікрофонною решіткою виступає потужним інструментом просторової акустичної локалізації, здатним забезпечувати точне позиціонування, класифікацію та моніторинг звукових подій у реальному часі. Її використання створює передумови для формування інтегрованих систем технічного зору та слуху, що поєднують акустичні й візуальні сенсори для повного просторового аналізу середовища.

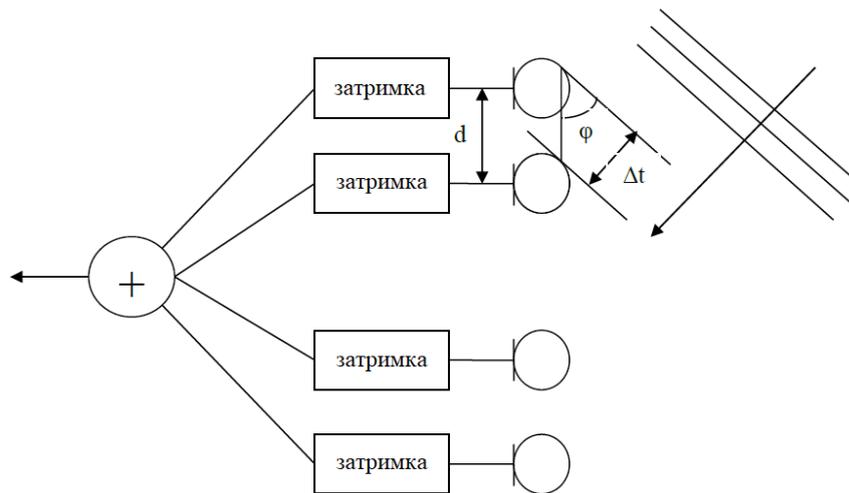


Рисунок 1.4 — Затримки сигналів для виділення напрямку на джерело звуку

Припустимо, що мікрофонна решітка (МР) складається з  $N$  приймальних елементів, розташованих на певній відстані  $d$  один від одного. У цьому випадку, щоб забезпечити спрямування основної пелюстки діаграми чутливості під заданим кутом  $\varphi$ , часовий зсув між сигналами сусідніх мікрофонів визначається як:

$$\Delta t = d \times \sin(\varphi) / v, \quad (1.1)$$

де  $v$  — швидкість поширення звуку в повітрі.

Під час обробки сигналів, отриманих від мікрофонної решітки, для визначення напрямків надходження акустичних хвиль під різними кутами  $\varphi$  необхідно здійснювати підсумовування дискретних відліків сигналів, що відповідають кожному конкретному напрямку. Один із найпростіших способів

реалізації часових зсувів між сигналами полягає у зміщенні їхніх відліків на певну кількість  $m$ , яка безпосередньо пов'язана з частотою дискретизації  $F_d$ . Такий підхід дозволяє формувати просторово спрямовану чутливість системи, а також забезпечує гнучке керування напрямком прийому сигналу без зміни фізичного розташування мікрофонів.

$$\Delta t = m / F_d \quad (1.2)$$

Кут  $\varphi$  основної пелюстки діаграми спрямованості мікрофонної решітки за умови рівномірного (еквідистантного) розташування мікрофонів на відстані  $d$  визначається кількістю зсувів між дискретними відліками сусідніх сигналів перед їх підсумовуванням, що впливає з наведених співвідношень (1.1) і (1.2).

$$\varphi = \arcsin (m \times v / (d * F_d)). \quad (1.3)$$

З рівняння (1.3) випливає, що зі збільшенням частоти дискретизації  $F_d$  зменшується крок обробки за дискретними відліками кута  $\varphi$ . Кут  $\varphi$  матиме рівномірно розподілені значення лише за малих значень  $m$ , коли наближено виконується рівність  $\varphi \approx \arcsin(\varphi)$  для послідовних значень  $m$ , таких як ...  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ .

Однак у багатоканальних електронних системах зондування місцевості ця особливість не є критичною: при більших кутах роздільна здатність може частково знижуватись, але отримані значення залишаються узгодженими із співвідношенням (1.3). З урахуванням цього запропоновано вдосконалений принцип побудови АЦ-системи.

#### 1.4 Особливості обробки сигналів в акустичних решітках

Акустичні сигнали реєструються за допомогою одного мікрофонного масиву — у разі визначення напрямку, або двох — для обчислення просторових координат джерела звуку. Отримані аналогові сигнали попередньо підсилюються в кожному

вимірювальному тракту, після чого проходять етап високоточного аналого-цифрового перетворення (АЦП). У процесі оцифрування відбувається автоматична компенсація амплітудно-фазових спотворень, що забезпечує стабільність частотної характеристики системи.

Для позиціонування джерел звуку на електронній карті застосовується програмний комплекс прискореної цифрової обробки, який реалізує паралельні ієрархічні структури обчислення. Такий підхід дозволяє досягти високої швидкодії при аналізі великої кількості каналів одночасно. Підвищення точності локалізації об'єктів здійснюється за допомогою адаптивних нейронечітких алгоритмів навчання, які враховують нелінійність сигналів і мінімізують вплив зовнішніх завад. Розпізнавання джерел ґрунтується на кореляційних методах та багаторівневому деревовидному пошуку, що забезпечує стійке визначення об'єкта навіть при часткових спотвореннях або втраті частини даних [6].

Результати обробки можуть бути представлені у вигляді інтерактивної просторової карти із маркуванням координат, динамічними графіками енергії сигналу та часовими спектрограмами. Дані можуть зберігатися в базі для подальшого аналізу або автоматично передаватися в центр моніторингу. На цьому етапі проводиться активна оптимізація програмних алгоритмів, тестування експериментальних зразків і моделювання поведінки системи в різних акустичних середовищах.

Особливу увагу приділено впливу зовнішніх факторів — температури, вологості, атмосферного тиску — на стабільність вимірювальних параметрів. Для компенсації цих впливів у систему вводяться корекційні модулі, які адаптують роботу каналів у реальному часі. Це дозволяє зберігати точність навіть у нестабільних умовах експлуатації, наприклад, під час польових вимірювань або в промислових цехах.

Точність перетворення сигналів визначається параметрами аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів, що формують метрологічну основу вимірювальних каналів. Загальна похибка включає як систематичні, так і випадкові складові, серед яких виділяють адитивну (зміщення нуля), мультиплікативну

(масштабну) та похибку лінійності. Під час розробки таких систем особливе значення має калібрування каналів, яке усуває дрейф параметрів та вирівнює амплітудно-частотну характеристику.

Для досягнення високої точності при одночасному збереженні швидкодії використовуються комбіновані методи аналого-цифрового перетворення. АЦП інтегруючого типу демонструють відносну похибку не вище 0,05 % при роздільній здатності 14 біт, однак характеризуються обмеженою частотою відліків, що становить лише десятки або сотні герц. Для підвищення швидкодії застосовуються гібридні схеми порозрядного врівноваження та паралельно-последовні перетворювачі, які поєднують високу точність із помірним енергоспоживанням.

У високошвидкісних системах (звідл  $\approx 10^2$ – $10^4$  кГц) виникає складність утримання похибок на мінімальному рівні через внутрішні шуми й нелінійності елементної бази. Розвиток таких систем обмежується технологічними характеристиками матеріалів і топологією мікросхем. Відхилення вагових коефіцієнтів розрядів компенсуються на етапі виробництва лазерним підстроюванням резисторів і конденсаторів у складі вбудованих ЦАП, проте це збільшує площу кристала, складність топології та теплове навантаження.

Крім того, фізичне втручання у структуру мікросхеми знижує її температурну стабільність та довготривалу точність, що особливо критично для вимірювальних приладів високої роздільності (понад 14 біт).

Подальший розвиток таких систем спрямований на інтеграцію інтелектуальних методів аналізу акустичних сигналів, зокрема гібридних підходів на базі нейромереж та статистичної фільтрації. Це дозволяє не лише проводити точні вимірювання, а й автоматично виявляти джерела звуку, класифікувати події та адаптувати параметри обробки залежно від акустичного контексту.

Завдяки поєднанню апаратних рішень високої точності та програмних алгоритмів адаптивної обробки формується новий клас багатоканальних АЦ-систем, здатних забезпечувати стабільну, високоточну й швидку обробку звукових сигналів у реальному часі [7].

## 2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ ПРИ БАГАТОКАНАЛЬНІЙ ОБРОБЦІ В СИСТЕМІ МІКРОФОННОЇ РЕШІТКИ

### 2.1 Огляд аналогово-цифрових систем

Більш точним підходом є застосування повної цифрової корекції похибок або калібрування ваг розрядів ЦАП та АЦП без фізичного втручання в елементи схеми. Для двійкових ЦАП зменшення статичних помилок реалізується за рахунок цифрово-аналогової компенсації вихідного сигналу: до основного сигналу додається корекційна складова, яку формує додатковий коригувальний ЦАП. У цьому випадку вхідний код  $K_{\text{вих}}$  (див. рис. 2.1) подається одночасно як на основний ЦАП, так і до цифрового обчислювального пристрою (ЦОП). ЦОП обчислює код корекції, який надходить на вхід коригувального ЦАП (ЦАП<sub>кор</sub>), що генерує аналоговий сигнал-компенсатор. Такий метод дозволяє динамічно підлаштовувати ваги розрядів, компенсуючи дрейф параметрів та технологічні відхилення елементів у процесі роботи. Подібний принцип застосовується і для АЦП, де фонове або попереднє калібрування забезпечує автоматичне оновлення цифрових коефіцієнтів похибок без зупинки системи. Це суттєво підвищує точність, стабільність та довготривалу надійність вимірювальних каналів у багатоканальних аналого-цифрових системах обробки акустичних сигналів.

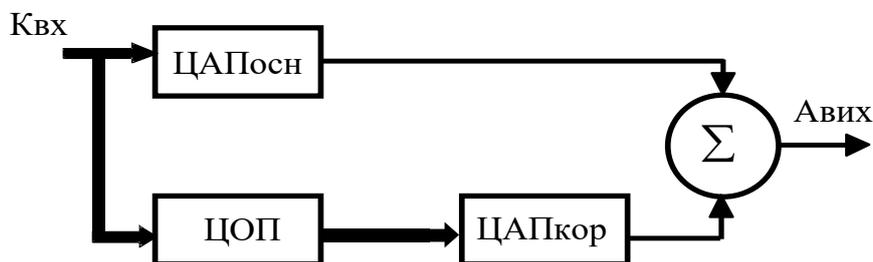


Рисунок 2.1 — Регулювання вихідної величини двійкового ЦАП

Результуючий сигнал  $A_{\text{вих}}$  формується шляхом підсумовування аналогових складових у суматорі ( $\Sigma$ ) аналогових величин. Такий принцип підвищення

точності роботи цифро-аналогового перетворювача є одним із найпоширеніших і реалізується, зокрема, компанією Intersil Inc. (США). Водночас його застосування в аналого-цифрових перетворювачах частково знижує швидкодію пристрою, що пояснюється додатковими етапами обчислення й компенсації похибок. Доведення цього факту можливе шляхом аналізу функціонування самокаліброваного аналого-цифрового перетворювача побітової компенсації, побудованого на основі двійкової системи числення. Спрощена структурна схема такого пристрою наведена на рис. 2.2. У його складі передбачені: схема порівняння аналогових сигналів (СП), основний цифро-аналоговий перетворювач (ЦАПосн), допоміжний коригувальний ЦАП (ЦАП<sub>кор</sub>), суматор аналогових сигналів ( $\Sigma$ ), цифровий обчислювальний блок (ЦОБ), регістр керування коригувальним ЦАП (Рг), вихідний регістр (Рг<sub>вих</sub>), регістр послідовного наближення (РПН) та блок керування (БК). Кожен із цих елементів забезпечує точну взаємодію під час процесу аналого-цифрового перетворення та корекції результатів. Для підвищення стабільності й зменшення похибок використовуються методи внутрішнього калібрування, що дозволяють компенсувати неідентичність каналів, температурні коливання й відхилення параметрів елементної бази. Завдяки цьому система забезпечує більш точне визначення цифрового еквівалента аналогового сигналу навіть за наявності завад.

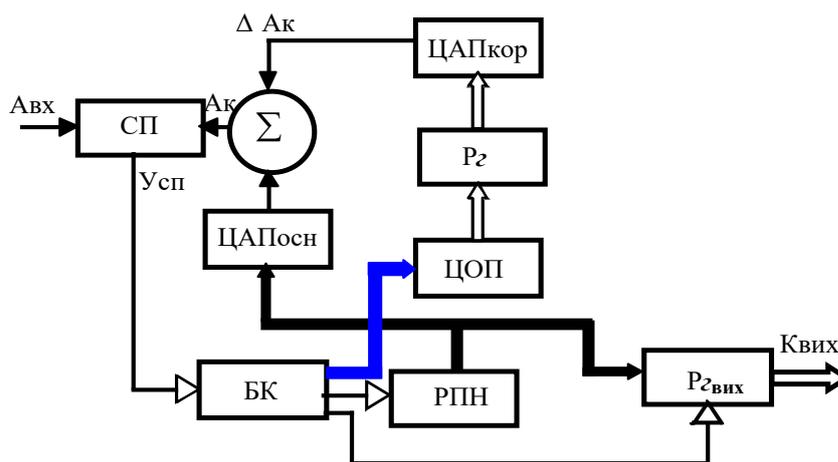


Рисунок 2.2 — Автокалібрований двійковий аналого-цифровий перетворювач

У робочому режимі на вхід аналого-цифрового перетворювача подається вхідна напруга  $A_{вх}$ , яка врівноважується компенсуючим сигналом виду  $A_k = A_{осн} + \Delta A_k$ , де  $A_{осн}$  — це сигнал, сформований основним ЦАП (ЦАПосн), а  $\Delta A_k$  — коригувальна складова, що генерується допоміжним коригувальним перетворювачем (ЦАПкор). Величина коду  $\Delta A_k$  розраховується цифровим обчислювальним пристроєм (ЦОП) на кожному тактовому циклі в моменти вмикання старших, менш точних розрядів.

Час повного перетворення сигналу з урахуванням корекції визначається співвідношенням:

$$t_{np} = nt_T + mt_{кор}, \quad (2.1)$$

де  $n$  — кількість тактів врівноваження,

$t_T$  — тривалість одного такту,

$m$  — число розрядів, що підлягають калібруванню,

$t_{кор}$  — тривалість обчислення вирівняльної поправки.

У випадку, коли похибка формування сигналу основного перетворювача (ЦАПосн) має стабільний або незначно змінний характер, для багаторозрядних систем ( $n > 12$ ) кількість скоригованих розрядів може сягати значення  $m \geq n/2$ . Якщо ж час коригування  $t_{кор}$  співставний із тривалістю такту  $t_T$ , загальний час перетворення  $t_{np}$  суттєво збільшується. Отже, застосування описаного методу для підвищення точності шляхом індивідуального обчислення поправок до кожного «неточного» розряду під час процесу врівноважування знижує загальну швидкодію навіть у пристроях середньої продуктивності [8].

Вдосконалення параметрів аналого-цифрового перетворення є завданням із внутрішньою суперечністю: покращення одного показника (наприклад, точності) часто супроводжується зменшенням іншого — швидкодії або енергетичної ефективності. Зменшення кількості компонентів у схемі може призвести до погіршення метрологічних властивостей, а надмірне ускладнення — до збільшення часу перетворення. Одним із ефективних шляхів балансування цих параметрів є

впровадження надлишкових потокових схем числення, що дозволяють одночасно поліпшити точність і швидкодію. Такий підхід забезпечує збільшення бітової глибини перетворювача, що хоч і веде до зростання кількості тактів порозрядного врівноважування, проте підвищує точність роботи АЦП середнього та високого класу.

Використання аналогових елементів із середньою швидкодією в поєднанні з цифровими алгоритмами самокорекції забезпечує покращення продуктивності без суттєвого зростання енергоспоживання. Таким чином, реалізація надлишкових структур у багатоканальних аналого-цифрових системах створює можливості для розробки високоточних АЦП, здатних працювати стабільно навіть за умов змінних зовнішніх факторів.

## 2.2 Структура багатоканальних систем

Підвищення багаторозрядних аналого-цифрових перетворювачів реалізується двома основними шляхами. Перший полягає у використанні вдосконаленої елементної бази — швидкодіючих операційних підсилювачів, високоточних компараторів, низькоінерційних ключових елементів та оптимізованих схем керування. Цей підхід орієнтований на технологічне оновлення апаратної частини пристрою та дає змогу зменшити час затримки в тракті обробки сигналу.

Другий шлях пов'язаний із введенням надлишковості в архітектуру АЦП, що дозволяє досягти компромісу між точністю і швидкодією без суттєвого ускладнення схеми. Одним із найдавніших і водночас ефективних методів такого підходу є застосування структурної надлишковості, коли для кожного такту перетворення використовуються додаткові обчислювальні ресурси [9].

Суть структурної надлишковості полягає у використанні паралельно-послідовного принципу перетворення, за якого частина бітів формується паралельно, а решта — послідовно, із використанням результатів попередніх етапів. Це дозволяє суттєво зменшити час загального перетворення без втрати точності. Існує два основних варіанти реалізації паралельно-послідовних аналого-

цифрових перетворювачів. У першому випадку застосовується єдиний набір компараторів, порогові рівні спрацьовування яких динамічно переналаштовуються на кожному такті роботи системи. Такий підхід забезпечує мінімальну апаратну складність, однак потребує високої стабільності елементної бази.

У другому варіанті використовується кілька незалежних наборів компараторів, кожен із яких відповідає за свій такт перетворення. Це дає можливість проводити обробку частини розрядів паралельно, що значно підвищує швидкодію пристрою, проте збільшує його апаратні витрати.

Спрощена структурна схема самокоригованого двійкового 14-розрядного паралельно-послідовного аналого-цифрового перетворювача наведена на рис. 2.3. Дана структура поєднує принципи паралельної обробки сигналів із алгоритмами внутрішньої самокалібрування, що забезпечує одночасно високу точність і стабільність при роботі в умовах зовнішніх завад. Завдяки цьому такі системи широко використовуються у вимірювальних комплексах, цифрових акустичних масивах та багатоканальних системах моніторингу.

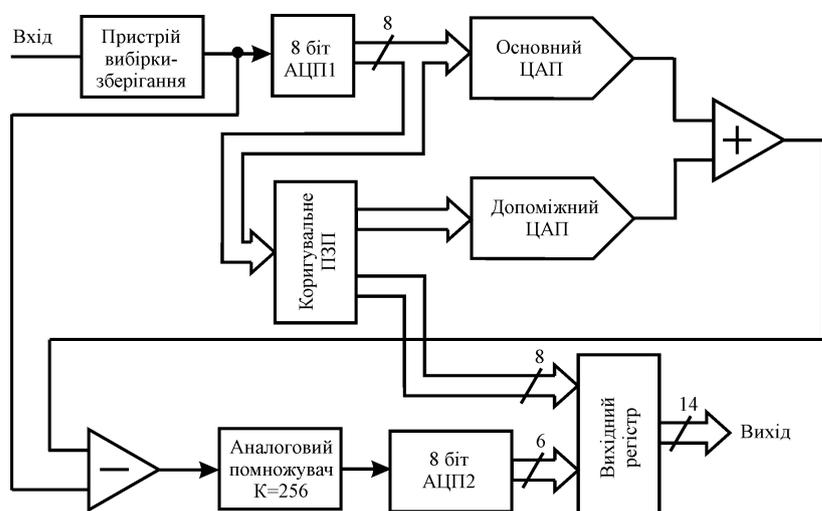


Рисунок 2.3 — Структурна схема паралельно-послідовного АЦП з коригуванням

У даному пристрої початково здійснюється перетворення сигналу з 8-бітового формату до 6-бітового. Для побудови послідовно-паралельних перетворювачів зручно використовувати паралельні аналого-цифрові

перетворювачі (АЦП) у вигляді набору компараторів. Проте досягти точності у 16 біт неможливо навіть при використанні двох інтегрованих 8-бітових АЦП, оскільки на вході другого етапу (АЦП2) формується різницевий сигнал, який містить як неперетворену частину вхідного сигналу, так і помилки, спричинені неточністю роботи АЦП1, схеми віднімання, аналогового перемножувача та основного ЦАП. Для компенсації цих похибок у послідовно-паралельних схемах часто застосовують метод перекриття масштабів першого та другого етапів, що дозволяє досягти необхідної точності перетворення.

У запропонованій структурній схемі передбачено наявність програмованого запам'ятовуючого пристрою (ПЗУ) та допоміжного ЦАП, який забезпечує стикування між етапами перетворення. Такий підхід називають програмним коригуванням. Для підвищення стабільності системи в часі та розширення температурного діапазону замість ПЗУ можливо використовувати мікропроцесорну оперативну пам'ять (ОЗУ). Процес налаштування самокалібрувального перетворювача полягає у заповненні комірок ОЗУ кодами, що формуються під час самокалібрування АЦП1 при різних опорних рівнях напруги. Для калібрування N-бітового АЦП1 необхідно створити  $2^{N-1}$  опорних рівнів, що потребує значних апаратних та часових витрат. Розроблені методи зменшення кількості рівнів частково спрощують процес, проте не усувають необхідність складного багаторівневого джерела опорної напруги.

Щодо аналогової частини паралельно-послідовних АЦП, головною вимогою є висока швидкодія та точність диференціального підсилювача. Водночас, під час реалізації таких перетворювачів виникає проблема завад, що з'являються у момент перемикання між етапами. Основним джерелом шумів є одночасне спрацьовування компараторів першого етапу та ключів ЦАП. Це створює ризики появи імпульсних перешкод, що особливо негативно впливають на системи, які працюють з високочутливими підсилювачами. Тому при проектуванні таких пристроїв велика увага приділяється оптимізації схем керування, ізоляції сигнальних трактів і застосуванню захисних елементів, які мінімізують перехресні впливи.

Попри складність, паралельно-послідовні АЦП мають важливу перевагу — можливість побудови на основі вже існуючих мікросхем паралельних перетворювачів, що значно спрощує інтеграцію у складні вимірювальні системи.

У зв'язку з цим з'явилися нові типи АЦП, побудовані на основі дельта-сигма модуляції, які поєднують високу точність і простоту аналогової частини. Принцип роботи таких перетворювачів полягає у високочастотному відстеженні змін вхідної напруги за допомогою керування вихідною напругою ЦАП у позитивному чи негативному напрямку.

Роздільна здатність дельта-сигма перетворювачів визначається переважно якістю цифрового фільтра. Наприклад, у моделі CS5316 застосовується 384 фільтри, що свідчить про складність цифрової частини системи при спрощеній аналоговій реалізації. Частота квантування у 16-розрядному перетворювачі CS5316 перевищує частоту дискретизації у 128 разів і становить 2,56 МГц, що характерно для пристроїв надмірного квантування.

Структурна схема дельта-сигма аналого-цифрового перетворювача зображено на рисунку 2.4.

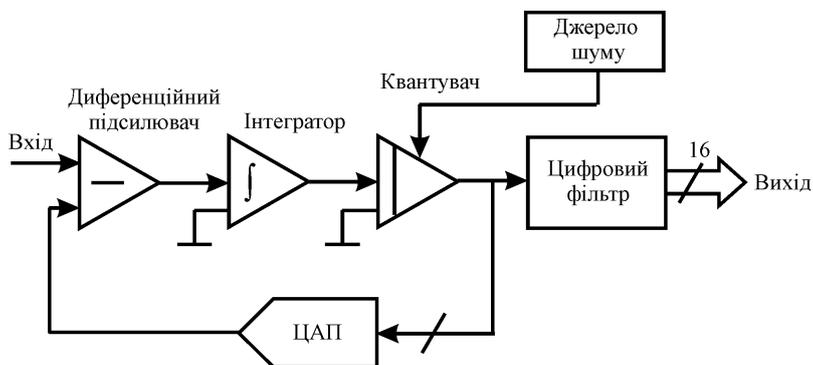


Рисунок 2.4 — Структурна схема дельта-сигма аналого-цифрового перетворювача

Досягнення у сфері дельта-сигма аналого-цифрових перетворювачів є надзвичайно вагомими. Такі компанії, як Cirrus Logic (Crystal Semiconductor), у співпраці з Analog Devices та Burr-Brown, які є світовими лідерами у виробництві високоточного вимірювального обладнання, активно впроваджують технології дельта-сигма модуляції у свої розробки. Одним із прикладів є інтегральна

мікросхема ADS1271, спеціально розроблена для професійних звукових систем. Вона характеризується мінімальним рівнем нелінійних спотворень — не більше 0,001% у частотному діапазоні від 10 Гц до 22 кГц, що свідчить про виняткову точність та стабільність сигналу [10].

Аналіз сучасних зарубіжних схем показує, що дельта-сигма перетворювачі поступово займають провідне місце у сфері високоточного аналого-цифрового перетворення. Вони успішно замінюють класичні інтегруючі АЦП у вимірюваннях постійного струму, а також ефективно використовуються у задачах цифрової обробки сигналів, де раніше домінували паралельно-послідовні архітектури. Їх перевага полягає у поєднанні високої роздільної здатності, низького рівня шумів і можливості реалізації у компактній інтегральній формі. У більшості сучасних дельта-сигма перетворювачів застосовується принцип «шумового формування» (noise shaping), який дозволяє підвищити ефективну роздільну здатність системи. Суть цього підходу полягає в тому, що шум квантування не усувається повністю, а «виштовхується» за межі корисного спектра сигналу за допомогою спеціально спроектованого фільтра зворотного зв'язку.

На відповідній блок-схемі процесу дельта-сигма модуляції зображено джерело шуму, під'єднане до квантора (компаратора). Еквівалентна схема демонструє передатні функції Лапласа для сигналу, що проходить через низькочастотний фільтр, та для шуму, який формується у високочастотному контурі. Завдяки цьому забезпечується значне зниження рівня шумів у робочому діапазоні частот.

Схему процесу формування шумів при дельта-сигма модуляції, а також відповідні передатні функції Лапласа, подано на рис. 2.5.

Ключовим елементом є петля зворотного зв'язку, яка формує вхідний сигнал для квантувача, використовуючи інтегратор. Цей інтегратор виступає як фільтр нижніх частот для сигналу і як фільтр верхніх частот для шуму квантування, ефективно "відштовхуючи" більшу частину енергії шуму на високі частоти.

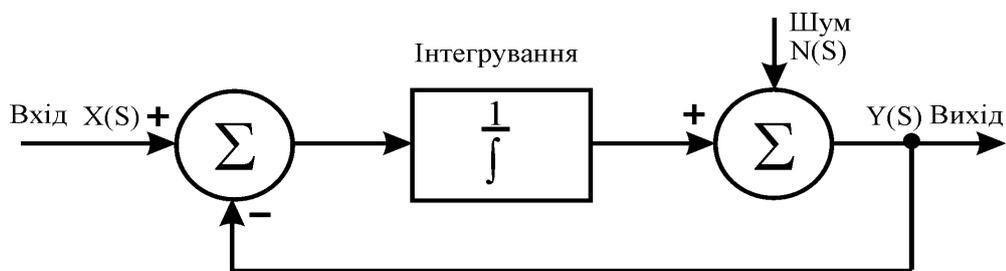


Рисунок 2.5 — Схема формування шумових компонентів та відповідні передатні функції Лапласа

Введення додаткового шумового сигналу не погіршує, а навпаки — підвищує роздільну здатність перетворювача, оскільки спектр шуму переноситься у високочастотний діапазон, де його можна ефективно приглушити за допомогою цифрового фільтра низьких частот. Завдяки монотонній характеристиці перетворення дельта-сигма АЦП, ці пристрої набули широкого застосування у сфері цифрового запису звукових сигналів та систем високої точності.

Разом із тим, головним недоліком дельта-сигма перетворювачів залишається значний час стабілізації вихідного сигналу при різкій зміні аналогового вхідного рівня, що обмежує ефективність їх використання у багатоканальних системах. У сучасних моделях, таких як CS5505/6 або AD7710/11/12, ця проблема частково вирішена шляхом упровадження гребінчастих фільтрів для постійних сигналів, що покращують швидкодію без істотної втрати точності.

Окремі рішення, наприклад DSP56ADC16 від Motorola, дають змогу зменшити кількість фільтрів за рахунок скорочення роздільної здатності з 16 до 12 біт, що суттєво прискорює процес встановлення вихідного сигналу. Незважаючи на просту аналогову структуру, саме ця частина дельта-сигма АЦП визначає їхню якість, зокрема стабільність нульового зміщення інтегратора та рівень впливу цифрового шуму.

Використання КМОН-технологій і схем на комутованих конденсаторах у поєднанні з високим ступенем інтеграції дозволяє розміщувати цифрові фільтри високого порядку безпосередньо на кристалі мікросхеми, що значно зменшує габарити та енергоспоживання пристроїв. Подальший розвиток дельта-сигма

перетворювачів спрямований на впровадження цифрових фільтрів із регульованими параметрами, які забезпечують можливість динамічної зміни частотних характеристик і попередньої обробки сигналів безпосередньо під час роботи АЦП у складі вимірювальної системи [11].

Крім того, методи керування шумовим спектром і частотною характеристикою можуть бути адаптовані для самокалібрувальних АЦП та інтегровані у програмні рішення систем цифрової обробки сигналів. Важливу роль у цьому відіграє технологія комутованих конденсаторів, яка стала основою для створення сучасних АЦП порозрядного наближення, що широко використовуються у цифрових аудіосистемах. Блок-схема подібного перетворювача наведена на рисунку 2.6.

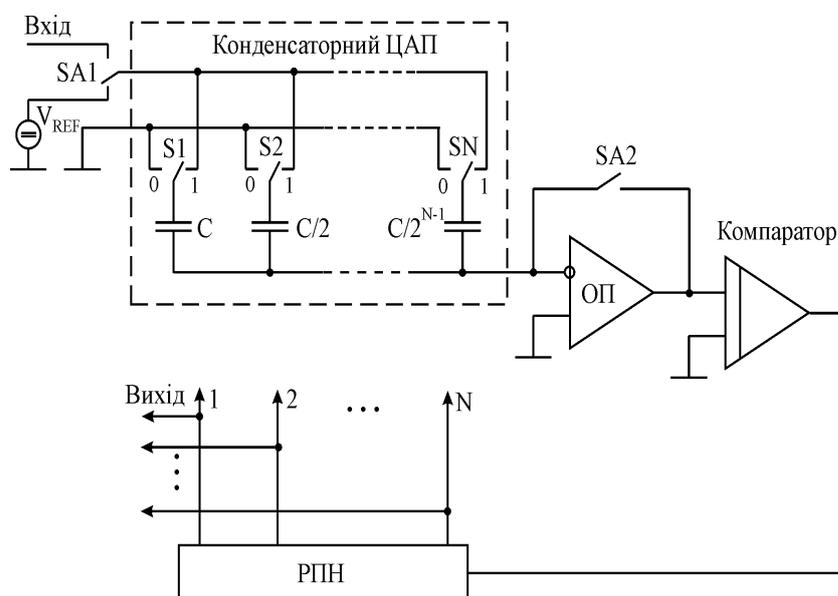


Рисунок 2.6 — Типова структурна побудова АЦП порозрядного наближення на комутованих конденсаторах

Під час фази вибірки аналогового сигналу заряд конденсаторів формується пропорційно величині прикладеної напруги  $U_{ВХ}$ . Коли перемикач SA2 розмикається, операційний підсилювач переходить у режим збереження заряду, стабілізуючи потенціал на своїх входах. Далі перемикач SA1 під'єднує матрицю конденсаторів до опорної напруги  $V_{REF}$ , і починається етап аналого-цифрового перетворення. Суть цього процесу полягає у врівноваженні зарядів на вході

підсилювача за допомогою послідовного перемикання конденсаторів  $S_1 \dots S_N$ , що реалізує алгоритм порозрядного наближення.

Коли конденсатор старшого біта під'єднується до потенціалу «0» (положення  $S_1 = 0$ ), матриця працює як зарядовий дільник напруги. У цей момент на вході операційного підсилювача формується балансуєча напруга  $U_X$ , що визначається за формулою:

$$U_X = (V_{REF} - U_{BX})/2 \quad (2.2)$$

У процесі перетворення напруги компаратор визначає знак напруги  $U_X$ , після чого керуючий пристрій перетворювача утримує або повертає перемикач  $S_1$  у початкове положення. Подібне врівноважування сигналу повторюється для кожного наступного такту перетворення. Характерною рисою конденсаторного АЦП є здатність забезпечувати високу точність визначення ємностей при мінімальних площах кремнієвого кристала в технології КМОН-ВІС. Паразитні ємності верхніх перемикачів майже не впливають на результати, оскільки під час перетворення потенціал на верхніх пластинах стабілізується. Для досягнення високої швидкодії перемикачі зазвичай реалізуються на ширококанальних МОП-транзисторах. Паразитні ємності нижніх пластин також не впливають суттєво на точність, оскільки напруга  $U_X$  у кінці процесу практично дорівнює нулю, а їх величина може перевищувати ємність переходу у десятки разів.

Одним із ключових недоліків АЦП послідовного наближення залишається тісний взаємозв'язок між точністю та часом перетворення, який обумовлений ефектом саморозряду конденсаторів. Додатково, у КМОН-структурах необхідно ретельно проектувати ключі, щоб запобігти помилкам комутації та небажаному розподілу заряду, які здатні обмежити динамічний діапазон аналого-цифрових фільтрів. У наукових джерелах рідко приділяється увага впливу процесів абсорбції конденсаторів на точність перетворення, хоча це питання суттєве для пристроїв вибірки-зберігання.

Попри недоліки, конденсаторні АЦП активно застосовуються у побутовій і професійній аудіоапаратурі завдяки оптимальному співвідношенню швидкодії, енергоспоживання і точності. Для високоточних вимірювальних систем їхнє використання потребує ретельного дослідження метрологічних характеристик, таких як стабільність, шумова чутливість та лінійність.

Метод послідовного наближення залишається одним із найефективніших у розробці самокоригуючих АЦП, адже поєднує переваги аналогових і цифрових технологій. Основні переваги таких систем:

- баланс між вартістю реалізації, точністю та швидкістю;
- можливість регулювання лінійності шляхом оптимізації вагових коефіцієнтів розрядів;
- усунення залишкової напруги після завершення перетворення, що зменшує адитивну похибку;
- придатність до застосування в багатоканальних або нерівномірно дискретизованих системах;
- інтеграція етапів введення, дискретизації та квантування;
- можливість побітової цифрової обробки завдяки послідовному формату вихідного коду.

Проведений аналіз не охоплює усіх можливих методів побудови високоточних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), однак надає фундаментальні принципи, які можуть бути використані при їх розробці та практичному застосуванні разом із цифро-аналоговими перетворювачами (ЦАП) та іншими аналоговими пристроями. Усі наведені методи базуються на використанні цифрових засобів корекції похибок аналогових компонентів. У дельта-сигма та інтегральних АЦП реалізується багаторазове накопичення і фільтрація відліків, що дозволяє мінімізувати вплив шумів та нестабільності аналогових елементів. У паралельно-послідовних АЦП основна увага приділяється усуненню похибок, спричинених невідповідністю характеристик окремих компонентів, які беруть участь у процесі перетворення. В АЦП порозрядного наближення коригуються похибки, пов'язані з неточністю вагових коефіцієнтів розрядів. У всіх типах таких

систем підвищення точності та швидкодії досягається шляхом застосування надлишкових структурних, алгоритмічних, схемних, технологічних або програмних рішень [12].

Доведено як теоретично, так і експериментально, що використання вагової надлишковості в системах числення позитивно впливає на лінійність перетворення при побудові пристроїв на основі неточних компонентів. Наприклад, у ЦАП, де ваги розрядів не враховані на технологічному рівні, введення надлишковості дозволяє значно покращити лінійність. Окрім цього, такий підхід дає змогу збільшити швидкість перетворення у побітових АЦП завдяки автоматичній компенсації динамічних похибок. Ці переваги систем числення з ваговою надлишковістю реалізуються як у симетричних, так і в більш поширених несиметричних  $(0,1)$  системах.

На рисунку наведено схему самокаліброваної аналого-цифрової системи, яка містить такі основні елементи:

- сенсори вхідних аналогових сигналів ( $m$  в кожному каналі) (С);
- вхідні комутатори (ВК);
- програмовані підсилювачі (ПП);
- антиаліасінгові фільтри низьких частот (ФНЧ);
- компаратори перевантаження (КП);
- сигнальний АЦП, із самокорекцією (САЦП);
- джерело опорної напруги для перемножуючого ЦАП опорних сигналів (ДОН).

Використання кількох сенсорів ( $C_1 \dots C_m$ ) забезпечує гнучкість системи, дозволяючи змінювати групи сенсорів або напрям прийому звукових сигналів. Компаратори перевантаження (КП) виконують контроль рівнів вхідних сигналів і визначають оптимальні коефіцієнти підсилення, запобігаючи спотворенням.

Керування системою здійснюється за допомогою контролера інтерфейсу даних, реалізованого на мікропроцесорі або цифровому сигнальному процесорі (DSP). Він забезпечує передачу даних від каналів САЦП до персонального комп'ютера через високошвидкісний інтерфейс — USB, S/PDIF, Bluetooth, Ethernet

або Wi-Fi. На комп'ютері спеціалізоване програмне забезпечення проводить обробку, аналіз і калібрування системи в реальному часі.

До складу самокаліброваної системи також входить перемножуючий ЦАП, вихідна амплітуда якого визначається напругою опорного джерела (ДОН). Залежно від алгоритму калібрування, цей ЦАП генерує тестові опорні сигнали різних типів — імпульсні, гармонійні або полігармонійні. Вони подаються через комутатори ВК на входи програмованих підсилювачів ПП, що дозволяє перевірити параметри каналів, зокрема підсилювачів, фільтрів і САЦП, у послідовному порядку для кожного режиму підсилення.

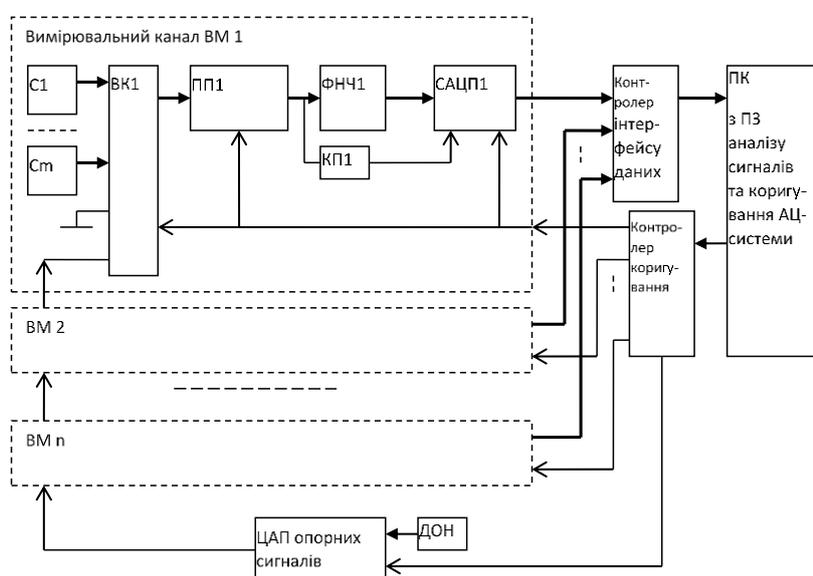


Рисунок 2.7 — Структура багатоканальної аналого-цифрової системи для аналізу сигналів з коригуванням характеристик вимірювальних каналів

Структура, представлена на рисунку 2.7, передбачає використання окремих АЦП у кожному вимірювальному каналі. У таких випадках застосовуються сучасні дельта-сигма перетворювачі з високою роздільною здатністю та цифровою децимацією, що забезпечує одночасно високу точність і шумостійкість.

Для підвищення ефективності вимірювань, особливо при швидкому перемиканні вхідних сенсорів або наявності короткочасних перевантажень підсилювачів, доцільно використовувати схему з послідовним перетворенням

змінного сигналу у каналах, як показано на рисунку 2.8. Такий підхід дозволяє забезпечити високу стабільність, мінімізувати взаємні завади між каналами та зберегти достовірність даних навіть у складних умовах експлуатації.

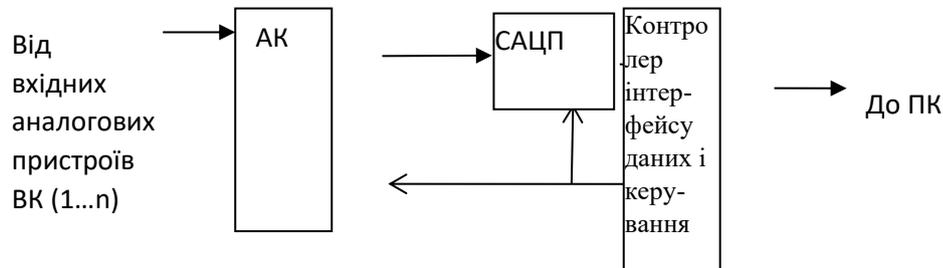


Рисунок 2.8 — Варіант схеми з послідовним АЦ-перетворенням сигналів

Параметром, що підлягає вимірюванню, може виступати амплітуда, частота або фаза змінної вихідної напруги. Величина, яку реєструють сенсори, впливає на ємність, індуктивність або взаємну індуктивність елементів електричного кола. До таких сенсорів належать ємнісні, індуктивні, трансформаторні, магнітострикційні, струнні та інші типи перетворювачів. Їхні змінні вихідні сигнали можуть безпосередньо подаватися на вхід аналогово-цифрової системи або попередньо перетворюватися у пропорційну напругу.

Власні перетворювальні властивості сенсорів мають вирішальний вплив на точність вимірювань системи. Більшість параметрів датчиків може бути визначено як у процесі виготовлення, так і під час експлуатації. Наприклад, лінійність статичної передатної характеристики задається в процесі заводського калібрування, а частотні відхилення вимірювальних каналів можуть бути уточнені під час технічного обслуговування. Таким чином, калібрування виконує ключову роль у забезпеченні стабільності метрологічних характеристик системи.

Вхідні комутаційні схеми, що працюють із сенсорами фізичних величин, проектуються відповідно до типу сигналу, що надходить. Для захисту від перенапруги використовуються симетричні схеми з резистивними обмежувачами та захисними діодами. У випадках, коли необхідна гальванічна розв'язка,

застосовуються трансформаторні або оптоелектронні елементи, які водночас впливають на фазову точність і рівень шумів. Важливо враховувати також нелінійність і відмінності між каналами, що можуть проявлятися під час багатоканальної синхронної обробки сигналів [13].

Програмовані підсилювачі у зміннострумових АЦ-системах виконують подвійну функцію: вони забезпечують перетворення диференціального сигналу із подавленням синфазної складової та узгодження рівня сигналу з динамічним діапазоном ФНЧ і сигнального АЦП. Найчастіше такі підсилювачі реалізуються на базі трикаскадних операційних схем, хоча для підвищення швидкодії застосовують також струмові підсилювачі з симетричними каскадами. Калібрування цих підсилювачів передбачає визначення нульового зміщення та уточнення коефіцієнтів підсилення на кожному етапі налаштування.

Отримані в процесі калібрування дані використовуються для програмної корекції вхідних сигналів кожного каналу. Аналіз виконується як на основі реальної статичної передатної характеристики, так і з урахуванням амплітудно-фазових параметрів. Адаптація системи до рівня й спектрального складу сигналів здійснюється як апаратно — через регулювання підсилювачів та АЦП, так і програмно, шляхом частотного аналізу у процесорі або ПК.

Застосування технологій калібрування статичних і динамічних параметрів у багатоканальних аналогово-цифрових системах, орієнтованих на обробку низькочастотних акустичних сигналів, забезпечує досягнення необхідних метрологічних характеристик, стабільність параметрів у часі та високу повторюваність результатів вимірювання:

- 4 вимірювальних каналів;
- 4 канали з можливістю регулювання напруги та струму живлення активних сенсорів;
- тип аналогових вхідних сигналів є симетричним;
- діапазон напруг аналогових вхідних сигналів є від 0,1 В до 1 В;
- частотний діапазон сигналів коливається від 1 Гц до 10000 Гц;
- відношення сигнал/шум(динамічний діапазон) не менше 126 дБ;

- спектральна роздільна здатність не нижче 140 дБ;
- рівень нелінійних спотворень повинен бути не більше 0,003%;
- нерівномірність амплітудно-частотної характеристики, не більше 0,03 дБ, а фазочастотної — 0,1°;
- інтерфейси передавання даних є USB 2.0 та Bluetooth;
- напруга живлення від +5 В до  $\pm 10\%$ , живлення можливе як від USB так і від автономного джерела;

На основі аналізу структурно-параметричних характеристик системи можна зробити такі висновки:

- існує потенціал для підвищення точності й стабільності аналогово-цифрової системи за рахунок використання аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів (АЦП/ЦАП), побудованих на принципах надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ);
- подальше вдосконалення системи можливе шляхом розширення принципів автоматичної корекції статичних похибок та компенсації динамічних відхилень в АЦП, ЦАП і суміжних блоках вимірювальних трактів;
- сформовано узагальнену структурну модель аналогово-цифрової системи, орієнтованої на вимірювання й аналіз низькочастотних сигналів із застосуванням самокаліброваних перетворювачів;
- визначено основні технічні вимоги до створення чотирьоканальної системи акустичного аналізу, що поєднує високу точність, швидкодію та адаптивну корекцію метрологічних параметрів.

### 2.3 Цифрова обробка сигналу

З позиції багатоканальної цифрової обробки аналогових сигналів ключовою особливістю системи є використання трьох аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) та двох одноканальних цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП). АЦП, позначені як ADC1, ADC2 і ADC3, реалізовані за принципом 12-бітних перетворювачів послідовного наближення та здатні працювати з шістнадцятьма зовнішніми аналоговими каналами, які підключаються через мультиплексор.

Кожен із АЦП має власну групу каналів, що дозволяє розділяти завдання вимірювання та підвищувати точність обробки. Процес аналого-цифрового перетворення може здійснюватися в різних режимах: одноканальному (single), багатоканальному (scan), безперервному (continuous) або дискретному (discontinuous).

Останні десятиліття характеризуються стрімким зростанням вимог до статичних і динамічних параметрів вимірювальних комплексів, що працюють у діапазоні низьких частот, зокрема звукових. Такі системи знаходять широке застосування у сферах сейсмозв'язки, тензометрії, гідроакустики, акустичної локації, біомедичних досліджень тощо. Досягнення високої якості перетворення сигналів безпосередньо визначається технічними характеристиками основних компонентів — аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів, підсилювачів, комутаційних пристроїв і фільтрів [14].

Вибір елементної бази АЦ-системи залежить від діапазону рівнів сигналів, робочих частот і вимог до точності. Від цього безпосередньо залежать метрологічні параметри, стабільність та достовірність результатів. При проектуванні особливу увагу приділяють узгодженню характеристик окремих каналів, щоб мінімізувати фазові й амплітудні відхилення між ними. У сучасних системах також широко застосовуються методи цифрової компенсації похибок, що дозволяють коригувати нелінійність, зсув нуля та шумові впливи в реальному часі. Важливим аспектом є забезпечення узгодженої роботи всіх АЦП через апаратну синхронізацію, що особливо критично в багатоканальних системах із часовою прив'язкою вимірювань:

- широкий динамічний інтервал оброблюваних сигналів, який охоплює значення від 100 до 140 децибел;
- підвищена роздільна здатність системи, що у середньому становить від 16 до 24 біт;
- надзвичайно низький рівень нелінійних спотворень під час аналого-цифрового перетворення, що знаходиться в діапазоні від 0,001% до 0,01%.

Під час визначення динамічних характеристик аналого-цифрової системи (АЦ-системи) необхідно враховувати низку ключових параметрів, що безпосередньо впливають на точність та стабільність її роботи:

- широкий діапазон частот сигналів, який охоплює від 1 герц до 10 кілогерц;
- низький рівень власних шумів у спектрі сигналу, що зазвичай перебуває в межах від  $-90$  дБ до  $-120$  дБ;
- мінімальні нелінійні спотворення, значення яких коливається у межах від  $0,001\%$  до  $0,01\%$ ;
- незначна нерівномірність амплітудно-частотної характеристики до  $\pm 0,03$  дБ та мала фазочастотна нелінійність до  $\pm 0,1$ .

У багатоканальних аналого-цифрових системах, що виконують паралельну або послідовну обробку сигналів, додатковою вимогою є забезпечення ідентичності статичних і динамічних характеристик усіх каналів. Також особливу увагу приділяють зменшенню взаємного впливу між каналами, що дає змогу підвищити точність вимірювань і зберегти коректність фазових співвідношень у багатоканальних структурах.

#### 2.4 Засоби збереження та передачі даних

Одним із ключових етапів побудови високоефективних багатоканальних аналого-цифрових систем, призначених для моніторингу та синхронної обробки низькочастотних акустичних сигналів, є перевірка параметрів мікрофонних вимірювальних каналів і тестування їх роботи в умовах, максимально наближених до реальних експлуатаційних сценаріїв. На цьому етапі надзвичайно важливо забезпечити точність відтворення характеристик кожного каналу, а також оцінити стабільність роботи системи при різних рівнях акустичного навантаження. Для проведення таких досліджень необхідно реалізувати комплекс організаційних та технічних заходів, серед яких особливе місце займає розроблення спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу та візуалізації параметрів сигналів [15].

Це програмне забезпечення повинно забезпечувати обробку, порівняння та оцінку параметрів сигналів, які надходять з кожного мікрофонного каналу, у реальному часі або у заданих часових інтервалах. Крім того, воно має підтримувати функцію побудови просторових діаграм напрямків звукових хвиль, що дозволяє здійснювати візуалізацію акустичного середовища. Важливо, щоб система могла працювати з різними форматами аудіоданих, зокрема з файлами типу WAV, отриманими під час лабораторних або натурних випробувань як для окремих каналів, так і для їх групових конфігурацій.

Додатково програмне забезпечення повинно забезпечувати можливість синхронізації сигналів між каналами, аналіз кореляційних зв'язків і автоматичне виявлення фазових або амплітудних спотворень. Застосування таких функцій підвищує ефективність діагностики системи, дозволяючи швидко виявляти похибки, пов'язані з невідповідністю характеристик мікрофонних модулів або асиметрією каналів. Порівняння отриманих результатів із теоретично очікуваними значеннями дає можливість оцінити коректність роботи вимірювальної системи та скоригувати її параметри перед польовими експериментами.

Використання комплексного підходу до аналізу каналів дозволяє точно визначати похибки амплітудно-частотних і фазових характеристик, перевіряти відповідність між сигналами на входах та виходах системи, а також оцінювати точність визначення напрямку приходу звукових хвиль. Така процедура є особливо важливою при розробці акустичних систем просторового зондування, які повинні надійно функціонувати в умовах шумових завад і мінливих характеристик середовища.

Для підвищення точності визначення просторових координат джерел застосовується метод Байєсового фокусування. Його суть полягає у використанні апріорної інформації про розподіл звукових джерел, що дозволяє уточнити модель акустичного поля за рахунок оптимального підбору параметрів поширення звукової енергії до вимірних даних. Завдяки цьому зменшується кількість ітерацій у процесі реконструкції та підвищується роздільна здатність просторової моделі. Крім того, алгоритм Байєсового виведення дає змогу автоматично оцінювати

параметри розповсюдження хвиль без необхідності ручного налаштування системи під кожен новий сценарій.

Водночас статистично оптимізовані методи реконструкції акустичного поля потребують значних обчислювальних ресурсів. Зі зростанням кількості вимірюваних каналів або щільності мікрофонної решітки обсяг експериментальних даних різко збільшується, що зумовлює необхідність застосування більш ефективних алгоритмів обробки. У таких випадках доцільно використовувати моделі з апроксимацією джерел звуку, де складні поля замінюються еквівалентними наборами джерел із подібними характеристиками випромінювання.

Метод еквівалентного джерела дозволяє суттєво зменшити обчислювальні витрати, забезпечуючи водночас достатню точність реконструкції. У його основі лежить принцип найменших квадратів, який забезпечує відтворення звукового тиску у вибраному об'ємі таким чином, щоб він максимально відповідав вимірним даним. Це дає змогу створювати спрощені, але інформативні тривимірні моделі акустичних сцен, придатні для аналізу реальних експериментальних ситуацій.

У випадках, коли наявні експериментальні дані є неповними або містять значну кількість невизначеностей, застосовується модифікований варіант методу еквівалентного джерела з використанням нечітких або інтервальних моделей. Параметри джерел у цьому випадку описуються через нечіткі терміни, а взаємозв'язки між положеннями джерел і рівнями звукового тиску задаються у вигляді матриць нечітких відношень. Такий підхід дозволяє зменшити вплив похибок вимірювань і підвищити стійкість моделі до неповноти даних.

Для побудови цих моделей застосовуються методи нечіткої кластеризації та генетико-нейронні алгоритми, які забезпечують оптимальний підбір параметрів на основі аналізу щільності пікових значень звукового поля. Завдяки цьому можливо оцінити внесок кожного джерела в загальний рівень акустичної енергії. На заключному етапі параметри поля уточнюються за допомогою методів регуляризації, що гарантує узгодженість результатів з експериментальними спостереженнями.

Розроблений підхід дозволяє відтворювати акустичну поверхню у вигляді нечіткої бази знань, яка відображає взаємозв'язок між координатами джерел і потужністю звукового поля. Застосування нечітких логічних рівнянь дає можливість сформулювати систему правил типу «ЯКЩО–ТО», що описують поведінку звукового середовища. Розв'язання сполучених систем таких рівнянь дозволяє уникнути багаторазового моделювання та селекції варіантів розподілу енергії, скорочуючи час реконструкції акустичного поля [16].

Генетико-нейронна технологія, використана у процесі моделювання, забезпечує швидку адаптацію системи до змін середовищних параметрів, а також підвищує стабільність при обробці потоків акустичних даних у режимі реального часу. Такий підхід робить можливим побудову систем акустичного моніторингу нового покоління, здатних виконувати не лише фіксацію джерел звуку, а й їх інтелектуальну класифікацію за типом і динамікою.

## 3 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОБРОБКИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

### 3.1 Поєднання систем обробки сигналів та багатоканальних систем

Мета: розроблене програмне забезпечення повинно створювати візуалізацію звукових сигналів, отриманих з кожного мікрофонного вимірювального каналу, на основі обробки аудіофайлу формату WAV, а також формувати діаграму напрямку звуку. Для кожного окремого каналу передбачається відображення індивідуального графічного сліду на спільному часовому графіку, що відрізнятиметься кольором або типом лінії. Такий підхід дозволяє одночасно спостерігати динаміку сигналів у всіх каналах та оцінювати їх взаємну кореляцію.

Окрім відображення часових сигналів, у спеціальній частині головного вікна програми має формуватись діаграма напрямку (пеленгаційна або полярна), що візуально демонструє розподіл інтенсивності звуку залежно від просторового положення джерела. Це дає змогу визначати напрямок на основне джерело сигналу, аналізувати амплітуду та фазові співвідношення між каналами, а також проводити верифікацію даних у процесі калібрування системи.

Тип представлення даних — wav-файл.

Формат кодування — PCM (Pulse Code Modulation).

Кількість каналів у файлі — 1, 2, 3, 4.

Розрядність відділків звукового сигналу — 8, 16, 24, 32 біт.

Частота дискретизації – визначається безпосередньо у заголовку wav-файлу.

Тривалість запису звукового сигналу від 1 до 5 секунд.

Програма повинна забезпечувати автоматичне зчитування параметрів звукового файлу (кількість каналів, частота дискретизації, розрядність, тривалість) і відображати їх у окремій вкладці інформаційного вікна користувацького інтерфейсу. Інтерфейс відображення параметрів передбачається виконати у вигляді таблиці або панелі, подібної до тієї, що наведена на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 — Налаштування звукового сигналу

Для забезпечення можливості комплексного аналізу звукових даних у режимі багатоваріантного відображення, програмне забезпечення повинно підтримувати створення необмеженої кількості графічних інтерфейсів відображення сигналів, кожен із яких реалізовано у вигляді окремої вкладки. Такий підхід дозволяє здійснювати паралельний аналіз кількох наборів даних, що особливо важливо під час порівняння сигналів, отриманих з різних мікрофонних каналів або в різні моменти часу [17].

У межах кожної вкладки звуковий сигнал відображається у вигляді окремих треків, де кожен трек відповідає певному каналу. Це забезпечує візуальне розділення інформації та полегшує аналіз часових і спектральних характеристик сигналу.

Вимоги до області графічного відображення треків включають наступні функціональні можливості:

- надання користувачу можливості вибору й призначення певних каналів для кожного треку інтерфейсу, аналогічно до зображення, поданого на рисунку 3.2;
- реалізація функції задання початкового номера відліку, з якого починається побудова графічного представлення сигналу, що дозволяє аналізувати окремі ділянки запису;
- забезпечення механізму горизонтальної прокрутки графічного зображення з метою швидкого доступу до потрібного фрагмента сигналу за його порядковим номером;
- реалізувати функцію початку побудови треків, вказавши номер відліку звукового сигналу, з якого розпочинається його відтворення;

- передбачити можливість встановлення початкового моменту для прослуховування сигналу вибраного каналу;
- забезпечити масштабування графічного зображення аудіосигналів уздовж осі часу (абсцис) для зручності детального аналізу;
- додати функцію примусової часової затримки окремих треків, що дозволить проводити самотестування програми та оцінювати точність побудови діаграми спрямованості у контрольованих умовах;
- реалізувати можливість створення нових вкладок для графічного відображення аудіосигналів та видалення існуючих вкладок за вибором користувача;
- передбачити функцію збереження графічного відображення сигналу у вигляді окремого файлу для подальшого аналізу або архівації;
- програма повинна забезпечувати побудову діаграми спрямованості у кожній вкладці, що формується на основі відповідних треків звукових сигналів, аналогічно до представленого прикладу на рисунку 3.3.

Вимоги до області побудови діаграми спрямованості:

- необхідно реалізувати можливість змінювати кількість напрямків у межах від 2 до 300 для підвищення гнучкості аналізу;
- забезпечити урахування відносних відстаней між мікрофонами, приймаючи за одиничну базу відстань між першим і другим мікрофонами.

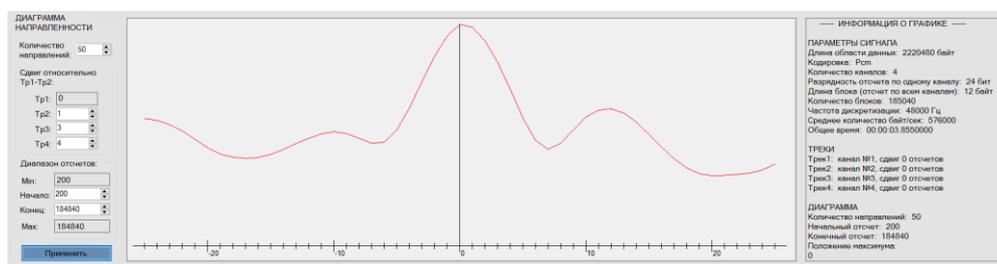


Рисунок 3.2 — Графічне представлення діаграми направленості звукового сигналу

Вхідні канали в аналого-цифровій системі можуть бути розподілені на дві категорії: регулярні (regular) — у кількості до 16, та інжектвані (injected) — до 4.

Порядок їх опитування задається програмно, що дозволяє гнучко налаштувати послідовність вимірювань відповідно до потреб конкретного завдання. Результати перетворення для регулярних каналів записуються в один спільний регістр, тому необхідно забезпечити своєчасне зчитування даних, наприклад, із використанням прямого доступу до пам'яті (DMA). Для інжекттованих каналів передбачено окремі регістри зберігання результатів, що спрощує обробку даних у реальному часі.

Оскільки інжекттовані канали мають підвищений пріоритет, під час їхнього перетворення процес опитування регулярних каналів автоматично призупиняється. Це забезпечує точніше вимірювання для критичних сигналів, які потребують оперативного реагування.

Часові витрати на процес перетворення визначаються двома основними складовими — часом вибірки та часом власне перетворення. Перетворення займає 12 тактів, тоді як вибірка триває 3 такти, що в сумі дає 15 тактів. При роботі з максимальною тактовою частотою 30 МГц, повний цикл перетворення триває всього 0,5 мкс, що дозволяє досягати високої швидкодії при багатоканальних вимірюваннях.

АЦП можуть функціонувати в кількох режимах — здвоєному та розгорнутому, що впливає на швидкість і структуру обробки сигналів. У здвоєному режимі, коли ADC1 та ADC2 працюють синхронно, результати одразу записуються до спільного 32-бітного регістру ADC1, що забезпечує паралельну обробку двох каналів одночасно. У розгорнутому режимі третій перетворювач, ADC3, діє незалежно, не синхронізуючись з іншими, що дозволяє застосовувати його для спеціалізованих або додаткових вимірювань.

Найефективнішим у практичному використанні для систем моніторингу та аналізу низькочастотних сигналів є одночасний режим роботи. У цьому режимі ADC1 послідовно опитує канали у напрямку від 0 до 15 (для регулярних) або від 0 до 3 (для інжекттованих), тоді як ADC2 здійснює обробку у зворотному напрямку — від 15 до 0 чи від 3 до 0 відповідно. Завдяки цьому кожен канал аналізується двічі за один цикл, що значно підвищує достовірність і точність результатів вимірювання [18].

Таким чином, поєднання гнучкої архітектури опитування каналів, високої швидкодії перетворення та можливості одночасної обробки сигналів робить дану систему ефективним інструментом для реалізації високоточних багатоканальних АЦП-комплексів, орієнтованих на акустичні та інженерні застосування (рис. 3.4).

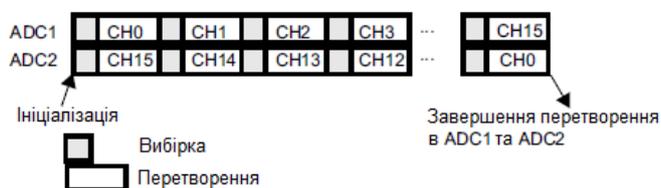


Рисунок 3.3 — Синхронізований подвійний режим обробки регулярних каналів

З огляду на викладене, 12-бітну синхронну обробку чотирьох аналогових каналів доцільно реалізувати на мікроконтролері сімейства STM32F4 за конфігурацією, поданою на рис. 3.5.

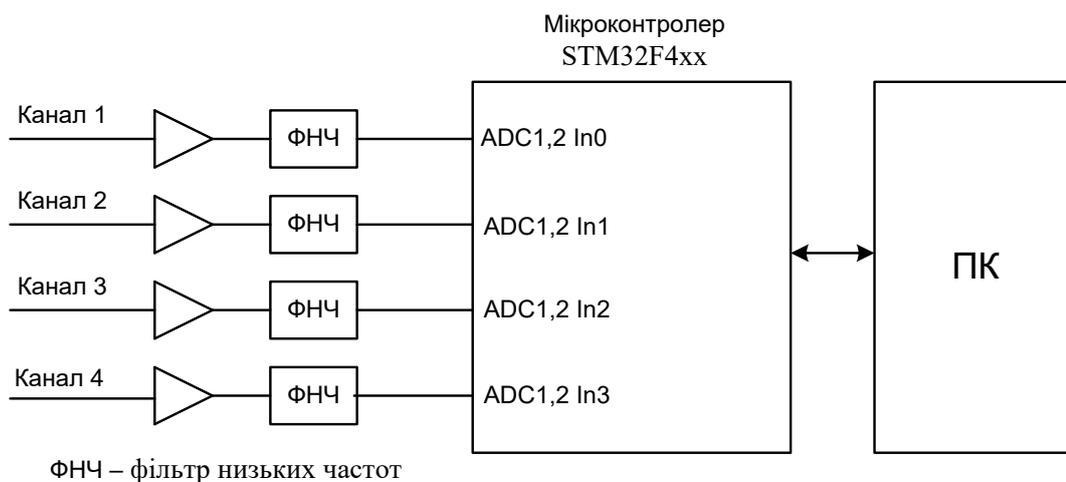


Рисунок 3.4 — Синхронне опрацювання чотирьох аналогових сигналів реалізоване на мікроконтролері серії STM32F4 із застосуванням зведеного паралельного режиму інжекттованих каналів (ADC1,2 Inx — входи інжекттованих каналів для АЦП1 та АЦП2).

У цьому варіанті одночасній обробці підлягають чотири аналогові канали — 1, 2, 3 та 4. Результати аналого-цифрового перетворення відображають миттєві значення сигналів каналів 1 і 2 у момент часу  $t + 2n\Delta t$ , а також сигналів каналів 3 і

4 — у момент  $t + 2(n + 1)\Delta t$ , де  $\Delta t$  позначає інтервал вибірки та перетворення. Під час визначення реальних часових зміщень між сигналами, що надходять через канали 1...4, необхідно враховувати затримку  $\Delta t$  у формуванні результатів для каналів 3 і 4. Компенсувати цю різницю можна програмним способом або апаратно — шляхом введення додаткової часової затримки  $\Delta t$  у відповідні канали. При роботі на максимальній швидкості частота дискретизації кожного каналу становить 1 МГц при генерації кожного 12-бітного результату.

Представлена схема 4-канальної синхронної обробки аналогових сигналів забезпечує ефективне використання ресурсів мікроконтролера, вимагаючи мінімум зовнішніх компонентів. Проте, роздільна здатність квантування обмежується рівнем 12 біт, а процедура калібрування здійснюється лише для вбудованого АЦП, що ускладнює компенсацію відхилень параметрів аналогових елементів та їх довготривалої нестабільності під впливом зовнішніх факторів.

Для усунення цих недоліків запропоновано вдосконалену конструкцію 4-канальної аналого-цифрової системи із функцією самокалібрування, структурна схема якої наведена на рисунку 3.5. Кожен вимірювальний канал системи містить аналоговий комутатор (АК), програмований підсилювач (ПП), антиаліасінговий фільтр низьких частот (АФЧХ), пристрій вибірки-зберігання (ПВЗ), цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) та компаратор (КП). Такий підхід забезпечує не лише покращення точності вимірювання, але й можливість автоматичної компенсації похибок у реальному часі, що значно підвищує стабільність та довготривалу надійність системи.

Система функціонує у двох основних режимах — вимірювання та самокалібрування, що забезпечує не лише точне зчитування даних, а й автоматичне усунення похибок у процесі роботи. У режимі вимірювання аналогові сигнали, які надходять через канали від 1 до 4, передаються аналоговими комутаторами до відповідних програмованих підсилювачів, керованих мікроконтролером.

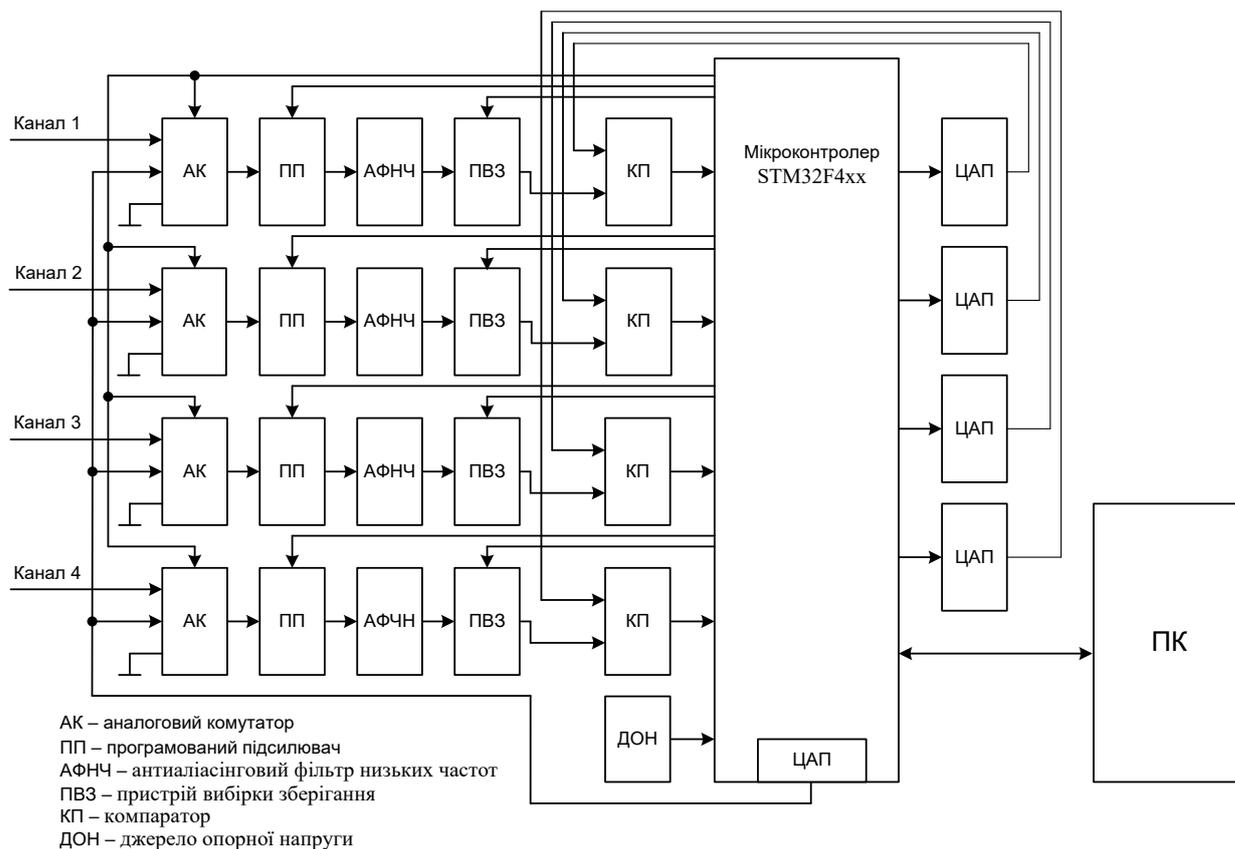


Рисунок 3.5 — Структурна схема 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи

Програмовані підсилювачі виконують кілька важливих функцій: вони перетворюють диференційний сигнал на недиференційний та узгоджують динамічний діапазон вхідного сигналу з робочим діапазоном антиаліасінгових фільтрів низьких частот. Зазвичай підсилювачі реалізуються за класичною різницевою схемою на трьох операційних підсилювачах, однак у точніших системах можуть застосовуватися струмові підсилювачі із симетричними вхідними, проміжними та буферними каскадами, що забезпечує стабільність параметрів за різних зовнішніх умов. Коефіцієнти підсилення можуть мати кілька дискретних рівнів і змінюються незалежно для кожного каналу відповідно до команд мікроконтролера, що дозволяє точно налаштувати підсилення сигналів у всій системі [19].

Антиаліасінгові фільтри нижніх частот обмежують спектри сигналів, запобігаючи накладанню гармонік під час дискретизації. Для цього зазвичай використовуються пасивні RC-фільтри першого або другого порядку, що

дозволяють ефективно пригнічувати високочастотні складові без суттєвих втрат у корисному діапазоні частот. Після проходження через фільтри сигнали надходять на пристрої вибірки-зберігання, які фіксують миттєве значення сигналу в момент вибірки і зберігають його до завершення аналого-цифрового перетворення. Ці пристрої працюють під керуванням синхронізуючих імпульсів, сформованих мікроконтролером, і зазвичай реалізуються на основі накопичувального конденсатора та високошвидкісних аналогових ключів із узгоджувальними підсилювачами.

Процес аналого-цифрового перетворення реалізується мікроконтролером за алгоритмом порозрядного врівноваження у нормованій позиційній системі числення. Для кожного каналу формується 16-бітний двійковий код, який подається на цифро-аналоговий перетворювач, що створює напругу для порівняння з вхідним сигналом. Компаратор визначає момент рівності цих напруг, сигналізуючи мікроконтролеру про завершення циклу перетворення. Отримані цифрові результати передаються на персональний комп'ютер для подальшої обробки через швидкісний інтерфейс, наприклад USB або Ethernet, з апаратною підтримкою від мікроконтролера.

У режимі самокалібрування здійснюється автоматичне коригування статичних і динамічних характеристик усіх вимірювальних каналів. Для кожного коефіцієнта підсилення програмованого підсилювача визначаються зміщення нуля та поправочний масштабний коефіцієнт підсилення. Це виконується шляхом перемикання аналогових комутаторів від зовнішніх сигналів до джерела опорних напруг, яке формується вбудованим 12-бітним цифро-аналоговим перетворювачем на базі джерела опорної напруги. Калібрування відбувається за принципом «зверху донизу»: спочатку перевіряється найбільший вхідний діапазон, після чого поступово переходять до нижчих, уточнюючи параметри підсилення та зменшуючи похибки.

Після завершення процесу калібрування отримані параметри використовуються під час роботи системи для компенсації похибок і узгодження амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик кожного каналу. Таким

чином, система автоматично адаптується до зміни зовнішніх умов і параметрів сигналів, зберігаючи високу точність вимірювань. Адаптація може виконуватися як схемотехнічно, через елементи аналогової частини, так і програмно — шляхом аналізу спектру та цифрового коригування сигналів у мікроконтролері або на персональному комп'ютері.

Отже, побудова вимірювальних каналів на базі мікроконтролерного управління забезпечує можливість не лише самокорекції передатної характеристики аналого-цифрового перетворювача, а й комплексного самокалібрування статичних і динамічних властивостей усіх вимірювальних каналів. Такий підхід гарантує підвищену стабільність, точність і довговічність системи, що робить її придатною для використання в сучасних багатоканальних аналітичних комплексах для моніторингу та дослідження низькочастотних сигналів:

Автоматизовані аналого-цифрові системи (АЦ-системи) є комплексними технічними засобами, що забезпечують інтерактивну взаємодію з оператором, дозволяючи здійснювати вимірювання, контроль та аналіз сигналів у режимі реального часу. Основною вимогою до таких систем є безперервність процесу обробки даних — усі обчислення повинні виконуватися без затримок та втрати інформації, щоб гарантувати достовірність і точність результатів. Це особливо важливо при моніторингу змінних процесів, де навіть короткочасні пропуски сигналів можуть призвести до спотворення результатів аналізу.

Для забезпечення високої точності вимірювань апаратна частина АЦ-системи повинна регулярно проходити процедуру самокалібрування. Така функція дозволяє автоматично усувати похибки, спричинені дрейфом параметрів елементів, температурними впливами або старінням компонентів. Самокалібрування гарантує стабільність параметрів амплітудно-фазових характеристик каналів і збереження узгодженості результатів у багатоканальному середовищі.

Програмна частина АЦ-системи повинна мати модульну архітектуру, що дає змогу розділяти функції між різними програмними блоками. Такий підхід забезпечує паралельне виконання операцій обробки, візуалізації, аудіодетекції та

реконструкції акустичного поля, що суттєво підвищує швидкодію системи. Кожен модуль може бути оптимізований для свого завдання, наприклад, модуль обробки сигналів — для спектрального аналізу, а модуль візуалізації — для побудови графічного представлення акустичних характеристик у реальному часі.

Апаратна частина експериментальних зразків таких систем забезпечує приймання низькочастотних сигналів із чотирьох або восьми вимірювальних каналів, кожен з яких обладнаний малошумним лінійним підсилювачем низьких частот. Це дозволяє зберігати високу роздільну здатність навіть при обробці слабких сигналів. Далі відбувається синхронне аналого-цифрове перетворення сигналів із високою точністю, забезпечуючи їх ідентичність і лінійність амплітудно-фазової частотної характеристики.

Отримані цифрові потоки безперервно передаються на керуючий персональний комп'ютер (ПК) через високошвидкісні інтерфейси, такі як USB або Ethernet. Програмно-апаратний комплекс ПК виконує цифрову обробку сигналів, ідентифікацію об'єктів та відтворення просторових характеристик звукового поля. Завдяки використанню багатоядерних процесорів і технологій паралельного обчислення система здатна одночасно обробляти кілька потоків даних, що прискорює процес обробки та реконструкції акустичного середовища.

Інтегрована система візуалізації відображає результати аудіолокації об'єктів на карті місцевості в реальному часі, демонструючи розташування та типи розпізнаних джерел звуку. Для уточнення координат об'єктів застосовуються сучасні методи нейронечітких технологій, що базуються на рейтингових моделях оцінювання. Такі алгоритми дозволяють адаптивно коригувати результати в залежності від умов середовища, зменшуючи вплив шумів і перешкод.

Оператор системи має змогу вводити команди управління, змінювати режими роботи як апаратної, так і програмної частини, а також виконувати налаштування параметрів у процесі експлуатації. Це забезпечує гнучкість і універсальність системи, дозволяючи використовувати її як у лабораторних дослідженнях, так і в реальних умовах моніторингу акустичних процесів.

Таким чином, сучасна багатоканальна АЦ-система являє собою поєднання інтелектуального програмного забезпечення, високоточних вимірювальних компонентів і потужних алгоритмів обробки, що забезпечують комплексний підхід до збору, аналізу та інтерпретації акустичних сигналів.

Приймання, підсилення та аналого-цифрове перетворення низькочастотних сигналів з чотирьох вимірювальних каналів здійснюється за допомогою спеціально розробленого мікропроцесорного модуля 4-канальної самокоригованої аналого-цифрової системи SADS-M4. Цей модуль виконує не лише функції вимірювання, а й автоматичне коригування характеристик каналів, що забезпечує стабільність точності та повторюваність результатів навіть при тривалій експлуатації в змінних умовах. Його апаратно-програмна архітектура передбачає можливість гнучкого налаштування режимів роботи, включаючи самокалібрування, цифрову обробку сигналів та синхронізований обмін даними з персональним комп'ютером у реальному часі.

У самокоректуючому режимі система виконує комплексне калібрування статичних передатних характеристик та динамічних параметрів амплітудно-фазової частотної характеристики (АФЧХ) для кожного з чотирьох каналів на всіх чотирьох рівнях підсилення. Такий підхід дозволяє автоматично компенсувати відхилення, спричинені технологічними розбіжностями компонентів, температурними впливами чи старінням елементів, що значно підвищує точність вимірювань та зменшує потребу в ручному налаштуванні системи.

Аналого-цифрове перетворення сигналів у системі реалізується з використанням промислових 24-розрядних аудіоінтерфейсів Behringer U-Phoria UMC404HD із фантомним живленням, які гарантують високу роздільну здатність і мінімальні спотворення. Вхідними елементами є високоточні вимірювальні мікрофони Superlux ECM-999, що входять до складу акустичних фазованих решіток із кількістю каналів 2, 4 або 8. Завдяки синхронізації аудіоінтерфейсів усі канали працюють узгоджено, що дозволяє забезпечити одночасне зчитування даних без фазових зсувів між каналами.

Спрощений варіант системи представлений 8-канальною 2-променевою фазованою решіткою, що реалізує функції акустичної обробки місцевості, як показано на рисунку 3.9. У цій конфігурації здійснюється перехресна обробка, яке дозволяє точно визначати координати джерел звуку шляхом обробки сигналів із різних напрямків. Завдяки цьому забезпечується просторове позиціонування об'єктів із високою роздільною здатністю навіть у складних акустичних умовах [20].

Для більш складних сценаріїв моніторингу були створені експериментальні системи із трьома та чотирма променями обробки, які охоплюють більшу кількість мікрофонних каналів і забезпечують розширену зону контролю. Ці багатопроменеві конфігурації використовують алгоритми адаптивного формування променя для ефективного придушення шуму та точного виділення корисного сигналу в умовах високої реверберації. Їх апаратна реалізація базується на вдосконалених схемах підключення аудіоінтерфейсів і модульних мікрофонних решітках, що дозволяє масштабувати систему під конкретні завдання моніторингу та обробки акустичних сигналів.



Рисунок 3.6 — Восьмиканальна конфігурація вхідних підсилювачів-перетворювачів, реалізована на основі професійних аудіоінтерфейсів Behringer U-Phoria UMC404HD

На рисунку 3.7 представлено зразки таких аудіоінтерфейсів із кабельним підключенням вхідних каналів. Вони застосовуються як у лабораторних, так і в польових вимірюваннях для збору акустичних сигналів у низькочастотному діапазоні. Конфігурація мікрофонних систем може змінюватися залежно від умов дослідження: рисунки 3.8 та 3.9 демонструють варіанти виготовлених мікрофонних

стійок для різних типів багатоканальних систем моніторингу та розпізнавання акустичних сигналів.



Рисунок 3.7 — Сійки з мiкрофонними решiтками, що входять до складу вiсьмиканальної двопроменевої аналого-цифрової системи обробки акустичних сигналiв

### 3.2 Спецификація акустичного обладнання

Малошумні лінійні підсилювачі низьких частот застосовуються для ефективного підсилення звукових сигналів із мінімальними спотвореннями. Проведені дослідження та моделювання підтверджують їхню високу стабільність і точність роботи в широкому діапазоні частот. Синхронне аналого-цифрове перетворення сигналів забезпечується завдяки високій роздільній здатності та лінійності, що досягається як схемотехнічними методами струмового перетворення, так і алгоритмами цифрового калібрування динамічних характеристик вимірювальних каналів. Для підвищення надійності передачі даних від віддалених АЦ-перетворювачів використовуються швидкодіючі методи контролю цілісності циклічних кодів. Комп'ютерне апаратно-програмне забезпечення функціонує на основі принципів паралельної, асоціативної та матричної обробки, що дозволяє суттєво скоротити час аналізу сигналів у реальному масштабі часу.

Візуалізація результатів аудіолокації та розпізнавання об'єктів виконується за допомогою покращених алгоритмів аудіодетекції, що дозволяють відокремлювати корисні сигнали від шумових завад. Точність визначення координат об'єктів підвищується завдяки використанню нейронечітких технологій і сучасних методів реконструкції акустичного поля. Мікрофонні решітки є базовим інструментом для просторової візуалізації звукових полів у системах моніторингу. Однак обмежена кількість мікрофонів створює проблему розрідженості даних через нерівномірний розподіл точок фокусування променів. Для компенсації цієї проблеми застосовується метод ретроспективного відтворення звукового тиску, який розв'язує обернену задачу акустичної реконструкції. Мета цього підходу полягає у визначенні координат і потужності звукових джерел за відсутності точних даних про їхню кількість або розташування.

Модель акустичного поля базується на фізичних законах розповсюдження звукової енергії. Класичні методи регуляризації ефективні лише для відомої кількості джерел, тоді як за умов невизначеності параметрів застосовуються статистичні методи, що потребують значних обчислювальних ресурсів. У таких випадках доцільно використовувати нечіткі реляційні моделі, які описують звукове поле через систему нечітких відносин. Множина розв'язків цих рівнянь інтерпретується у вигляді набору правил «ЯКЩО-ТО», що формують базу знань для реконструкції поля. Застосування інтелектуальних алгоритмів ідентифікації дозволяє скоротити кількість експериментів і досягти повнішого опису просторової структури акустичного середовища.

Проблему нестачі даних вирішують шляхом багаторазових вимірювань при різних положеннях мікрофонних решіток, що забезпечує статистично стабільні результати. На основі принципів узгодженості моделей і даних спостереження формується адаптивна діаграма направленості, яка змінюється залежно від геометрії сцени. Завдяки застосуванню методу Монте-Карло визначається оптимальне розташування мікрофонів для досягнення максимальної роздільної здатності при мінімальній кількості вимірювань. Крім того, використання комбінованих методів нечіткої логіки та ймовірнісного моделювання дозволяє

підвищити точність просторової реконструкції навіть за умов високого рівня шуму та флуктуацій сигналу.

### 3.3 Алгоритмічні підходи до аналізу та ідентифікації акустичних даних

У спеціальному інформаційному полі програмного інтерфейсу відображаються текстові дані щодо основних параметрів звукового сигналу, характеристик треків та побудованої діаграми спрямованості. Для різних режимів функціонування системи створено адаптивні алгоритми, принципи роботи яких продемонстровано на рисунках 3.8–3.13. Процес роботи програми розпочинається з етапу завантаження звукового файлу, що здійснюється через діалогове вікно вибору. Після завантаження у першій вкладці автоматично відображаються параметри звукового сигналу, зокрема частота дискретизації, кількість каналів і розрядність. За потреби користувач може створювати додаткові вкладки для візуалізації окремих каналів сигналу у вигляді треків, а також для відображення графічної діаграми спрямованості, яка динамічно формується на основі поточних даних.

Створення цих додаткових вкладок дозволяє провести детальний спектральний та часовий аналіз кожного каналу окремо для виявлення прихованих закономірностей. Центральним елементом аналізу є обчислення коефіцієнтів перетворення Фур'є, яке лежить в основі всіх алгоритмів ідентифікації. Ці алгоритми також інтегрують методи машинного навчання для класифікації акустичних подій та їх джерела. Наступним кроком є виділення інформативних ознак з обробленого сигналу, що є критично важливим для точного розпізнавання. Отримана діаграма спрямованості дає змогу візуально оцінити просторове положення джерела звуку, а високоточна ідентифікація досягається за допомогою зіставлення виділених ознак з еталонною базою даних. Процес виділення ознак часто включає використання кепстральних коефіцієнтів Мела або їхніх аналогів, які ефективно представляють спектральну оболонку звуку. Для підвищення надійності класифікації у складних акустичних середовищах можуть застосовуватися адаптивні методи.

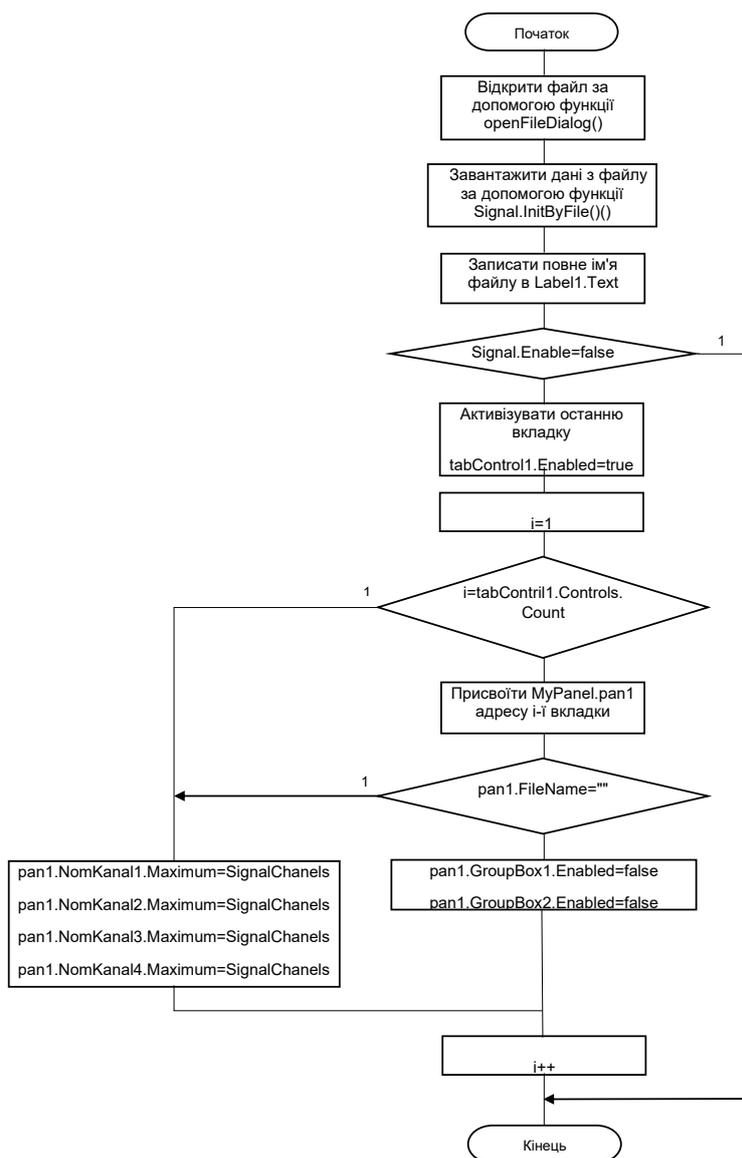


Рисунок 3.8 — Алгоритм завантаження файлу

Після завантаження у першій вкладці автоматично відображаються параметри звукового сигналу, зокрема частота дискретизації, кількість каналів і розрядність. Крім основних параметрів, доцільно відобразити загальну тривалість запису та формат файлу, оскільки це критично важливо для оцінки вимог до обробки та обсягу даних. Ця вкладка також повинна надавати функціональність швидкої валідації.

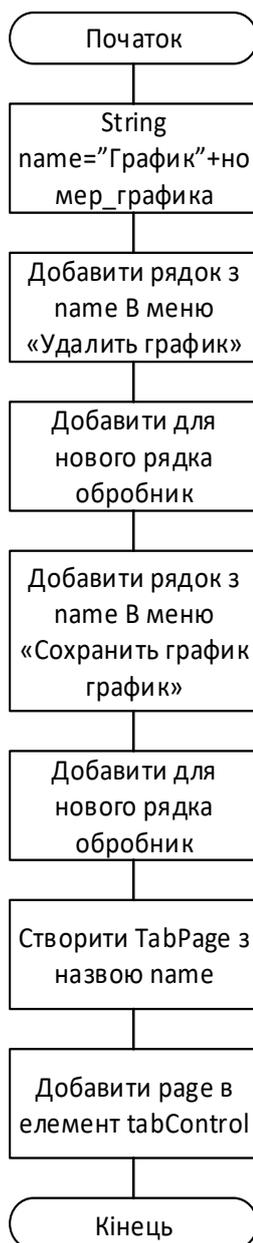


Рисунок 3.9 — Алгоритм створення графічного відображення звукового сигналу.

На рисунку 3.10 зображено графічне відображення звукового сигналу, отримане за допомогою алгоритму вилучення екстремальних значень в часових інтервалах. Кожна вертикальна смуга на графіку, що відповідає одному пікселю по осі X, є результатом компресії тисяч вибірок: її верхня точка відповідає максимальній амплітуді, а нижня – мінімальній амплітуді, виявленій в цьому короткому часовому вікні. Таким чином, цей метод забезпечує візуально точне

представлення загальної огибаючої (envelope) сигналу, відображаючи як загальний рівень, так і наявність піків (кліппінгу) навіть на високих рівнях масштабування.



Рисунок 3.10 — Алгоритм вилучення графічного відображення звукового сигналу.

Процес збереження графічного відображення (осцилограми) звукового сигналу не обмежується простим знімком екрана. Для подальшого аналізу та швидкого завантаження в системі SADS-M4 використовується спеціалізований алгоритм, який кешує або серіалізує вже обчислені графічні дані. Це значно прискорює повторне відображення, особливо для великих аудіофайлів. Крім того, збереження графічних даних у структурованому форматі полегшує реалізацію функції інтерактивного масштабування, дозволяючи швидко перемикатися між різними рівнями деталізації без додаткового навантаження на процесор. Це також забезпечує консистентність відображення на різних пристроях і платформах, оскільки графічні дані, що зберігаються в кеші, не залежать від поточної роздільної здатності екрана, а лише від коефіцієнта редукції. Таким чином, збереження графічного відображення є ключовим елементом архітектури для забезпечення високої швидкодії та плавної взаємодії користувача з великими масивами акустичних даних у реальному часі.



Рисунок 3.11 — Алгоритм збереження графічного відображення звукового сигналу.

Алгоритм на рисунку 3.12 є основною процедурою візуалізації багатоканального звукового сигналу в графічному поданні. Його ключова мета полягає в автоматичному налаштуванні координатних осей і масштабування треків, враховуючи примусові зсуви між каналами та максимальну амплітуду сигналу, щоб забезпечити коректне і зручне для аналізу відображення всіх графіків на екрані. Фінальні кроки включають безпосереднє промальовування треків та осей, а також адаптацію інтерфейсу користувача.

Це комплексне початкове налаштування є фундаментальним для подальшого інтерактивного аналізу, оскільки всі операції, такі як вимірювання чи редагування, базуються на точному і масштабованому представленні сигналу, яке задає цей алгоритм. Визначення максимальних зсувів та амплітуд забезпечує оптимальне використання робочої області екрана, запобігаючи обрізанню важливих піків сигналу або надмірному стисненню, що ускладнює візуальне сприйняття.

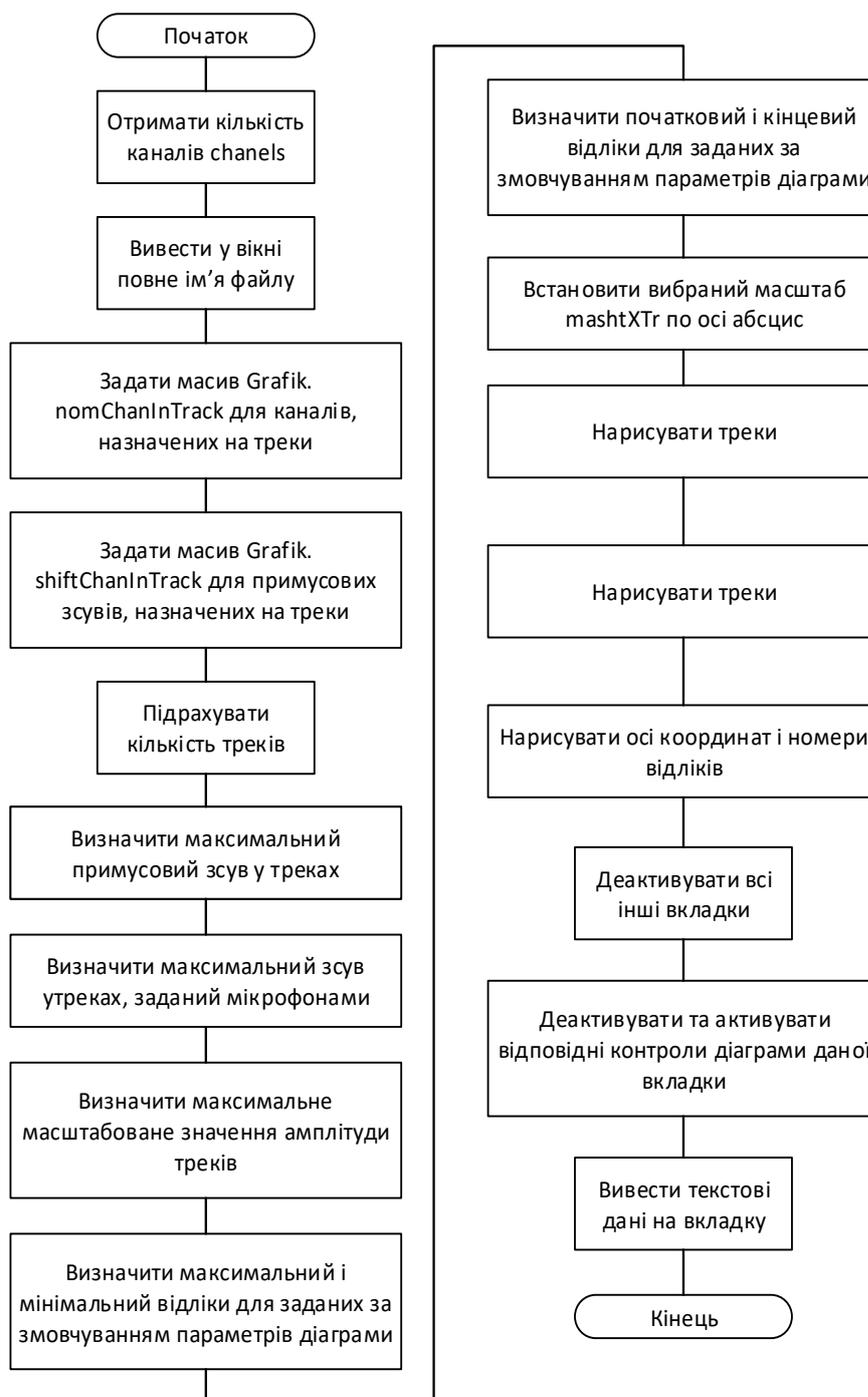


Рисунок 3.12 — Алгоритм візуалізації графіків у графічному поданні звукового сигналу.

Алгоритм, зображений на рисунку 3.13, деталізує процедуру відображення діаграми спрямованості акустичного сигналу в графічному поданні. Ця процедура є критично важливою для систем, що використовують мікрофонні решітки (наприклад, SADS-M4), оскільки вона візуалізує просторові характеристики звуку.

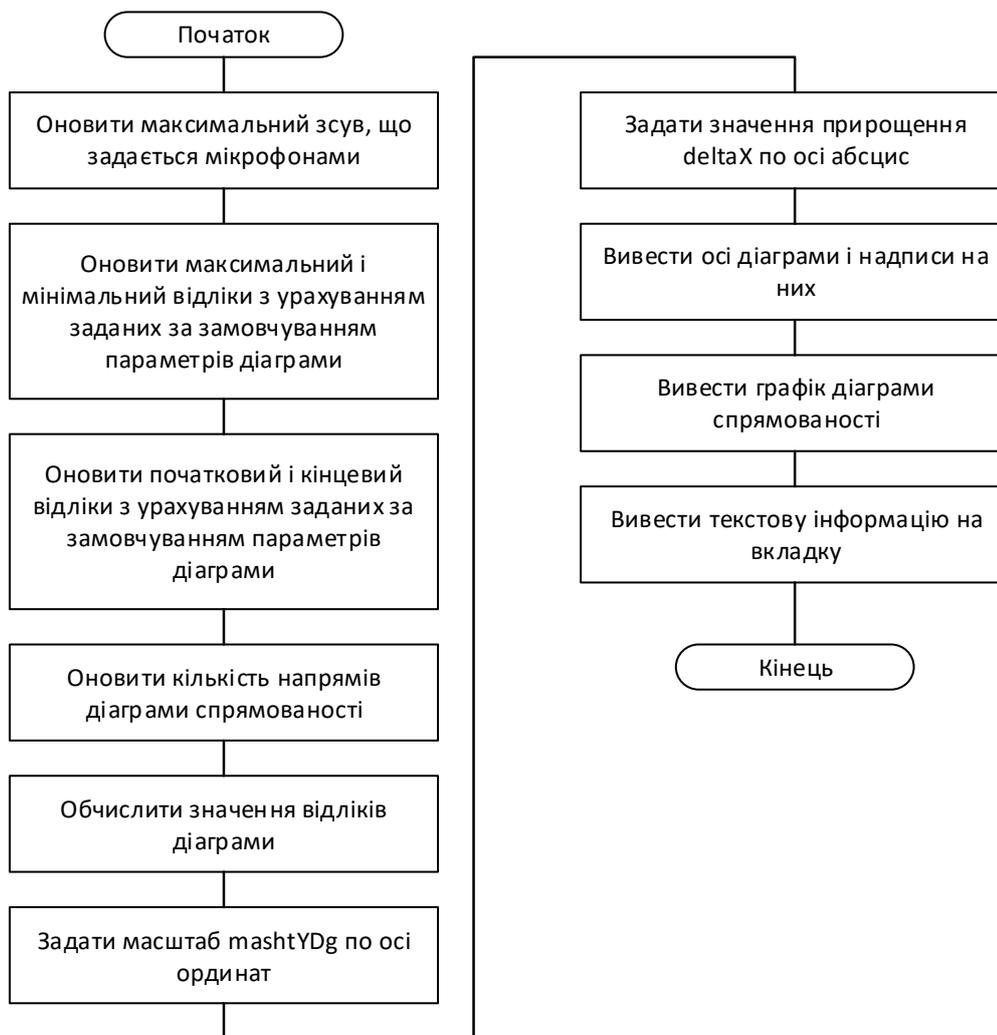


Рисунок 3.13 — Алгоритм відображення діаграми спрямованості у графічному поданні звукового сигналу.

### 3.4 Взаємодія з користувачем

Програмне забезпечення повинно автоматично визначати допустимі межі номерів відліків для побудови діаграми спрямованості, враховуючи кількість напрямків аналізу та відносні відстані між мікрофонами. Користувач отримує можливість вручну задавати кількість відліків у межах визначених мінімальних і максимальних значень, що забезпечує гнучкість та точність аналізу. У процесі формування діаграми система має відображати позиції екстремальних значень сигналу (пікових амплітуд) на осі ординат, що дозволяє наочно ідентифікувати напрямки з максимальною інтенсивністю звукового поля.

## 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТИ

### 4.1 Вибір апаратного забезпечення

Ефективним і зручним способом реалізації багатоканальної цифрової обробки аналогових сигналів є використання сучасних мікроконтролерів. Вони вирізняються не лише високою швидкістю, а й великою кількістю вбудованих периферійних модулів, що забезпечують широкі можливості для побудови вимірювальних і керуючих систем. Серед таких пристроїв особливу роль відіграють 32-бітні мікроконтролери на базі архітектури ARM (Advanced RISC Machines), розробленої однойменною британською компанією, яка займається проектуванням процесорних ядер і наданням ліцензій на їх використання. Виробники інтегрують ці ядра з пам'яттю та різними периферійними блоками, створюючи власні модифікації мікроконтролерів. Завдяки цьому на ринку представлено велику кількість ARM-рішень від десятків виробників.

Подальший розвиток цієї архітектури втілено у серії процесорів Cortex, що забезпечують підвищену продуктивність, простоту програмування та низьку енергоспоживаність. Завдяки оптимальній структурі системи переривань і широкому набору інструкцій, мікроконтролери Cortex отримали значне поширення в сучасних електронних системах. Для реалізації багатоканальної цифрової обробки аналогових сигналів найдоцільніше застосовувати мікроконтролери з ядром Cortex-M, які поєднують високу ефективність, гнучкість і відносно невелику вартість. Вони широко використовуються в інтелектуальних вимірювальних системах, промислових контролерах, автомобільній електроніці, медичних приладах і пристроях автоматизації [21].

Особливу популярність здобули мікроконтролери серії STM32, що випускаються компанією STMicroelectronics. Вони характеризуються оптимальним співвідношенням вартості та функціональності, наявністю детальної технічної документації, підтримкою численних середовищ розробки, включно з безкоштовними інструментами, а також доступністю бібліотек і прикладів для роботи з периферією. Це значно полегшує процес створення нових систем і скорочує терміни розробки.

Серед продукції STM32 окремої уваги заслуговує лінійка STM32F4, побудована на ядрі Cortex-M4. Ці мікроконтролери мають апаратну підтримку цифрової обробки сигналів (DSP) і виконання операцій з плаваючою комою (FPU), що робить їх ідеальними для реалізації складних алгоритмів аналізу та фільтрації сигналів у реальному часі. Вони поєднують високі обчислювальні можливості, розширену периферію та низьке енергоспоживання, забезпечуючи стабільну роботу у вимірювальних системах різного рівня складності.

Основні технічні характеристики мікроконтролерів серії STM32F4 можна узагальнити.

Вони побудовані на основі 32-бітного ядра ARM Cortex-M4, що працює з тактовою частотою до 168 МГц і забезпечує продуктивність до 210 DMIPS (приблизно 1,25 DMIPS/МГц). Архітектура підтримує DSP-інструкції, що дозволяє виконувати цифрову обробку сигналів у реальному часі. Високопродуктивна АНВ-матриця шин забезпечує швидку взаємодію між ядром, пам'яттю та периферійними пристроями;

Мікроконтролери оснащені до 1 Мбайта енергонезалежної Flash-пам'яті та до 192 + 4 Кбайт оперативної пам'яті SRAM. Робоча напруга пристрою становить від 1,8 до 3,6 В, при цьому реалізовано захисти POR, PDR, PVD і BOR. Є вбудовані RC-генератори частотою 16 МГц і 32 кГц, а також можливість підключення зовнішніх джерел тактування (4–26 МГц для основного генератора і 32,768 кГц для годинника реального часу RTC);

Для налагодження системи передбачені модулі SWD, JTAG і ETM. Аналого-цифрове перетворення здійснюється за допомогою трьох 12-бітних АЦП, що підтримують до 24 вхідних каналів із максимальною швидкістю 7,2 мегасемплів на секунду, а також мають вбудований температурний сенсор. Цифро-аналогове перетворення реалізовано через два 12-бітові ЦАП;

Передача даних здійснюється за допомогою DMA-контролера, який підтримує до 16 потоків і пакетну передачу. Для керування процесами передбачено 17 таймерів різної розрядності (16- та 32-бітні), два сторожові таймери (WDG та IWDG) та розвинену систему переривань;

Серед комунікаційних інтерфейсів підтримуються I<sup>2</sup>C, USART (із підтримкою стандартів ISO 7816, LIN, IrDA), SPI, I<sup>2</sup>S, CAN 2.0B Active, USB 2.0 FS/HS OTG, а також Ethernet MAC 10/100 з підтримкою IEEE 1588v2 (MII/RMII). Крім того, доступний SDIO-контролер для SD, SDIO, MMC і CE-ATA, а також інтерфейс цифрової камери, який підтримує 8-, 10-, 12- та 14-бітові режими передавання даних. Для підключення зовнішньої пам'яті або дисплеїв передбачено контролер FSMC, що забезпечує роботу з Compact Flash, SRAM, PSRAM, NOR, NAND та LCD з інтерфейсами 8080/6800;

Додатково мікроконтролери серії STM32F4 оснащені апаратним генератором випадкових чисел, який підвищує рівень безпеки при реалізації криптографічних алгоритмів. Для контролю цілісності даних реалізовано модуль апаратного обчислення CRC, а також інтегровано унікальний 96-бітний ідентифікаційний номер пристрою, що використовується для автентифікації та захисту системи;

Безпекові можливості підсилюються апаратним модулем шифрування, який підтримує алгоритми AES (128, 192, 256 біт), Triple DES, HASH (MD5, SHA-1) та HMAC. Завдяки цьому мікроконтролери STM32F4 придатні для застосування у відповідальних системах, що потребують високої надійності, безпеки та точності обробки даних [22].

Загалом, мікроконтролери цієї серії поєднують високу обчислювальну потужність, розвинену периферію та енергетичну ефективність, що робить їх оптимальними для реалізації задач цифрової обробки сигналів, систем моніторингу, аудіоаналізу та керування складними технічними об'єктами.

#### 4.2 Вибір програмного забезпечення

Спеціалізоване програмне забезпечення системи виконує комплекс функцій, необхідних для багатоканальної цифрової обробки сигналів:

— воно забезпечує приймання цифрових даних із каналів 1–4 та 5–8 через інтерфейси USB, здійснює буферизацію сигналів у двох незалежних буферах протягом 3–5 секунд, виконує електронну обробку з формуванням заданої кількості напрямків від 20 до 50 на основі зсувів і підсумовування чотирьохканальних

відліків. На основі отриманих даних програма обчислює матрицю координатних рівнів за коефіцієнтами кореляції між сигналами з різних напрямків, визначає максимальні кореляційні значення для ідентифікації джерел звуку та відображає графічне представлення інтенсивності звукових сигналів у координатному просторі;

— окрім цього, система реалізує виділення та візуалізацію акустичних об'єктів із використанням нейронечітких методів, виконує розпізнавання (аудіодетекцію) типів сигналів із найвищими коефіцієнтами кореляції та забезпечує оновлення циклу обробки даних у реальному часі;

— програмне забезпечення підсистеми розпізнавання аудіосигналів має підтримувати вхідний формат \*.wav з частотою дискретизації не вище 48 кГц і розрядністю 16 або 24 біти. Обробка здійснюється шляхом рівномірного розбиття сигналу на фрейми тривалістю 10 мс, при цьому мінімальна тривалість розпізнаваного сигналу становить 0,5 с, а відношення сигнал/шум має бути не нижче 30 дБ. Час затримки прийняття рішення не перевищує 200 мс, а ймовірність правильного розпізнавання перевищує 0,8. У системі передбачено словник аудіосигналів обсягом щонайменше 30 записів;

— конструктивно вимірювальна частина експериментальних зразків складається з чотирьох мікрофонних решіток, кожна з яких містить по чотири вимірювальні мікрофони, чотирьох модулів аналого-цифрового перетворення та керуючого ПК (стаціонарного або ноутбука), розміщеного у захищеному від погодних впливів середовищі. Система стабільно функціонує в діапазоні температур від  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , забезпечуючи точну обробку та візуалізацію акустичних даних у різних умовах експлуатації.

### 4.3 Аналіз результатів

Проектування вимірювальних каналів у розроблюваних аналого-цифрових системах можливе із застосуванням мікроконтролерних блоків керування, що забезпечує не лише автоматичну корекцію передатних характеристик АЦП, але й

комплексну самокалібровку статичних та динамічних параметрів вимірювальних каналів.

Одним із варіантів реалізації обробки звукових сигналів є використання компенсуючих ЦАП за принципом порозрядного врівноваження, який забезпечує високу точність цифрового відтворення аналогових параметрів. Для створення керуючого блоку експериментальної 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи було обрано мікроконтролер сімейства STM32F4, а саме STM32F407VET6.

Цей мікроконтролер вирізняється високою продуктивністю, широкими можливостями для цифрової обробки сигналів, а також наявністю апаратної підтримки периферійних модулів, необхідних для побудови багатоканальних систем. Крім того, для STM32F407 існує значна кількість налагоджувальних плат, зокрема Discovery F4 STM32F407, а також відкриті бібліотеки та приклади, що суттєво спрощують процес розробки та налагодження системи. Експериментальний зразок такого мікроконтролерного блоку подано на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 — Демонстраційний прототип модуля SADS-4М багатоканальної аналого-цифрової системи

Для реалізації 4-канальної аналого-цифрової системи було обрано мікросхему ЦАП AD5665 від Analog Devices, що поєднує високу точність, стабільність параметрів і надійність роботи. Вона містить чотири незалежні 16-розрядні цифро-аналогові перетворювачі з буферизованими виходами, які функціонують у діапазоні напруг від 2,7 до 5,5 В. Мікросхема має вбудовані

джерела опорної напруги 1,25 В і 2,5 В, а також підтримує зовнішні джерела для підвищення точності калібрування. Керування здійснюється через універсальний послідовний інтерфейс, що забезпечує сумісність із різними цифровими системами [23].

У вхідних каскадах використовуються операційні підсилювачі OP275A, комутатори ADG709 і програмовані підсилювачі AD8251, які відзначаються високою швидкістю, низьким рівнем шумів та мінімальними нелінійними спотвореннями. Таке компонування забезпечує оптимальну якість сигналу на всіх етапах аналого-цифрового перетворення. Операційний підсилювач OP275A реалізує два високоточні канали з комбінованою біполярною та JFET-структурою, що гарантує стабільність параметрів навіть при зміні температури.

Мультиплектори DA7–DA10 організують вибір активного каналу, керованого мікроконтролером STM32F4, тоді як програмовані підсилювачі забезпечують автоматичне регулювання коефіцієнта підсилення для кожного тракту. Схема також містить антиаліасінгові фільтри першого порядку, що запобігають появі високочастотних перешкод і покращують якість відтворення сигналу.

Система керування напругою реалізована за допомогою 4-канального ЦАП, який задає рівні живлення через SPI-інтерфейс під контролем мікроконтролера. Для стабілізації напруги використовується джерело опорної напруги ADR03. Передача даних до комп'ютера відбувається через інтерфейси USB або Bluetooth, а живлення подається від порту USB або зовнішнього акумулятора.

Експериментальний модуль SADS-M4 повністю відповідає сучасним вимогам до багатоканальних АЦ-систем: він забезпечує синхронну обробку сигналів із високою роздільною здатністю, мінімальним рівнем спотворень і можливістю автоматичного калібрування. Крім того, конструкція модуля передбачає масштабованість — до 8 або більше каналів — і адаптацію для використання в мобільних або стаціонарних акустичних системах моніторингу.

Технології візуалізації акустичного простору на основі мікрофонних решіток активно застосовуються для контролю та моніторингу відкритих територій.

Відновлення акустичного поля здійснюється шляхом розв'язання обернених задач, що дозволяє визначати просторовий розподіл джерел звуку. Класичні методи регуляризації передбачають наявність відомої кількості розріджених джерел і достатньої кількості вимірювань, що забезпечує стабільність результатів реконструкції. [24]

Через фізичні обмеження мікрофонних решіток часто виникає невизначеність у даних, спричинена нерівномірним розташуванням фокальних точок. У ближній зоні для цього використовують методи деконволюції, тоді як у дальній зоні експерименти проводяться з варіацією положення решітки для досягнення оптимальної геометрії вимірювань.

Багатовимірною невизначеністю у таких системах описується моделями з нечіткими та інтервальними параметрами, а для складних гібридних конфігурацій використовуються комбіновані підходи моделювання. Зменшення кількості вимірювань досягається за рахунок фокусування акустичного поля з використанням Байєсових методів оцінювання.

Якість реконструкції акустичного зображення прямо залежить від кількості сенсорів, однак збільшення числа мікрофонів підвищує вартість системи та навантаження на обчислювальні ресурси. Для оптимізації цього процесу застосовується нечітка база знань типу II, що дозволяє адаптивно моделювати акустичну поверхню. Налаштування параметрів джерел виконується за допомогою генетичних алгоритмів, які забезпечують ефективний баланс між точністю реконструкції та вартістю обладнання [25].

## **5 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОБРАХУНКУ АКУСТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ В БАГАТОКАНАЛЬНІЙ АНАЛОГОВО-ЦИФРОВІЙ СИСТЕМІ**

5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі

У сучасних умовах швидкого розвитку цифрових технологій зростає потреба у високоточного збору та обробки акустичних сигналів у реальному часі. Багатоканальні аналогово-цифрові системи відіграють ключову роль у таких сферах, як технічна діагностика, безпека, телекомунікації та наукові дослідження, де якість обробки сигналів визначає ефективність кінцевих рішень. Відтак удосконалення методів і засобів цифрової обробки акустичної інформації є стратегічно важливим для забезпечення надійності та конкурентоспроможності відповідних технічних систем.

З огляду на стрімкий розвиток алгоритмів цифрової фільтрації, спектрального аналізу та машинного навчання виникає необхідність комплексного оцінювання існуючих рішень. Це дозволяє визначити їх відповідність сучасним технологічним вимогам, встановити потенціал інтеграції новітніх методів та забезпечити оптимальне використання апаратних ресурсів багатоканальних АЦП-систем. Такий аналіз є ключовим для підвищення продуктивності та зниження вартості впровадження.

Комерційний та технологічний аудит методів і засобів обробки акустичних сигналів у багатоканальній аналогово-цифровій системі передбачає комплексну оцінку їх технічного рівня, інноваційності, економічної доцільності та готовності до практичного застосування. У процесі аудиту досліджуються ефективність алгоритмів обробки, використання апаратних ресурсів, масштабованість, надійність та відповідність галузевим стандартам. Результати такого аудиту дозволяють визначити конкурентоспроможність розробки, оцінити її комерційний потенціал та сформулювати рекомендації щодо вдосконалення або впровадження в

реальні технічні системи. Для проведення комерційного та технологічного аудиту залучаємо 3-х незалежних експертів, якими є провідні викладачі випускової або спорідненої кафедри.

Оцінювання науково-технічного рівня методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі та її комерційного потенціалу здійснюємо із застосуванням п'ятибальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, а результати зводимо до таблиці 1.

Таблиця 5.1 — Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі

Критерії	Експерти		
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3
	Бали, виставлені експертами		
Технічна здійсненність концепції	2	2	2
Ринкові переваги (наявність аналогів)	2	2	3
Ринкові переваги (ціна продукту)	3	3	3
Ринкові переваги (технічні властивості)	3	2	3
Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	2	3	2
Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	2	3
Ринкові перспективи (конкуренція)	2	3	2
Практична здійсненність (наявність фахівців)	3	2	3
Практична здійсненність (наявність фінансів)	3	3	2
Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	2	2	2
Практична здійсненність (термін реалізації)	3	3	3
Практична здійсненність (розробка документів)	2	2	3
Сума балів	30	29	31
Середньоарифметична сума балів, СБ	30		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 1 робимо висновок про те, що науково-технічний рівень та комерційний потенціал методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі – вищий середній.

## 5.2 Розрахунок витрат на здійснення розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі

Витрати на оплату праці. Належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці, також будь-які види грошових і матеріальних доплат, які належать до елемента «Витрати на оплату праці».

Основна заробітна плата дослідників. Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховують відповідно до посадових окладів працівників, за формулою:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.1)$$

де  $k$  — кількість посад дослідників, залучених до процесу дослідження;

$M_{ni}$  — місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.;

$T_p$  — число робочих днів в місяці; приблизно  $T_p = (21 \dots 23)$  дні, приймаємо 22 дні;

$t_i$  — число робочих днів роботи розробника (дослідника).

Зроблені розрахунки зводимо до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 — Витрати на заробітну плату дослідників

Посада	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник	52 000	2364	43	101636
Розробник	45 000	2045	43	87955
Консультанти	48 000	2182	20	43636
Всього:	233227			

Основна заробітна плата робітників. Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт розраховують за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.2)$$

де  $C_i$  — погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

$t_i$  — час роботи робітника на виконання певної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.3)$$

де  $M_m$  — розмір прожиткового мінімуму працездатної особи або мінімальної місячної заробітної плати (залежно від діючого законодавства), у 2025 році  $M_m=8000$  грн;

$K_i$  — коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду;

$K_c$  — мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати, складає 1,1;

$T_p$  — середня кількість робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 21 \dots 23$  дні, приймаємо 22 дні;  $t_{зм}$  — тривалість зміни, год., приймаємо 8 год.

Таблиця 5.3 — Витрати на заробітну плату робітників

Найменування робіт	Трудомісткість, н-год.	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка	Тариф. коэф.	Величина, грн.
Налаштування та обслуговування робочої станції	80	6	72,5	1,45	5800
Розробка мікросервісів системи	150	6	72,5	1,45	10875
Реалізація ML- алгоритмів ціноутворення	180	4	63,5	1,27	11430
Інтеграція з хмарними сервісами	120	4	63,5	1,27	7620
Всього					35725

Додаткова заробітна плата. Додаткова заробітна плата  $Z_d$  всіх розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховується як (10...12)% від суми основної заробітної плати всіх розробників та робітників, тобто:

$$Z_d = 0,1 \cdot (Z_o + Z_p) = 0,1 \cdot (233227 + 35725) = 26895 \text{ грн.}$$

Відрахування на соціальні заходи. Нарахування на заробітну плату  $H_{зп}$  розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$H_{зп} = \beta \cdot (Z_o + Z_p + Z_d) = \quad (5.4)$$

$$H_{зп} = 0,22 \cdot (233227 + 35725 + 26895) = 65086 \text{ грн.}$$

де  $Z_o$  — основна заробітна плата розробників, грн.;

$Z_p$  — основна заробітна плата робітників, грн.;

$Z_d$  — додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

$\beta$  — ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, % (приймаємо для 1-го класу професійності ризику 22%).

Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт. Вартість спецустаткування визначається за прейскурантом гуртових цін або за даними базових підприємств за відпускними і договірними цінами.

$$V_{\text{спец}} = \sum_1^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.5)$$

де  $C_i$  — ціна придбання спецустаткування і-го виду, грн.;

$C_{\text{пр.і}}$  — кількість одиниць спецустаткування відповідного виду, шт.;

$K_i$  — коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = (1,1 \dots 1,15)$ ;  $n$  — кількість видів спецустаткування.

Таблиця 5.4 — Витрати на придбання спецустаткування

Найменування спецустаткування	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість спецустаткування, грн.
Комп'ютер та периферія (Asus Rog Strix)	#####	1	32000
DevOps інструменти та CI/CD платформи	#####	1	25000
3D-рентген система/мікроскоп для аналізу друкованих плат	1200000	1	1200000
Всього, з врахуванням коефіцієнта транспортних витрат			1382700

Амортизація обладнання. Амортизація обладнання, комп'ютерів та приміщень, які використовувались під час (чи для) виконання даного етапу роботи.

У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування  $A$  в цілому бути розраховані за формулою:

$$A = \frac{Ц_б}{T_в} \cdot \frac{t}{12}, \quad (5.6)$$

де  $Ц_б$  — загальна балансова вартість всього обладнання, комп'ютерів, приміщень тощо, що використовувались для виконання даного етапу роботи, грн.;

$t$  — термін використання основного фонду, місяці;

$T_v$  — термін корисного використання основного фонду, роки.

Таблиця 5.5 — Амортизаційні відрахування за видами основних фондів

Найменування	Балансова вартість, грн.	Строк корисного використання, років	Термін використання, місяців	Сума амортизації, грн.
Комп'ютер та периферія(Asus Rog Strix)	32 000	3	1,95	1733,3
Офісне обладнання (меблі)	25 000	5	1,95	812,5
Приміщення	1 200 000	20	1,95	9750,0
Всього	12295,8			

Витрати на електроенергію для науково-виробничих цілей. Витрати на силову електроенергію  $V_e$ , якщо ця стаття має суттєве значення для виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

Таблиця 5.6 — Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Потужність, кВт	Тривалість годин роботи
Комп'ютер та перифері (Asus Rog Strix)	0,30	344

$$V_e = \sum \frac{W_i \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{впн}}{ККД} = \frac{0,3 \cdot 344 \cdot 4,32 \cdot 0,75}{0,98} = 341,2 \text{ грн.},$$

де  $W_i$  — встановлена потужність обладнання, кВт;

$t_i$  — тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год.;

$C_e$  — вартість 1 кВт електроенергії, 4,32 грн.;

$K_{впн}$  — коефіцієнт використання потужності;

ККД — коефіцієнт корисної дії обладнання.

Інші витрати. До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуються як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_{IB} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{N_{IB}}{100\%} = (233227 + 35725) \cdot \frac{65}{100} = 174819 \text{ грн.},$$

де  $N_{IB}$  — норма нарахування за статтею «Інші витрати».

Накладні (загальновиробничі) витрати. До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуються як 100...200% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$V_{H3B} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{N_{H3B}}{100\%} = (233227 + 35725) \cdot \frac{150}{100} = 309295 \text{ грн.},$$

де  $N_{H3B}$  — норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати».

Витрати на проведення розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі. Витрати на проведення науково-дослідної роботи розраховуються як сума всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{\text{заг}} = 233227 + 35725 + 26895 + 65086 + 1382700 + 12295,8 + 341,2 + 174819 + 309295 = 2240385 \text{ грн.}$$

Загальні витрати. Загальні витрати ЗВ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи з розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі та оформлення її результатів розраховуються за формулою:

$$ЗВ = \frac{2240385}{0,5} = 4480770 \text{ грн.,}$$

де  $\eta$  — коефіцієнт, що характеризує етап виконання науково-дослідної роботи.

Оскільки, якщо науково-технічна розробка знаходиться на стадії розробки дослідного зразка, то  $\eta=0,5$ .

5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі за її можливої комерціалізації потенційним інвесторам

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів тієї чи іншої науково-технічної розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

В даному випадку відбувається розробка засобу, тому основу майбутнього економічного ефекту буде формувати, збільшення кількості споживачів, яким надається відповідна інформаційна послуга в аналізовані періоди часу, кількість споживачів, яким надавалась відповідна інформаційна послуга у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, вартість послуги у році до впровадження інформаційної системи, зміна вартості послуги (зростання

чи зниження) від впровадження результатів науково-технічної розробки в аналізовані періоди часу.

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора  $\Delta\Pi$  для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховується за формулою:

$$\Delta\Pi = (\pm\Delta\Pi_0 \cdot N + \Pi_0 \cdot \Delta N_i)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{100}\right), \quad (5.7)$$

де  $\pm\Delta\Pi$  — зміна основного якісного показника від впровадження результатів науково-технічної розробки в аналізованому році;

$N$  — основний кількісний показник, який визначає величину попиту на аналогічні чи подібні розробки у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки;

$\Pi_0$  — основний якісний показник, який визначає ціну реалізації нової науково-технічної розробки в аналізованому році;

$\Pi_6$  — основний якісний показник, який визначає ціну реалізації існуючої (базової) науково-технічної розробки у році до впровадження результатів;

$\Delta N$  — зміна основного кількісного показника від впровадження результатів науково-технічної розробки в аналізованому році;

$\lambda$  — коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість,  $\lambda = 0,8333$ ;

$\rho$  — коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту (послуги), рекомендується брати  $\rho = 0,2 \dots 0,5$ ;  $\vartheta$  — ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2025 році  $\vartheta = 18\%$ .

Очікуваний термін життєвого циклу розробки 3 роки, тому:

$$\Delta\Pi_1 = 19463112 \text{ грн.}$$

$$\Delta\Pi_2 = 21512292 \text{ грн.}$$

$$\Delta\Pi_3 = 23151636 \text{ грн.}$$

Ц0, грн.	N, шт.	ΔЦ0, грн.	ΔN, шт.	Цб, грн.	N0, шт.
400	225000	199600	224975	200000	25
400	250000	199600	249975	200000	25
400	270000	199600	269975	200000	25

Далі розраховують приведену вартість збільшення всіх чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі:

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t} = \frac{19463112}{(1 + 0,1)^1} + \frac{21512292}{(1 + 0,1)^2} + \frac{23151636}{(1 + 0,1)^3} = 52866658 \text{ грн.},$$

де  $\Delta\Pi_i$  — збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн.;

$T$  — період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки (приймаємо  $T=3$  роки);

$\tau$  — ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні,  $\tau = 0,05 \dots 0,15$ ;

$t$  — період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

Далі розраховують величину початкових інвестицій  $PV$ , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі. Для цього можна використати формулу:

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot 3B = 5 \cdot 4480770 = 22403851 \text{ грн.}$$

де  $k_{\text{інв}}$  — коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі та її комерціалізацію.

Це можуть бути витрати на підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо; зазвичай  $k_{\text{інв}} = 1 \dots 5$ , але може бути і більшим;  $ZB$  — загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, грн.

Тоді абсолютний економічний ефект  $E_{\text{абс}}$  або чистий приведений дохід для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі становитиме:

$$E_{\text{абс}} = \text{ПП} - \text{PV} = 52866658 - 22403851 = 30462807 \text{ грн.},$$

де  $\text{ПП}$  — приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі, грн.;

$\text{PV}$  — теперішня вартість початкових інвестицій, грн.

Оскільки  $E_{\text{абс}} > 0$ , то можемо припустити про потенційну зацікавленість у розробці методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі.

Для остаточного прийняття рішення з цього питання необхідно розрахувати внутрішню економічну дохідність  $E_v$  або показник внутрішньої норми дохідності вкладених інвестицій та порівняти її з так званою бар'єрною ставкою дисконтування, яка визначає ту мінімальну внутрішню економічну дохідність, нижче якої інвестиції в будь-яку науково-технічну розробку методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі вкладати буде економічно недоцільно.

Внутрішня економічна дохідність інвестицій  $E_B$ , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі, розраховується за формулою:

$$E_B = \sqrt[3]{1 + \frac{30462807}{22403851}} = 0,79,$$

де  $T_{ж}$  — життєвий цикл розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі, роки.

Далі розраховуємо період окупності інвестицій  $T_o$ , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі:

$$T_o = \frac{1}{0,79} = 1,27 \text{ роки.}$$

Оскільки  $T_o < 1 \dots 3$ -х років, то це свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження цієї розробки методів та засобів обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі та виведення її на ринок.

Проведений комерційний та технологічний аудит методів і засобів обробки акустичних сигналів у багатоканальній аналогово-цифровій системі засвідчив достатньо високий науково-технічний рівень розробки та її перспективність для подальшого впровадження. Оцінювання експертами підтвердило відповідність розробки сучасним технологічним вимогам, наявність вагомих ринкових переваг та реальні можливості її практичної реалізації. Середньоарифметичний бал, що

перевищує середній рівень, свідчить про конкурентоздатність розроблених методів та засобів у контексті сучасних викликів цифрової обробки акустичної інформації.

Економічні розрахунки вказують на те, що загальні витрати на виконання науково-технічної роботи становлять 4480770 грн, а обсяг необхідних інвестицій для її впровадження оцінюється на рівні 22403851 грн. Водночас очікуване зростання прибутку потенційного інвестора протягом трирічного періоду дорівнює 52866658 грн, що забезпечує значний абсолютний економічний ефект у розмірі 30462807 грн. Це свідчить про високий рівень економічної результативності від реалізації проєкту.

Додатково встановлено, що внутрішня норма дохідності становить 0,79, а період окупності – лише 1,27 року, що є надзвичайно сприятливими показниками для інноваційних розробок. Таким чином, розробка методів і засобів обробки акустичних сигналів у багатоканальній аналогово-цифровій системі має суттєвий комерційний потенціал і високу інвестиційну привабливість. Це дозволяє стверджувати, що її впровадження є економічно доцільним, технологічно обґрунтованим і перспективним для подальшого розвитку ринку високоточної цифрової обробки сигналів.

## ВИСНОВКИ

Розроблено вдосконалені структури апаратних компонентів багатоканальних систем аналого-цифрового перетворення, цифрової обробки та моніторингу низькочастотних сигналів. Проведено детальний аналіз статичних і динамічних характеристик АЦП та ЦАП на основі неперервно-послідовних схем і вимірювальних каналів, запропоновано нові підходи до контролю, калібрування та підвищення стабільності параметрів системи.

Обґрунтовано використання мікроконтролерних засобів для реалізації багатоканального АЦ-перетворення, доведено ефективність побудови вимірювальних каналів на основі мікроконтролерного блоку керування як раціонального структурно-схемотехнічного рішення. Такий підхід забезпечує можливість автоматичного коригування передавальних характеристик АЦП і комплексного самокалібрування статичних та динамічних параметрів вимірювальних каналів.

Розроблено модель акустичної поверхні, сформовану множиною джерел у системі пасивної акустичної локації, де розподіл джерел описується матрицею нечітких відношень типу «координати поля — рівень звукової енергії». Запропоновано метод реконструкції акустичної поверхні на основі розв'язання системи сполучених нечітких логічних рівнянь для умов неповних або зашумлених даних. Додатково показано, що використання запропонованого підходу підвищує точність моделювання та скорочує час обчислень при реальній обробці сигналів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. О. А. Софина, Л. В. Крупельницький / Методи та засоби обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі // Тези доповіді. Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026). Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/schedConf/presentations?searchField=&searchMatch=&search=&track=1026>
2. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення з ваговою надлишковістю: Монографія / Азаров О.Д. – Вінниця. – ВНТУ, 2010. – 232 с.
3. Крупельницький Л.В., Азаров О.Д. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів: Монографія / Під заг. ред. О.Д. Азарова. - УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.- 167 с.
4. Методи та засоби для визначення напрямку та для ідентифікації джерел звуків на місцевості / Ткаченко О. М.; Крупельницький Л. В.; Дерев'яга Б.С.
5. Степанова Т.М. Етапи розвитку мікрофонних решіток для комп'ютерних систем акустичної локації // Матеріали XLVII Науково-технічної конференція ВНТУ , Вінниця, 21-23 березня 2018 р.
6. Benesty J., Chen J., Huang Y. Microphone Array Signal Processing. – Berlin: Springer, 2008. – 308 p.
7. Van Trees H. L. Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. – New York: Wiley, 2002. – 1456 p.
8. Наконечний І. М., Паламарчук В. Д. Цифрові вимірювальні системи: навч. посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 300 с.
9. Реєстрація, обробка та контроль біомедичних сигналів: навч. посіб. / В. Г. Абакумов, З. Ю. Готра, С. М. Злепко, С. В. Павлов та ін. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 352 с.
10. Johnson D. H., Dudgeon D. E. Array Signal Processing: Concepts and Techniques. – Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. – 512 p.
11. STMicroelectronics. STM32F4 Series: Reference Manual RM0090 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.st.com/> .

12. Naylor P. A., Gaubitch N. D. (Eds.). *Speech Dereverberation*. – London: Springer, 2010. – 512 p.
13. Волович Г.І. Схемотехніка аналогових і аналого-цифрових електронних пристроїв. М.: Видавничий дім Додека-XXI, 2005, 528 с.
14. Manolakis D. G., Ingle V. K., Kogon S. M. *Statistical and Adaptive Signal Processing: Spectral Estimation, Signal Modeling, Adaptive Filtering, and Array Processing*. – Boston: Artech House, 2005. – 856 p.
15. Haykin S. *Adaptive Filter Theory*. – 5th ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2014. – 930 p.
16. Швець О. І. Інформаційно-вимірювальні системи і технології обробки фізичних сигналів. – Вінниця: Нове слово, 2016. – 280 с.
17. Johnson C. H. *Design of Analog Filters*. – New York: Oxford University Press, 2010. – 488 p.
18. Van der Ziel A. *Noise in Solid State Devices and Circuits*. – New York: Wiley, 1986. – 474 p.
19. Walt Kester. *High Speed System Applications*. – Norwood: Analog Devices Inc., 2006. – 456 p.
20. Stakhov A.P. *The Mathematics of Harmony. From Euclid to Contemporary Mathematics and Computer Science / International Publisher «World Scientific» (New Jersey, London, Singapore, Beijing, Shanghai, Hong Kong, Taipei, Chennai), 2009. – 748 p.*
21. Hogenauer E. B. An economical class of digital filters for decimation and interpolation // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – 1981. – Vol. 29, No. 2. – P. 155–162.
22. Schreier R., Temes G. C. *Understanding Delta-Sigma Data Converters*. – Hoboken: IEEE Press / Wiley, 2005. – 454 p.
23. J. Benesty, J. Chen, E. Habets. *Speech Enhancement in the STFT Domain // Springer Topics in Signal Processing, 2011. – Vol. 1. – P. 1–33.*
24. H. L. Van Trees. *Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part IV: Optimum Array Processing*. – New York: Wiley-Interscience, 2002. – 1452 p.

**ДОДАТОК А**

Технічне завдання

Міністерство освіти та науки України

Вінницький національний технічний університет

Інститут інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ОТ

проф д.т.н., Азаров О. Д

«03» 10 2025р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

«Методи та засоби обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі»

Науковий керівник: доцент к.т.н.

\_\_\_\_\_Крупельницький Л.В.

Студент групи 2КІ-24м

\_\_\_\_\_Софина О.А.

## 1 Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)

1.1 Важливо підкреслити актуальність дослідження, виконуваного в межах даної магістерської роботи. Сучасні багатоканальні аналогово-цифрові системи дедалі ширше застосовуються у сферах безпеки, звукового моніторингу, робототехніки, медичних діагностичних комплексах та інженерії звуку. Зі зростанням кількості джерел акустичної інформації та ускладненням акустичного середовища виникає потреба у високоточних методах синхронної реєстрації та обробки сигналів у реальному часі.

Запити на швидке виявлення та локалізацію звукових подій, ідентифікацію та аналіз їх параметрів постійно зростають. Традиційні підходи до обробки сигналів уже не забезпечують необхідної продуктивності та точності, що вимагає впровадження інноваційних алгоритмів, паралельних обчислень і вдосконалених архітектур обробки даних.

Особливий інтерес викликає розвиток технологій мікрофонних решіток і методів реконструкції акустичних полів, які дозволяють формувати просторове уявлення про звукові джерела, підвищуючи інформативність аналого-цифрових вимірювальних систем. З огляду на це, удосконалення методів і засобів обробки акустичних сигналів у багатоканальних АЦ-системах є своєчасним і затребуваним завданням, що має як наукову, так і практичну значущість.

1.2 Підставою для розробки даної магістерської кваліфікаційної роботи є наказ ВНТУ №\_\_\_\_ від «\_\_» \_\_\_\_ 2025 року та рішення засідання кафедри обчислювальної техніки (протокол №\_\_ від «\_\_\_\_\_»\_\_ 2025 року).

## 2 Мета і призначення МКР

2.1 Метою дослідження є аналіз, оцінка та вдосконалення методів і технічних засобів обробки акустичних сигналів у багатоканальних аналогово-цифрових системах. Основна увага зосереджена на підвищенні точності, швидкодії та достовірності обробки сигналів, розробці ефективних алгоритмів фільтрації, калібрування й цифрової реконструкції акустичних полів. Отримані результати спрямовані на покращення якості ідентифікації звукових джерел та розширення

можливостей практичного застосування таких систем у моніторингових, вимірювальних і локаційних комплексах.

2.2 Призначення цієї роботи полягає в удосконаленні та оптимізації алгоритмів обробки акустичних сигналів, що забезпечують створення інноваційних методів взаємодії користувача з багатоканальними аналогово-цифровими системами. Розроблені підходи спрямовані на підвищення точності, швидкодії та стабільності цифрової обробки сигналів, а також на адаптацію систем до різних умов експлуатації. Запропоновані рішення можуть бути ефективно використані у вимірювальних, моніторингових, медичних та промислових комплексах, де потрібна висока надійність і оперативність аналізу акустичних даних.

### 3 Вихідні дані для виконання МКР

Тридцять два масива даних обробленого звукового сигналу формуються з урахуванням часових затримок, при цьому частота дискретизації становить 48 кГц, а розрядність від 16 до 24 біт.

### 4 Вимоги до виконання МКР

4.1 Провести аналіз методів та засобів звукової локації та ідентифікації.

4.2 Провести аналіз технології обробки низькочастотних звукових сигналів;

4.3 Розробити прототип розроблюваного рішення.

4.4 Провести експериментальні дослідження та тестування програмного модуля

### 5 Етапи МКР та очікувані результати

Даний план МКР передбачає чотири основні етапи. Спершу проводиться аналіз методів і засобів звукової локації та ідентифікації, а також аналіз технологій обробки низькочастотних звукових сигналів, результатом чого очікується формування теоретичної бази та вибір оптимальних підходів для подальших досліджень. Наступним кроком є експериментальні дослідження та тестування для практичної перевірки обраних рішень та отримання фактичних

даних. Завершується робота економічною частиною, де оцінюється доцільність та ефективність запропонованих рішень.

Таблиця А.1 — Етапи МКР

№ етапу	Назва етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	кінець	
1	Аналіз методів та засобів звукової локації та ідентифікації	26.09.2025р.	03.10.2025р.	Розділ 1
2	Аналіз технології обробки низькочастотних звукових сигналів	04.10.2025р.	14.10.2025р.	Розділ 2
3	Експериментальні дослідження та тестування	03.11.2025р.	16.11.2025р.	Розділ 4
4	Економічна частина	18.11.2025р.	26.11.2025р.	Розділ 5

#### 6 Матеріали, що подаються до захисту МКР

Пояснювальна записка МКР, графічні та ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту МКР на кафедрі, відгук наукового керівника, відгук опонента, протоколи складання державних екзаменів, анотації до МКР українською та іноземною мовами, нормоконтроль про відповідність оформлення МКР діючим вимогам.

#### 7 Порядок контролю виконання та захисту МКР

Виконання етапів графічної та розрахункової документації МКР контролюється науковим керівником згідно зі встановленими термінами. Захист

МКР відбувається на засіданні Державної екзаменаційної комісії, затвердженою наказом ректора.

## 8 Вимоги до оформлювання та порядок виконання МКР

### 8.1 При оформлювання МКР використовуються:

— ДСТУ 3008: 2015 «Звіти в сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання»;

— ДСТУ 8302: 2015 «Бібліографічні посилання. Загальні положення та правила складання»;

— міждержавний ГОСТ 2.104-2006 «Єдина система конструкторської документації. Основні написи»;

— методичні вказівки до виконання магістерських кваліфікаційних робіт зі спеціальності 123 — «Комп'ютерна інженерія». Кафедра обчислювальної техніки ВНТУ 2022;

— документами на які посилаються у вище вказаних.

8.2 Порядок виконання МКР викладено в «Положення про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:21».

## ДОДАТОК Б

### ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Методи та засоби обробки акустичних сигналів в багатоканальній аналогово-цифровій системі

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра обчислювальної техніки

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism (КП1) \_\_\_\_1\_\_\_\_%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту.
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недоброчесних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Особа, відповідальна за перевірку \_\_\_\_\_ Захарченко С.М.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. каф. ОТ Крупельницький Л.В.  
(підпис) (прізвище, ініціали, посада)

Здобувач \_\_\_\_\_ Софина О.А.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Завідувач кафедри ОТ \_\_\_\_\_ Азаров О.Д.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_ Мартинюк Т.Б.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

## ДОДАТОК В

Структурна схема АЦ-системи аудіолокації та ідентифікації об'єктів на місцевості

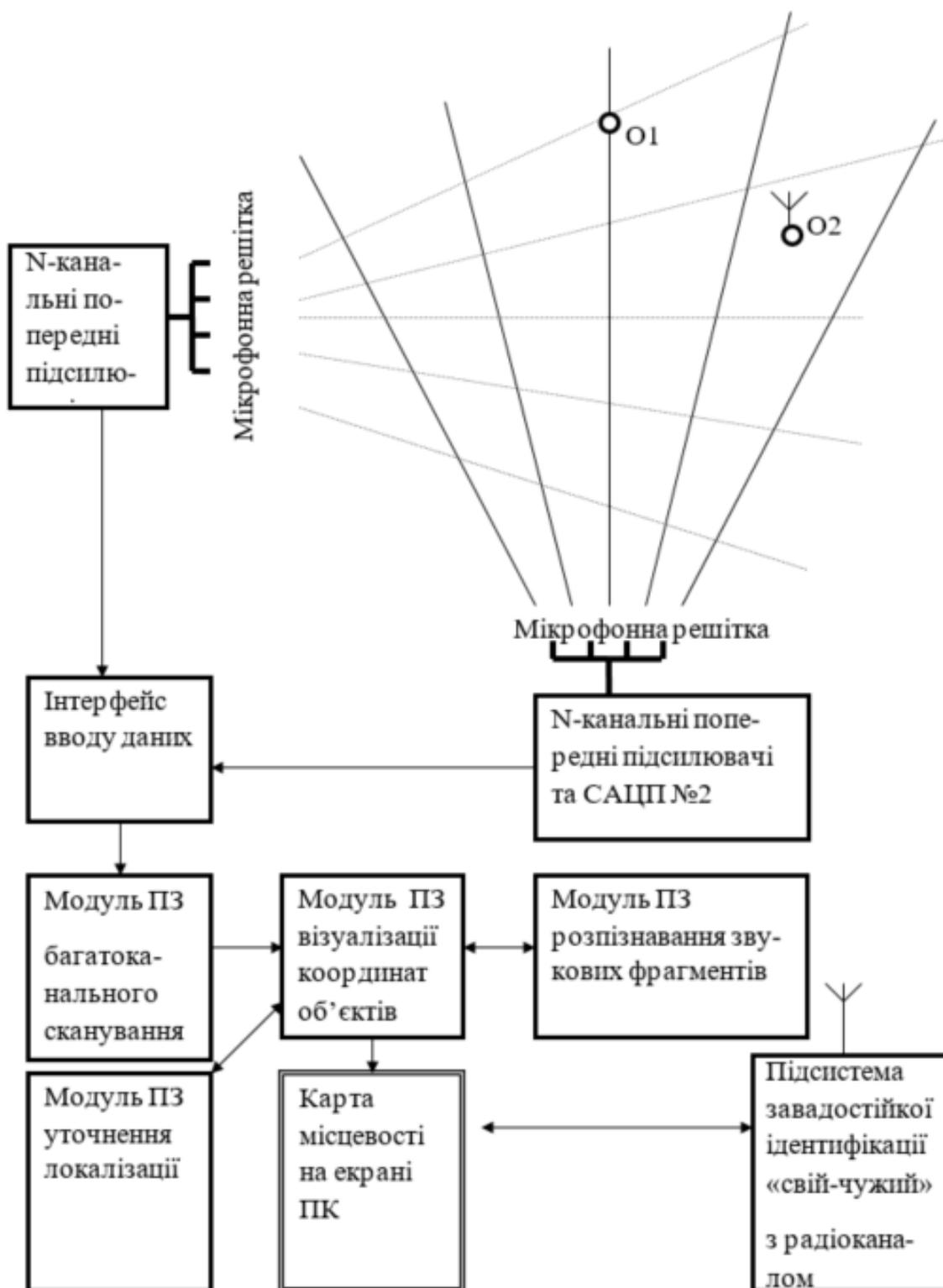


Рисунок Б — Структурна схема АЦ-системи аудіолокації та ідентифікації об'єктів на місцевості

## ДОДАТОК Г

Зовнішній вигляд АЦ-системи портативного варіанту



Рисунок Г — Зовнішній вигляд АЦ-системи портативного варіанту

## ДОДАТОК Д

Зовнішній вигляд АЦ-системи стаціонарного варіанту



Рисунок Д — Зовнішній вигляд АЦ-системи портативного варіанту