

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

**КОМПЛЕКСНА БАКАЛАВРСЬКА ДИПЛОМНА РОБОТА НА ТЕМУ:**  
«Аналого-цифрова система високоточного перетворення низькочастотних  
сигналів». Частина 1. Апаратна частина

Виконав: студент 4 курсу, групи 2КІ-196  
спеціальності

123 Комп'ютерна інженерія,  
освітня програма «Комп'ютерна інженерія»  
Бондар В.А.

Керівник: к.т.н., доц. каф. ОТ  
Крупельницький Л.В.

Рецензент: к.т.н., доц. каф. ПЗ  
Войтко В.В.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ОТ

Азаров О. Д.  
д.т.н., проф. Азаров О. Д.

«14» 06 2023 р

Вінниця ВНТУ 2023

Вінницький національний технічний університет

Факультет Інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії

Кафедра Обчислювальної техніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 - Інформаційні технології

Спеціальність 123 - «Комп'ютерна інженерія»

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія»

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ ОТ \_\_\_\_\_

д.т.н., проф. Азаров О. Д.



“20” 03 20   р.

### ЗАВДАННЯ НА КОМПЛЕКСНУ БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бондару Валентину Андрійовичу

1. Тема проекту «Аналого – цифрова система високоточного перетворення низькочастотних сигналів. Частина 1. Апаратна частина»

Керівник проекту Крупельницький Л.В., к.т.н., доцент

затверджені наказом вищого навчального закладу від «20» березня 2023 р. № 67

2. Строк подання студентом проекту 13.06.2023р.

3. Вихідні дані до проекту: Число вхідних каналів: 4, діапазон робочих частот: 0-20кГц., розрядність вихідного двікового коду: не менше 20, інтерфейс передавання даних: USB, Bluetuth. Наявність самокорекції.

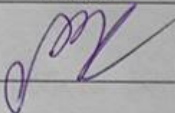
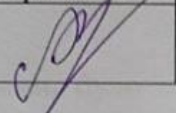
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) вступ, огляд і аналіз джерел інформації, обґрунтування технічного рішення, класифікація напрямків досліджень і основних технічних рішень, теоретичні дослідження, моделювання, обґрунтування методу модульної структури та загального алгоритму, базові алгоритми багатоканального введення й попереднього опрацювання низькочастотних сигналів аналіз методів підвищення точності та швидкодії ацп, розробка і експериментальні дослідження ацп, мікроконтролерна реалізація самокаліброваної ац-системи, структурні та схемотехнічні рішення вимірювальних каналів ац-системи



високоточного перетворення низькочастотних сигналів, розробка електричної принципової схеми, висновки, прелік джерел посилення.

5. Перелік графічного матеріалу: Класифікація основних процесів АЦС НЧС, Напрямки досліджень, в яких застосовуються високоточні АЦП, Схема залежності швидкодії АЦС від різних факторів, Схема фільтрів, які можуть бути реалізовані в аналого-цифровій системі, Схема аналого-цифрового перетворювача від фірми Analog Devices AD7768, Схема аналого-цифрового перетворювача від фірми Microchip MCP3424, Схема аналого-цифрового перетворювача від фірми Cirrus Logic CS5368, Базові алгоритми багатоканального введення й попереднього опрацювання низькочастотних сигналів, Коригування вихідної величини двійкового ЦАП, Самокалібрований двійковий АЦП, Структурна схема паралельно-послідовного АЦП з коригуванням, Здвоєний одночасний режим для регулярних каналів, Синхронна обробка чотирьох аналогових каналів за допомогою мікроконтролера сімейства STM32F4 з використанням здвоєного одночасного режиму інжектованих каналів.


6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-3	Крупельницький Л.В. к.т.н., доцент кафедри ОТ		

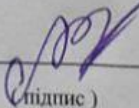
7. Дата видачі завдання 10.03.2023р.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

з/п	Назва етапів виконання бакалаврського проекту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Постановка задач проекту	12.02.23	
2	Огляд інформаційних джерел	15.02-28.02.23	
3	Проектування апаратної частини АЦП	15.03-28.03.23	
4	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу	12.04-25.04.23	
5	Аналіз виконання проекту. Висновки. Додатки	26.04-09.05.23	
6	Перевірка якості виконання бакалаврського проекту та усунення недоліків	16.05.23	

Студент   
(підпис)

Бондар В.А  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи   
(підпис)

Крупельницький Л.В.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

УДК 08-23. КБДР.027.00.000 ПЗ

Бондар В.А. Аналого-цифрова система високоточного перетворення низькочастотних сигналів. Частина 1. Апаратна частина. Бакалаврська дипломна робота зі спеціальності 123 – Комп'ютерна інженерія, освітня програма – Комп'ютерна інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2023.

Дана бакалаврська дипломна робота присвячена дослідженню та розробці аналого-цифрової системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів. Метою роботи є розробка ефективного методу збору та обробки низькочастотних сигналів.

У роботі проведено аналіз основних компонентів аналого-цифрових систем, які використовуються для перетворення низькочастотних сигналів. Враховуючи вимоги до високої точності перетворення, були обрані відповідні компоненти та розроблена функціональна схема системи.

Для досягнення високої точності та стабільності роботи системи, було розроблено та реалізовано метод самокалібрування, який дозволяє автоматично налаштовувати параметри системи з метою усунення неточностей та забезпечення оптимальної роботи.

Ключові слова: аналого-цифрова система, обробка сигналів, самокалібрування, сканування сигналів, мікроконтролер, перетворення.

## ABSTRACT

UDC 08-23. KBDR.027.00.000 PZ

Bondar V.A. Analog-digital system for high-precision conversion of low-frequency signals. Part 1. Hardware part. Bachelor thesis on specialty 123 - Computer engineering, educational program - Computer engineering. Vinnytsia: VNTU, 2023.

This bachelor's thesis is devoted to research and development of an analog-digital system for high-precision conversion of low-frequency signals. The purpose of the work is to develop an effective method of collecting and processing low-frequency signals.

The paper analyzes the main components of analog-digital systems used to convert low-frequency signals. Taking into account the requirements for high conversion accuracy, the appropriate components were selected and the functional scheme of the system was developed.

To achieve high accuracy and stability of system operation, a self-calibration method was developed and implemented, which allows automatic adjustment of system parameters in order to eliminate inaccuracies and ensure optimal operation.

Key words: analog-digital system, signal processing, self-calibration, signal scanning, microcontroller, conversion.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ, ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ</b> .....	9
1.1 Огляд предметної області, коротка історія питання .....	9
1.2 Класифікація напрямків досліджень і основних технічних рішень .....	14
<b>2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ТА ЗАГАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ</b> ....	20
2.2 Базові алгоритми багатоканального введення й попереднього опрацювання низькочастотних сигналів.....	24
2.3 Аналіз методів підвищення точності та швидкодії АЦП.....	30
<b>3 РОЗРОБКА І ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АЦП</b> .....	37
3.1 Мікроконтролерна реалізація самокаліброваної АЦ-системи .....	37
3.2 Структурні та схемотехнічні рішення вимірювальних каналів ац-системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів .....	43
3.3 Розробка електричної принципової схеми .....	45
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	49
<b>ПРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ</b> .....	50
<b>ДОДАТОК А</b> Технічне завдання .....	52
<b>ДОДАТОК Б</b> Схема електрична принципова АЦС.....	57
<b>ДОДАТОК В</b> Перелік елементів .....	58
<b>ДОДАТОК Д</b> Функціональна схема 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи	63
<b>ДОДАТОК Е</b> Структурна схема 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи.....	64
<b>ДОДАТОК Ж</b> Структурна схема паралельно-послідовного АЦП з коригуванням	65
<b>ДОДАТОК К</b> ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ .....	66

					08-23. КБДР.027.00.000 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Бондар В.А.			Аналого – цифрова система високоточного перетворення низькочастотних сигналів. Частина 1. Апаратна частина Пояснювальна записка	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		Крупельницький Л					6	65
<i>Реценз.</i>		Войтко В.В.				<b>ВНТУ, гр. 2КІ-196</b>		
<i>Н. Контр.</i>		Швець С. І.						
<i>Затверд.</i>		Азаров О.Д.						

## ВСТУП

Перетворення низькочастотних сигналів високоточною аналого-цифровою системою є **актуальним** для широкого спектра додатків, включаючи телекомунікації, медицину, радіоелектроніку та багато інших галузей. Аналого-цифрове перетворення дозволяє збирати, обробляти та передавати сигнали у цифровому форматі, що забезпечує більшу стійкість до шумів, зручнішу обробку та високу точність.

**Метою** цієї бакалаврської дипломної роботи є дослідження та проектування аналого-цифрової системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів. Робота спрямована на вивчення основних принципів та алгоритмів перетворення, розробку вискоелективних аналого-цифрових перетворювачів та їхню імплементацію для досягнення максимальної точності та швидкодії.

Сформуємо **задачі** роботи:

— розглянути теоретичні основи аналого-цифрового перетворення низькочастотних сигналів, розглянути основні принципи дискретизації та квантування;

— проаналізувати різні архітектури аналого-цифрових перетворювачів та їхні особливості, розглянувши традиційні АЦП, такі як однобітові та мультибітові перетворювачі;

— залучити процес проектування аналого-цифрових перетворювачів для досягнення високої точності та швидкодії, розглянути важливі технічні параметри, такі як частота дискретизації, кількість бітів квантування, вибір оптимальних фільтрів та алгоритмів обробки сигналу.

В цілому, дана бакалаврська дипломна робота спрямована на розуміння та розвиток аналого-цифрової системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів. Вивчення цієї теми не тільки розширить наші знання про сучасні технології, але й сприятиме подальшому розвитку сфери електроніки та додатків, де високоточне перетворення сигналів має ключове значення.

Апробація матеріалів роботи виконана під час п'ятдесят другої конференції. Публікація за темою роботи, [1] : Бондар, В.; Крупельницький, Л.. Мікроконтролерна реалізація самокаліброваної багатоканальної АЦ-системи введення й обробки аналогових сигналів. НТКП ВНТУ. Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Ukraine, mar. 2023. Available at: <<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2023/paper/view/17456/14494>>. Date accessed: 06 Jun. 2023.



## **1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ, ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ**

### **1.1 Огляд предметної області, коротка історія питання**

Аналого-цифрова система високоточного перетворення низькочастотних сигналів (АЦС НЧС) — це комп'ютерна електронна система, яка призначена для перетворення аналогових сигналів низької частоти у цифровий формат з високою точністю.

Основна функція АЦС НЧС полягає у зборі аналогового сигналу, його дискретизації і перетворенні у цифровий код. Для досягнення високої точності перетворення, АЦС НЧС використовує високоякісні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), які здатні виміряти і конвертувати аналоговий сигнал у цифрову форму з великою роздільною здатністю.

Процес перетворення включає в себе два основних етапи: дискретизацію і квантування. Дискретизація полягає в зборі значень аналогового сигналу в певні моменти часу, що відповідають дискретним точкам. Квантування передбачає надання цим дискретним точкам певного числового значення, яке відповідає їх амплітуді.

Після проведення процесу дискретизації і квантування, отриманий цифровий сигнал може бути подальше оброблений, переданий чи збережений для подальшого використання. Якість перетворення залежить від точності АЦП, вимірювальної системи, а також якості операційного підсилення і фільтрації сигналу.

Аналого-цифрова система високоточного перетворення низькочастотних сигналів може бути застосована в багатьох областях, де необхідно перетворити аналоговий сигнал у цифровий формат з високою точністю. Ось деякі з таких областей:

Комунікаційні функції системи: АЦП використовуються для перетворення аналогових голосових сигналів у цифровий формат для передачі по цифровим мережам.

Основні переваги використання АЦП в комп'ютерних системах полягають у таких аспектах:

— перетворення сигналів, АЦП дозволяє перетворити аналогові сигнали, такі як звукові, відео-, радіо- та інші низькочастотні сигнали, на цифровий формат, який зручний для обробки, передачі та зберігання, це важливо для комунікаційних систем, оскільки більшість сучасних систем засновані на цифрових технологіях;

— висока точність і роздільна здатність, АЦП забезпечує високу точність і роздільну здатність при перетворенні аналогового сигналу в цифровий, це дозволяє зберігати більш детальну інформацію про сигнал, забезпечувати високу якість звуку, зображення або іншої аналогової інформації після цифрової обробки;

— широкий динамічний діапазон, АЦП здатний працювати зі сигналами різного рівня амплітуди, включаючи слабкі та сильні сигнали, це важливо для комунікаційних систем, де можуть відбуватися зміни в рівнях сигналів через різні фактори, такі як відстань передачі, шуми тощо.

При аудіо обробці АЦП використовуються в аудіоапаратурі, записувальних пристроях і звукових картках для перетворення аналогових звукових сигналів у цифровий формат.

Аналого-цифрова система високоточного перетворення використовується в аудіо обробці для перетворення аналогових аудіо сигналів у цифровий формат. Цей процес важливий для багатьох сучасних аудіо пристроїв, таких як музичні програвачі, звукові карти, цифрові записуючі системи та інші. Основна мета використання АЦП полягає в збереженні аналогового аудіо сигналу в цифровому вигляді, який потім можна обробити або зберегти на цифрових носіях. Процес перетворення включає два основні етапи: дискретизацію і квантування.

Дискретизація полягає в вимірюванні значень аналогового сигналу в певних моментах часу. Це відбувається шляхом відбору зразків аудіо сигналу з високою частотою, яка зазвичай набагато перевищує максимальну частоту сигналу, що записується. Частота дискретизації вимірюється в герцах (Hz) і

визначає, скільки разів за секунду вимірюється значення сигналу. Зазвичай використовуються значення від 44.1 кГц до 192 кГц для аудіо обробки.

Після дискретизації, значення аналогового сигналу в кожному зразку квантується, тобто апроксимується до певного значення з обмеженого набору можливих значень. Цей процес квантування визначається роздільною здатністю АЦП, яка визначає, наскільки точно можна виміряти значення сигналу. Роздільна здатність зазвичай вимірюється в бітах, і чим більше бітів, тим більша точність перетворення.

У медичних приладах АЦП використовуються для перетворення аналогових сигналів, таких як ЕКГ (електрокардіограма) або ЕЕГ (електроенцефалограма), у цифровий формат для обробки і аналізу. Основна функція АЦП полягає в перетворенні аналогового сигналу (такого як електричний струм чи напруга), що представляє фізіологічні параметри пацієнта, у цифровий формат, який може бути подальше оброблений іншими електронними пристроями. Для досягнення високої точності перетворення низькочастотних сигналів, таких як ЕКГ, ЕЕГ, ЕМГ або сигнали від датчиків тиску, використовуються спеціалізовані АЦП.

Ось кілька способів, як можна використати АЦП в медичній техніці:

— електрокардіографія (ЕКГ), АЦП використовується для перетворення електричних сигналів серцевої діяльності, отриманих за допомогою електродів на грудній стінці пацієнта, в цифровий формат, ці цифрові дані можуть бути оброблені для аналізу ритму серця, виявлення аритмій або ішемії;

— електроенцефалографія, АЦП використовується для перетворення електричних сигналів, що відображають активність мозку, отриманих за допомогою електродів, розташованих на шкірі голови пацієнта, ці цифрові дані можуть бути використані для діагностики епілепсії, вивчення сну та інших неврологічних станів;

— електроміографія (ЕМГ), АЦП використовується для перетворення електричних сигналів, що відображають активність м'язів, отриманих за допомогою електродів, розташованих на шкірі пацієнта, ці цифрові дані можуть

бути використані для оцінки функції м'язів, діагностики нервово-м'язових захворювань, а також для контролю протезів та реабілітаційних пристроїв.

АЦС НЧС також використовуються в промислових вимірюваннях і контролі для перетворення аналогових сигналів, що вимірюються з датчиків (температури, тиску, потоку тощо), у цифровий формат для подальшої обробки і контролю.

Радіо та телевізійна техніка також містить АЦС НЧС для перетворення аналогових радіочастотних сигналів у цифровий формат для декодування, модуляції і інших операцій у радіо- та телевізійних системах.

АЦС НЧС невід'ємний у автомобільній електроніці, він використовується для перетворення аналогових сигналів з датчиків автомобіля (швидкості, температури двигуна, рівня палива тощо) у цифровий формат для подальшого контролю і обробки.

Як стає зрозуміло з вище вказаного, створення аналого-цифрових перетворювачів залишається актуальним і важливим напрямком в розвитку електроніки. Незважаючи на значний прогрес, досягнутий в цьому напрямку, постійно з'являються нові вимоги щодо високошвидкісного, високоточного та низькошумового перетворення сигналів. Тому на основі цього можна винести основні завдання при розробці нових АЦС НЧС, які вказані на рисунку 1.1.

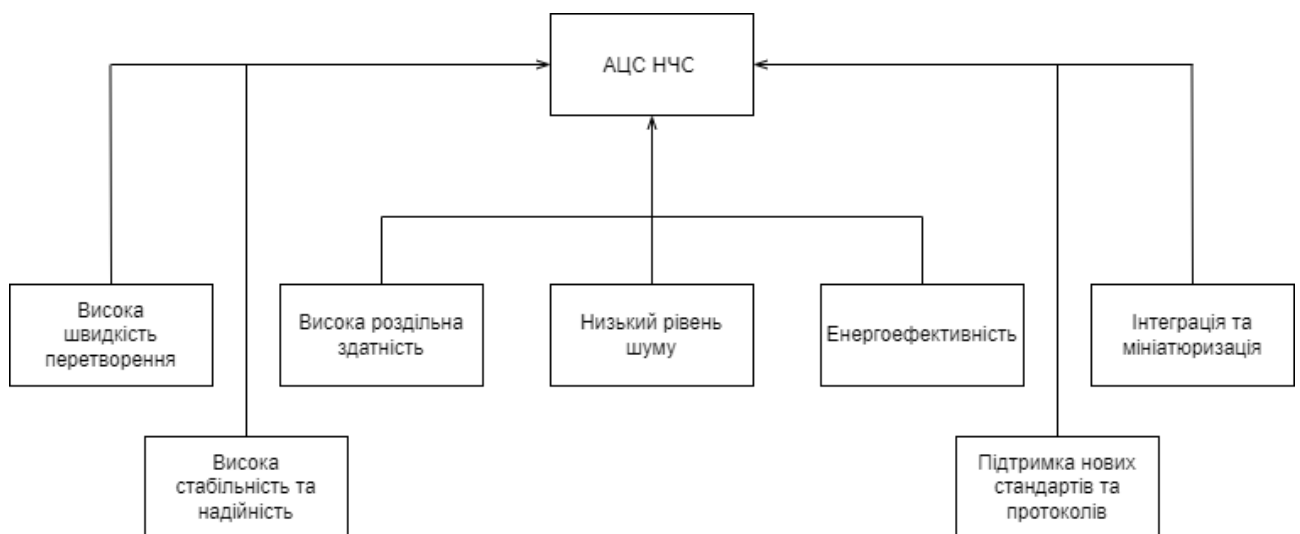


Рисунок 1.1 — Класифікація основних процесів АЦС НЧС

Розглянемо основні вимоги при проектуванні АЦС НЧС.

1. Висока швидкість перетворення. Зі зростанням швидкості обробки сигналів і потреб у високошвидкісних додатках (наприклад, в безпроводних комунікаціях, радарх або медичних зображеннях) виникає потреба в АЦС НЧС, здатних забезпечувати швидке та точне перетворення навіть при високих частотах дискретизації.

2. Висока роздільна здатність. В деяких додатках, таких як аудіозапис або вимірювання фізичних величин з високою точністю, потрібні АЦС НЧС з високою роздільною здатністю для точного відтворення аналогового сигналу в цифровій формі.

3. Низький рівень шуму. У деяких вимірювальних системах та додатках, де сигнали мають дуже низький рівень сигнал/шум, потрібні АЦС НЧС з низьким рівнем шуму, що дозволяє використовувати значення сигналу з високою точністю.

4. Енергоефективність. Розробка АЦС НЧС з низьким споживанням енергії та енергоефективними методами перетворення є важливою задачею. Це особливо актуально для мобільних пристроїв, безпроводних сенсорних мереж, автономних систем та інших пристроїв, де обмежені обсяги енергії або життєвий цикл батареї.

5. Інтеграція та мініатюризація. З постійним розвитком технологій мікроелектроніки і виробництва інтегральних схем, АЦС НЧС стають все меншими за розміром і здатними до інтеграції з іншими функціями на одному чіпі. Це сприяє мініатюризації пристроїв та полегшує їх використання в різних системах.

6. Висока стабільність та надійність. У деяких вимірювальних і критичних застосуваннях важлива вимога до стабільності і надійності АЦС НЧС. Вони повинні мати низький рівень нелінійності, малу залежність від температури та напруги живлення, а також витримувати екстремальні умови експлуатації.



7. Підтримка нових стандартів та протоколів. З ростом нових стандартів і протоколів, таких як USB, HDMI, Ethernet, PCIe, АЦС НЧС потрібні здатності до прямого перетворення в цифровий формат відповідних аналогових сигналів.

## 1.2 Класифікація напрямків досліджень і основних технічних рішень

Напрямки досліджень, в яких застосовуються аналого-цифрові системи високоточного перетворення (АЦП), можна класифікувати наступним чином.



Рисунок 1.2 — Напрямки досліджень, в яких застосовуються високоточні АЦП

1. Алгоритми та методи перетворення сигналів. Розвиток нових алгоритмів для вимірювання, обробки та аналізу сигналів у реальному часі. Удосконалення методів квантування та інтерполяції для забезпечення високої точності перетворення. Розробка компенсаційних алгоритмів для усунення спотворень, шумів та інтерференцій;

2. Швидкодія та пропускна здатність. Вдосконалення швидкодії АЦП для обробки великого обсягу даних у реальному часі. Розробка технік для підвищення пропускної здатності систем високоточного перетворення без втрати точності;

3. Зниження шуму та спотворень. Розробка алгоритмів та фільтрів для приглушення шуму і спотворень, які можуть впливати на якість сигналу.

Використання технологій, таких як диференціальний вхід, для зменшення впливу електромагнітних перешкод та зовнішніх шумів;

4. Енергоефективність та оптимізація. Розробка методів для зниження споживання енергії АЦП та оптимізації його роботи. Вдосконалення алгоритмів стиснення даних для зменшення обсягу даних, що передаються та зберігаються;

5. Високочастотні дослідження. Розробка високошвидкісних АЦП для обробки сигналів з високими частотами, таких як радіосигнали, радары, оптичні сигнали тощо. Вдосконалення алгоритмів та апаратних рішень для забезпечення точного та швидкого вимірювання високочастотних сигналів;

6. Медичні дослідження. Використання АЦП для збору і аналізу біомедичних сигналів, таких як ЕЕГ, ЕКГ, ЕМГ, сигнали з медичних датчиків тощо. Дослідження в області медичної діагностики та моніторингу з використанням АЦП;

7. Системи автоматичного керування. Використання АЦП для збору даних з сенсорів та реалізації зворотного зв'язку для автоматичного керування процесами в промисловості, автомобільній техніці, робототехніці тощо;

8. Космічні дослідження. Використання АЦП для збору даних з космічних датчиків, обробки сигналів з супутників, міжпланетних зондів, астрономічних обсерваторій тощо. Дослідження в області космічних комунікацій, дослідження Всесвіту з використанням АЦП.

Ці напрямки досліджень постійно розвиваються і дають змогу вдосконалювати якість та ефективність аналого-цифрових систем високоточного перетворення в різних сферах застосування.

Системи високоточного перетворення від аналогової до цифрової форми (АЦП) та від цифрової до аналогової форми (ЦАП) є важливими компонентами в багатьох електронних пристроях і системах. Основна мета таких систем - перетворення аналогових сигналів (наприклад, звукових чи вимірювальних) в цифровий формат та навпаки, щоб забезпечити збереження, обробку та передачу даних. Одним із основних технічних рішень є розрядність. Вона визначає кількість бітів, які використовуються для представлення аналогового сигналу у

цифровій формі. У АЦП розрядність вказує, на скільки бітів точності може бути проведене квантування аналогового сигналу. Наприклад, АЦП з розрядністю 12 бітів може розбити аналоговий сигнал на 4096 рівнів ( $2^{12}$ ), а АЦП з розрядністю 16 бітів - на 65536 рівнів ( $2^{16}$ ). Чим більше бітів, тим більшу кількість можливих рівнів квантування, і отже, отримується більш точне представлення аналогового сигналу. Важливо зазначити, що кожен додатковий біт у розрядності подвоює кількість можливих рівнів, що використовуються для представлення сигналу. Це дозволяє отримувати більш високу точність, але також призводить до збільшення об'єму даних, які необхідно обробляти та передавати.

Розрядність також впливає на такі показники, як динамічний діапазон і шум.

Динамічний діапазон визначає різницю між найбільшим і найменшим значеннями, які можуть бути представлені системою. Вища розрядність дозволяє отримувати більший динамічний діапазон, оскільки більше рівнів квантування дозволяють більш точно представляти сигнали від найнижчого до найвищого значення. Наприклад, 16-бітний АЦП може мати динамічний діапазон близько 96 дБ, тоді як 12-бітний АЦП - близько 72 дБ. Більший динамічний діапазон важливий для отримання деталізованих даних та відтворення широкого спектра аналогових сигналів.

Шум є небажаною експонентою в АЦП і ЦАП. Він може походити з різних джерел, таких як електромагнітні перешкоди, термічний шум, квантовий шум та інші. Розрядність впливає на шум, оскільки більша розрядність дозволяє зменшити квантовий шум, який виникає при апроксимації аналогового сигналу до обмеженої кількості цифрових значень. Більша розрядність дозволяє отримувати більш точне представлення сигналу і зменшує вплив квантового шуму на якість перетворення.

Також до технічних рішень можна віднести швидкодію.

Швидкодія є одним з важливих параметрів АЦП та ЦАП, оскільки вона визначає здатність системи відтворювати або зчитувати сигнали в реальному часі.



Рисунок 1.3 — Схема залежності швидкодії АЦС від різних факторів

Вимірюється вона у семплах на секунду (S/s або sps) або в кілогерцах (kHz). Вона впливає на точність збору даних, якість аудіо- та відеопотоків, швидкість зчитування сенсорних даних, швидкість реакції системи та багато інших аспектів роботи електронних пристроїв.

Швидкодія систем високоточного перетворення залежить від кількох факторів:

— швидкість дискретизації — це параметр, який вказує, з якою частотою система зчитує або генерує вимірювання, якщо АЦП має швидкість дискретизації 1 кілогерц, то він може здійснювати 1000 перетворень на секунду;

— пропускна здатність — це максимальна швидкість передачі даних, яку може обробити система, вона може бути обмежена фізичними характеристиками компонентів системи, а також швидкістю обробки сигналу мікропроцесором чи сигнальним процесором;

— алгоритми компресії даних, деякі системи використовують алгоритми компресії даних, які дозволяють зменшити обсяг передаваних або збережених даних без значної втрати якості, це може дозволити збільшити швидкодію системи, оскільки менше даних потребує обробки або передачі;

— буферна пам'ять, деякі системи використовують буферну пам'ять для тимчасового зберігання даних перед їх обробкою або відтворенням, більша розмірність буферної пам'яті може дозволити зберігати більшу кількість семплів і тим самим забезпечувати більшу швидкодію системи.

Квантування є одним з ключових етапів у процесі перетворення аналогового сигналу на цифровий формат в аналого-цифрових системах (АЦП).

Воно відбувається під час вимірювання аналогового сигналу і його апроксимації до певного числового значення.

Процес квантування полягає у розділенні неперервного діапазону значень аналогового сигналу на скінчену кількість рівнів (ступенів квантування). Кожен рівень відповідає конкретному числовому значенню. Чим більша розрядність АЦП, тим більше рівнів квантування і, відповідно, більша точність представлення сигналу.

Процес квантування можна уявити як розміщення деякого набору "сходинок" або "рівнів" по всьому діапазону значень аналогового сигналу. Кожне значення сигналу призначається найближчому рівню квантування. Помилка квантування визначається різницею між фактичним значенням сигналу і значенням, яке йому було призначено під час квантування.

Фільтрація в аналого-цифрових і цифро-аналогових системах високоточного перетворення використовується для підсилення корисного сигналу та приглушення нежаданих компонентів, таких як шуми, спотворення та інтерференції. Фільтри можуть бути реалізовані як аналогові, цифрові або комбіновані, залежно від системних вимог та характеристик.

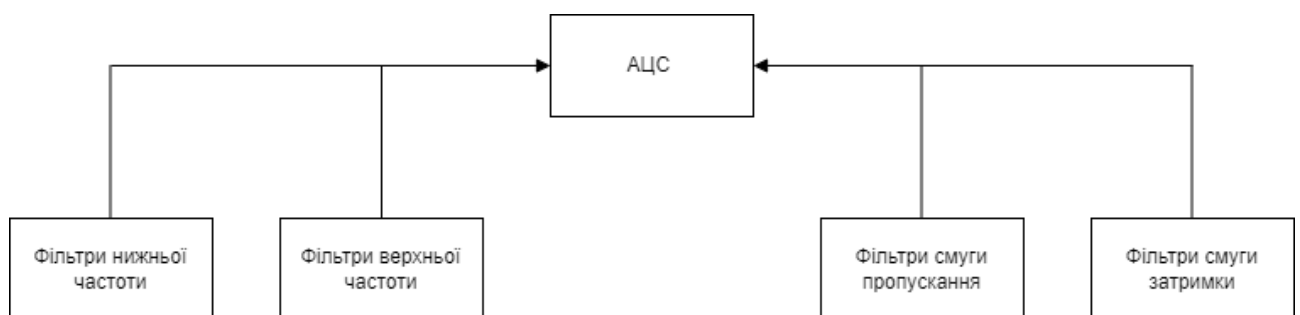


Рисунок 1.4 — Схема фільтрів, які можуть бути реалізовані в аналого-цифровій системі

Основні типи фільтрів, що застосовуються в контексті аналого-цифрових та цифро-аналогових систем високоточного перетворення:

— фільтри нижньої частоти, ці фільтри пропускають сигнали з низькими частотами та приглушують сигнали з високими частотами, вони корисні для



видалення шумів та високочастотних спотворень, які можуть вплинути на якість сигналу;

— фільтри верхньої частоти, ці фільтри пропускають сигнали з високими частотами та приглушують сигнали з низькими частотами, вони використовуються для видалення постійних складових і низькочастотних шумів;

— фільтри смуги пропускання, ці фільтри пропускають сигнали в певному діапазоні частот, блокуючи сигнали за межами цього діапазону, вони корисні для виділення конкретних сигналів, що знаходяться в заданому частотному діапазоні;

— фільтри смуги затримки, ці фільтри блокують сигнали в певному діапазоні частот, пропускаючи сигнали з інших частот, вони використовуються для приглушення непотрібних сигналів або видалення інтерференції, специфічних для певних частот.

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ТА ЗАГАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ

### 2.1 Аналіз відомих аналогів, порівняння параметрів

Існує багато відомих моделей Аналого-цифрових систем високоточного перетворення низькочастотних сигналів, кожна з яких має свої особливості і використовується в різних галузях.

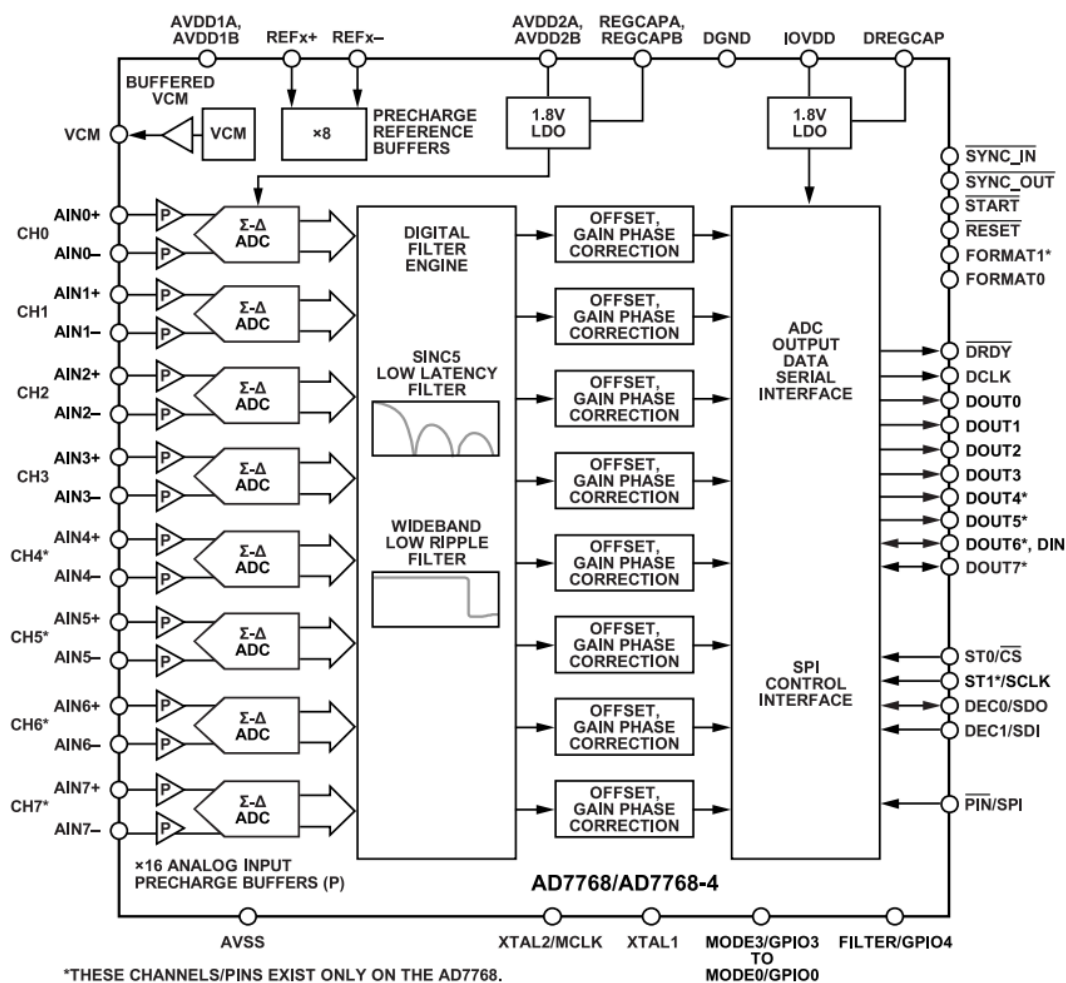


Рисунок 2.1 — Схема аналого-цифрового перетворювача від фірми Analog Devices AD7768

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) Analog Devices AD7768[2] є високоточним 24-бітним пристроєм, який виробляється компанією Analog

Devices, відомим виробником аналогових та цифрових сигнальних інтегральних схем.

AD7768 забезпечує точне перетворення низькочастотних аналогових сигналів у цифровий формат. Він має вбудовану функцію програмованого затримувача, що дозволяє вибрати оптимальний момент дискретизації для зменшення шуму та спотворень сигналу.

У складі AD7768 використовуються кілька ключових компонентів:

— аналоговий фронтенд (АФЕ), AD7768 має високоякісний аналоговий фронтенд, який включає в себе вхідні операційні підсилювачі, аналогові фільтри та вбудований прецизійний джерело опорного напруги, цей фронтенд забезпечує точне і надійне вимірювання аналогового сигналу;

— аналого-цифровий перетворювач (АЦП), AD7768 має високоточний 24-бітний АЦП, який перетворює аналоговий сигнал у цифровий формат з високою роздільною здатністю, це дозволяє зберігати деталі сигналу і забезпечувати точне відображення вхідного сигналу у цифровій формі;

— інтерфейси, AD7768 має різноманітні інтерфейси, включаючи SPI (Serial Peripheral Interface) та I2C (Inter-Integrated Circuit) для комунікації з мікроконтролерами або іншими цифровими пристроями.

AD7768 є популярним вибором для різних застосувань, включаючи системи контролю та вимірювання, промислові автоматизовані системи, медичні пристрої, тощо.

Microchip MCP3424[3] є 18-бітним АЦП (аналого-цифровим перетворювачем) зі вбудованим програмованим затримувачем, розробленим компанією Microchip Technology Inc. Microchip є одним з провідних виробників мікроконтролерів, сенсорів та інших електронних компонентів.

MCP3424 має чотири вхідні канали, які можуть працювати як незалежні або спільні. Він працює з напругою живлення 2,7-5,5 В та має низьке споживання потужності, що робить його ідеальним для вбудованих систем з обмеженими ресурсами.

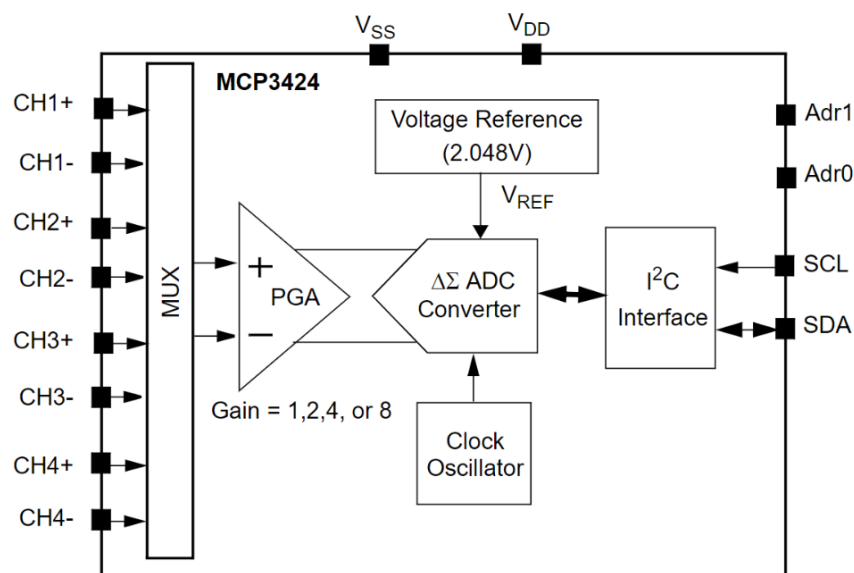


Рисунок 2.2 — Схема аналого-цифрового перетворювача від фірми Microchip  
MCP3424

Цей АЦП використовує дельта-сигма модуляцію для вимірювання аналогового сигналу і перетворення його у цифровий формат. Для досягнення високої точності перетворення, MCP3424 використовує внутрішні опори і внутрішній генератор опорного напруги. Крім того, він має вбудовану систему автоматичного калібрування, що дозволяє компенсувати паразитні опори і шуми. MCP3424 забезпечує розширені функції фільтрації і шумозаглушення, що сприяє поліпшенню якості сигналу. Він також підтримує різні режими роботи, такі як одиночне вимірювання, неперервне вимірювання та режим сплячки для енергозбереження. MCP3424 виводить результати перетворення через інтерфейс I2C, що дозволяє легко інтегрувати його в різноманітні системи з мікроконтролерами або іншими пристроями.

Висока точність, низьке споживання потужності та зручність інтерфейсу роблять Microchip MCP3424 популярним в різних застосуваннях, включаючи системи контролю та вимірювання, датчики температури, силові вимірювання, системи моніторингу, автоматизовані системи управління та багато інших. Microchip MCP3424 є надійним і широко використовуваним компонентом, який забезпечує високу точність та стабільність при перетворенні низькочастотних аналогових сигналів в цифровий формат. Цей пристрій забезпечує зручність

використання і простоту інтеграції в різні електронні системи, що робить його популярним серед розробників інженерних пристроїв та систем.

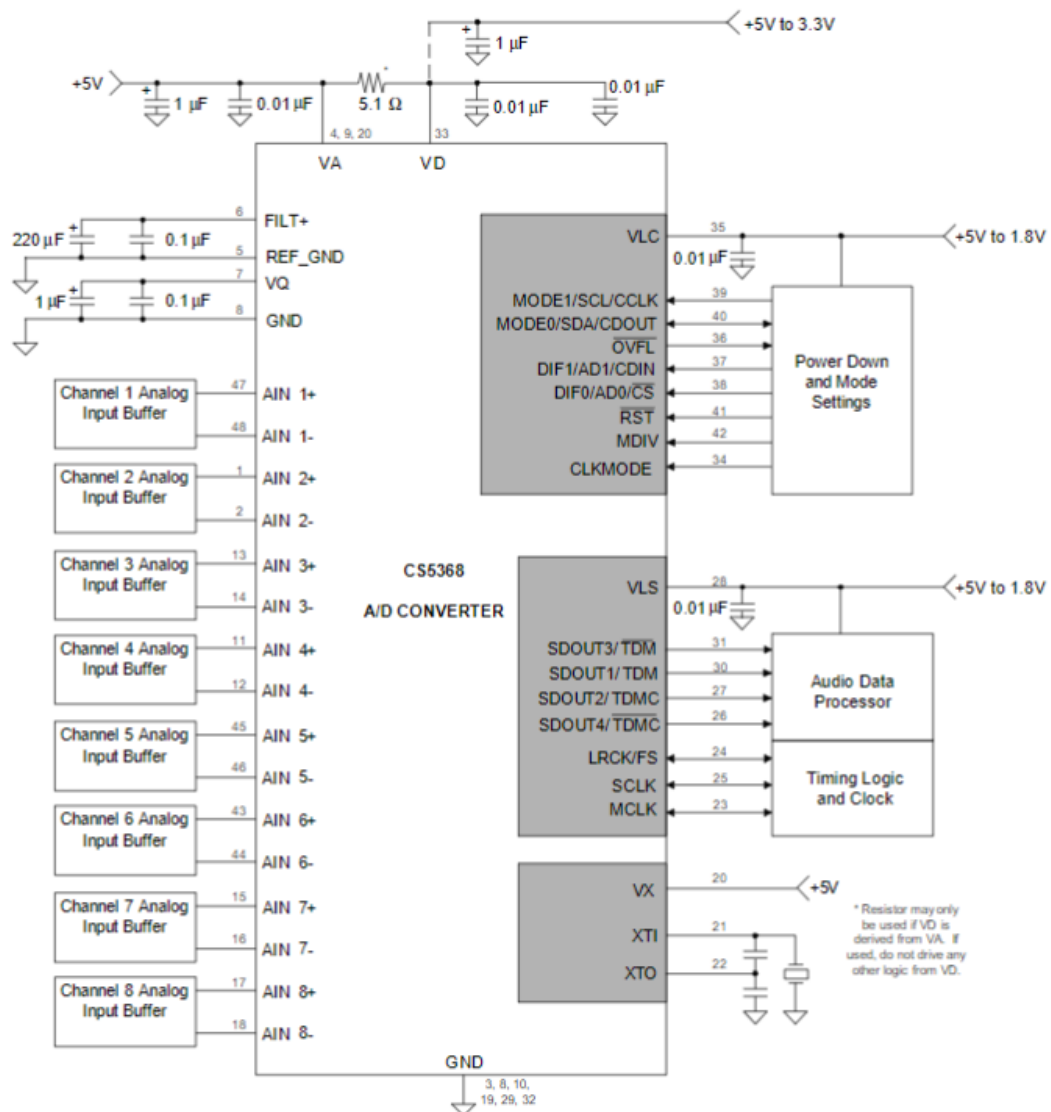


Рисунок 2.3 — Схема аналого-цифрового перетворювача від фірми Cirrus Logic CS5368

Cirrus Logic CS5368[4] є високоточним 6-канальним Аналого-цифровим перетворювачем (АЦП), виробленим компанією Cirrus Logic. Cirrus Logic є відомим виробником напівпровідникових пристроїв, спеціалізуючися на аудіоінтегральних схемах, перетворювачах сигналу і інших рішеннях у галузі обробки аудіосигналів.

CS5368 пропонує високу якість звуку і велику точність перетворення, що робить його популярним у професійних аудіоапаратах та записувальному



обладнанні. Він має роздільну здатність 24 біта і динамічний діапазон понад 114 дБ, що дозволяє детально і точно вимірювати аналогові сигнали низької частоти. АЦП CS5368 має 6 незалежних вхідних каналів, що дозволяє одночасно перетворювати сигнали з різних джерел або багатоканальні аудіосистеми. Він також включає в себе вбудований аналоговий фільтр низьких частот, який допомагає попередньо обробляти сигнали перед дискретизацією, щоб уникнути спотворень від високочастотних складових. Цей АЦП працює з різними швидкостями дискретизації, досягаючи значень до 192 кГц, що дозволяє йому забезпечувати високу якість звуку при відтворенні аудіо високої роздільної здатності. Він також має вбудований аналоговий підсилювач для підсилення слабких сигналів перед перетворенням.

Завдяки своїм характеристикам та надійності, Cirrus Logic CS5368 є популярним вибором для професійного аудіообладнання, включаючи студійну техніку, аудіоінтерфейси, мікшери пультів, аудіоаналізатори та інші додатки, де висока якість звуку і точність перетворення сигналів є критичними факторами. Cirrus Logic CS5368 зарекомендував себе як надійний і високоякісний АЦП у сфері професійного аудіо і є одним із важливих компонентів високоточних аудіосистем.

## 2.2 Базові алгоритми багатоканального введення й попереднього опрацювання низькочастотних сигналів

Для реалізації високопродуктивних багатоканальних аналого-цифрових само-каліброваних систем моніторингу й синхронного опрацювання низькочастотних звукових сигналів, необхідно перевірити параметри мікрофонних вимірювальних каналів та протестувати їх умови, що наближені до реальних.

Для проведення даного етапу потрібно здійснити ряд організаційних і технічних заходів. Зокрема, необхідно розробити програмне забезпечення, яке здатне аналізувати параметри сигналів кожного з каналів вимірювання з мікрофонів протягом визначеного часового проміжку. Також воно повинно

здатися порівнювати ці сигнали між собою та створювати діаграму напрямленості. Це програмне забезпечення повинно обробляти wav-файли, які були отримані як окремі канали вимірювання з мікрофонів під час лабораторних і натурних експериментів, а також їх комбінації в комплексі. Застосування передбачених режимів, напрямків і типів звукових сигналів, а також аналіз отриманих результатів порівняно з очікуваними дозволить виявляти проблеми і помилки у зазначених каналах для подальшої корекції. Зокрема, такий підхід дозволить виявляти помилки в амплітудних і фазових характеристиках каналів вимірювання з мікрофонів, відповідність сигналів на входах і виходах, помилки у визначенні напрямку та інші.

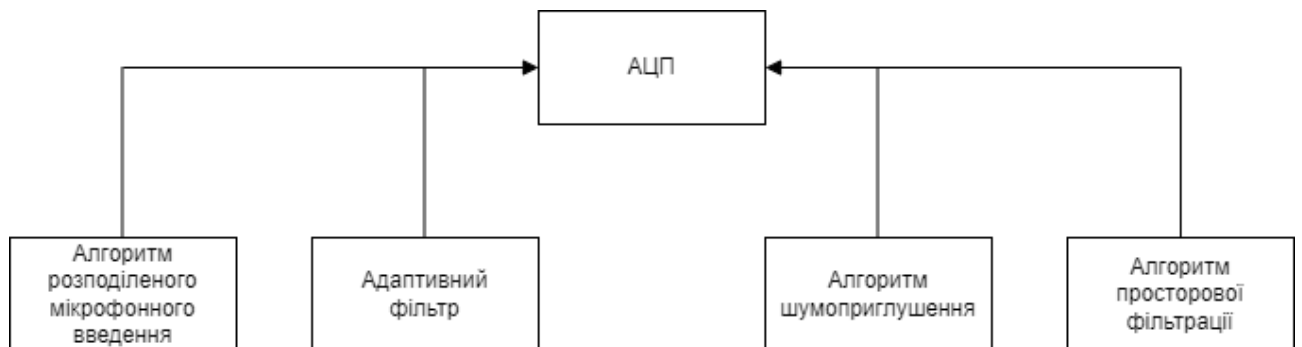


Рисунок 2.4 — Базові алгоритми багатоканального введення й попереднього опрацювання низькочастотних сигналів

До базових алгоритмів багатоканального введення можна віднести алгоритм розподіленого мікрофонного введення. Даний алгоритм є одним із способів багатоканального введення звуку, який використовує мікрофонні масиви, розташовані на різних місцях, для отримання багатоканальних сигналів. Цей алгоритм має на меті поліпшити якість сигналу, зменшити шум і виявити напрямок джерела звуку.

Принцип роботи алгоритму розподіленого мікрофонного введення полягає в обробці сигналів, отриманих з різних мікрофонів, з метою отримання більш точної інформації про звукове джерело та його напрямок.

Основні кроки алгоритму розподіленого мікрофонного введення:

— збір сигналів, мікрофонні масиви розташовані на різних місцях, і кожен мікрофон записує аудіо сигнал, сигнали збираються з усіх мікрофонів у масиві;

— синхронізація сигналів, зібрані сигнали синхронізуються так, щоб їх фази та часові шкали збігалися, це важливий крок, оскільки він дозволяє правильно комбінувати сигнали з різних мікрофонів;

— обробка сигналів, сигнали з різних мікрофонів обробляються, наприклад, шляхом використання цифрових сигнальних обробників (ЦСО) або алгоритмів обробки сигналів для вилучення корисного сигналу та приглушення шуму, обробка може включати фільтрацію, просторову обробку, шумоприглушення та інші методи, що поліпшують якість сигналу;

— виявлення напрямку джерела, одним з головних завдань алгоритму є визначення напрямку, з якого надходить звук, це досягається шляхом аналізу фазової і просторової інформації, отриманої від розташованих на різних місцях мікрофонів, використовуючи цю інформацію, алгоритм може визначити напрямок джерела звуку;

— формування багатоканального вихідного сигналу, після обробки сигналів і визначення напрямку джерела, алгоритм формує багатоканальний вихідний сигнал, який може бути використаний для подальшого аналізу, запису або іншої обробки.

Алгоритм розподіленого мікрофонного введення є ефективним способом отримання багатоканальних сигналів з мікрофонних масивів. Він знаходить широке застосування в таких областях, як акустична обробка сигналів, відеоконференції, системи визначення напрямку звуку та інші задачі, пов'язані з обробкою аудіосигналів.

Адаптивний фільтр є одним з ключових алгоритмів цифрової обробки сигналів і використовується для приглушення шуму та еха у багатоканальних системах. Основна ідея адаптивного фільтра полягає в автоматичному налаштуванні коефіцієнтів фільтрації, щоб відфільтрувати небажані складові сигналу, залишаючи лише бажану інформацію. Принцип роботи адаптивного фільтра базується на використанні вихідного сигналу фільтра для оцінки

вхідного шумового сигналу або сигналу еха. Ця оцінка використовується для налаштування коефіцієнтів фільтрації з метою максимального приглушення шуму або еха.

Процес адаптації включає наступні кроки:

— вибір моделі адаптивного фільтра, спочатку необхідно визначити, яку модель адаптивного фільтра будемо використовувати, це може бути, наприклад, рекурсивний фільтр Левінсона-Дарбіна, фільтр Левенберга-Марквардта або LMS-фільтр (фільтр за найменшим середньоквадратичним відхиленням);

— визначення критерію адаптації, вибирається критерій, за яким оцінюється різниця між вихідним сигналом фільтра і бажаним сигналом, найпоширеніший критерій - середньоквадратичне відхилення (MSE) або сигнал-шум (SNR) виходу фільтра;

— оцінка вхідного сигналу, вхідний сигнал аналізується для визначення шумового сигналу або сигналу еха, які потрібно приглушити, це може бути зроблено шляхом використання моделі системи та аналізу вихідного сигналу фільтра;

— апдейт коефіцієнтів фільтра, коефіцієнти фільтра налаштовуються за допомогою адаптаційного алгоритму, який залежить від вибраної моделі фільтра, цей алгоритм використовує оцінки шуму або сигналу еха для коригування коефіцієнтів і забезпечення максимального приглушення небажаних компонентів сигналу;

— ітеративний процес, адаптація коефіцієнтів фільтра є ітеративним процесом, де кроки 3-4 повторюються до досягнення заданого рівня приглушення шуму або еха.

Адаптивні фільтри знайшли широке застосування в аудіо- та комунікаційних системах, де приглушення шуму та еха є важливими завданнями для поліпшення якості звуку та передачі сигналу. Вони дозволяють автоматично пристосовуватись до змінних умов та ефективно приглушати небажані компоненти сигналу.

Алгоритм шумоприглушення є важливим компонентом обробки аудіосигналів і використовується для попереднього опрацювання сигналів шляхом приглушення шуму. Його основна мета полягає в підвищенні якості аудіосигналу шляхом виділення корисного сигналу від шумового фону.

Основні кроки алгоритму шумоприглушення можуть включати:

— аналіз шуму, алгоритм розпочинається з аналізу шумового фону, який може бути вимірний у відсутність корисного сигналу, це дозволяє встановити статистичні характеристики шуму і отримати його модель;

— вибір методу шумоприглушення, існує кілька методів шумоприглушення, включаючи фільтри, спектральні методи, адаптивні фільтри, статистичні методи та інші, вибір методу залежить від характеристик шуму та властивостей сигналу;

— віднімання шуму, за допомогою обраного методу шумоприглушення здійснюється операція віднімання шуму з вхідного сигналу, це може включати фільтрацію сигналу з використанням розроблених моделей шуму або інших методів обробки сигналу;

— підвищення якості сигналу, після віднімання шуму можуть застосовуватися додаткові кроки для підвищення якості сигналу, це може включати підсилення голосу, підвищення рівня сигналу, зменшення еха та інші операції, спрямовані на поліпшення зрозумілості та якості сигналу;

— оцінка якості, завершальним етапом є оцінка якості відновленого сигналу, це може включати вимірювання параметрів сигналу, порівняння з оригінальним сигналом або оцінку за допомогою об'єктивних метрик якості звуку.

Важливо враховувати, що кожен алгоритм шумоприглушення має свої переваги та обмеження, і ефективність його роботи може залежати від конкретних умов і характеристик сигналу. Тому вибір оптимального алгоритму для конкретної задачі шумоприглушення вимагає уважного аналізу та експериментів.

Алгоритм просторової фільтрації є одним із способів обробки багатоканальних сигналів для поліпшення якості звуку та виділення бажаного сигналу від шуму чи інших джерел. Цей алгоритм використовується в системах з мікрофонними масивами або вузлами з декількома мікрофонами, розташованими у просторі.

Основні кроки алгоритму просторової фільтрації включають:

— збір сигналів, мікрофони збирають сигнали з різних точок простору, кількість мікрофонів може варіюватися в залежності від конфігурації системи;

— оцінка просторових параметрів, за допомогою обробки сигналів з різних мікрофонів визначаються просторові параметри, такі як часові різниці приходу сигналу (Time Difference of Arrival, TDOA) або різниці фази між сигналами (Phase Difference of Arrival, PDOA), ці параметри вказують на розташування джерела звуку у просторі відносно мікрофонів;

— обчислення вагових коефіцієнтів, за допомогою просторових параметрів обчислюються вагові коефіцієнти для кожного мікрофону, ці коефіцієнти вказують, як сигнал з кожного мікрофона повинен бути взважений перед комбінуванням з іншими сигналами;

— комбінування сигналів, сигнали з різних мікрофонів комбінуються з врахуванням вагових коефіцієнтів, це може включати фільтрацію, сумування або інші операції залежно від конкретного алгоритму;

— виділення бажаного сигналу, отриманий комбінований сигнал піддається подальшій обробці для виділення бажаного звуку від шуму або інших джерел, це може включати використання додаткових фільтрів, різних алгоритмів підсилення сигналу або інших методів обробки.

Алгоритм просторової фільтрації може бути використаний для покращення якості звуку, приглушення шуму, еха або резонансних ефектів, а також для виявлення та визначення напрямку джерела звуку у просторі. Він широко застосовується в системах конференц-зв'язку, аудіозаписуванні, звукових системах автомобілів та інших областях, де важлива обробка багатоканальних сигналів.

Отже, застосування базових алгоритмів багатоканального введення й попереднього опрацювання низькочастотних сигналів має значний потенціал для поліпшення якості звуку, зменшення шуму та виявлення бажаного звуку у складних акустичних середовищах. Алгоритми, такі як адаптивний фільтр, алгоритм шумоприглушення та алгоритм просторової фільтрації, надають можливості для оптимального використання багатоканальних даних та покращення сприйняття звуку.

### 2.3 Аналіз методів підвищення точності та швидкодії АЦП

Метрологічні властивості вимірювальних каналів систем змінного струму визначаються точністю аналого-цифрового перетворення (АЦП) і цифро-аналогового перетворення (ЦАП). Основною метрологічною характеристикою є основна помилка, яка може бути систематичною або випадковою. Незалежно від типу пристрою або системи, існують три типи систематичних помилок: постійне зміщення (адитивна похибка), масштабування (мультиплікативна похибка) і похибка лінійності. Слід відзначити, що методи коригування перших двох типів помилок є докладними і деталізованими [5].

Застосування різних методів для перетворення аналогових величин у цифрові та цифрових величин у аналогові впливає на рівень похибки лінійності. Наприклад, у випадку інтегровальних АЦП, характеристика перетворення є монотонною і має значний вплив на похибку лінійності [6]. Проте, для ЦАП з паралельною дією та АЦП, що базуються на таких ЦАП, нелінійність не проявляється різким чином і не має монотонного характеру.

Існують різні підходи до створення системних перетворювачів інформації, залежно від потреб у швидкості та точності. Проблема досягнення високої точності аналого-цифрового перетворення з максимальною допустимою похибкою 0,05% та роздільною здатністю 14 біт вже успішно вирішена для АЦП інтегруючого типу. Однак, традиційно такі пристрої мають низьку частоту відліків (fвідл), яка зазвичай не перевищує десятків і сотень Гц. Для отримання більш високої швидкодії використовуються АЦП порозрядного врівноваження та

паралельно-последовні АЦП. Перші мають середню частоту відліків ( $f_{\text{відл}} = 100\text{-}102$  кГц), тоді як другі мають високу швидкодію ( $f_{\text{відл}} = 101\text{-}104$  кГц). Проте, зі збільшенням швидкодії виникає проблема з підтримкою низького рівня помилок в цих пристроях. Окрім цього, важливо відзначити, що існують обмеження на шляху до досягнення високої точності шляхом поліпшення властивостей основної структури та використання матеріалів, що впливають з обмежень технології виготовлення. Відхилення ваг розрядів від потрібних значень, які є характерними для перетворювачів інформації середньої і високої швидкості, часто коригуються на етапі виробництва, шляхом лазерного налаштування значень резисторів або конденсаторів паралельних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), що входять до складу цих пристроїв. Це вимагає збільшення площі внутрішніх кристалічних компонентів та загального кристала.

Структура компонентів порушується цими процесами, що призводить до зменшення як часової стабільності елементів, так і температурної стабільності всієї схеми [7]. Внаслідок такого підходу ускладнюється досягнення точності, що еквівалентна роздільності більш як 14 біт [8].

Підхід, який використовує повну корекцію помилок або калібрування ваг окремих цифр ЦАП і АЦП без фізичного впливу на елементи схеми, є більш перспективним. Застосовуючи ЦАП, що базується на двійковій системі числення, можна знизити статичні помилки шляхом коригування вихідного значення за допомогою аналогової форми корекції, яка генерується додатковим коригуючим ЦАП. В цьому випадку, код  $K_{vh}$ , подається на вхід основного ЦАП (ЦАП) та цифрового обчислювального пристрою (ЦОП). ЦОП обчислює код корекції, отриманий на вході коригуючого ЦАП (ЦАПкор). Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) компанії Intersil Inc. (США) використовує суматор аналогових значень для формування результату перетворення Авих. Хоча цей принцип покращує точність ЦАП, він також призводить до зниження швидкості пристрою при аналого-цифровому перетворенні. Це можна побачити, аналізуючи роботу самокаліброваної побітової компенсації АЦП з використанням двійкової системи числення.



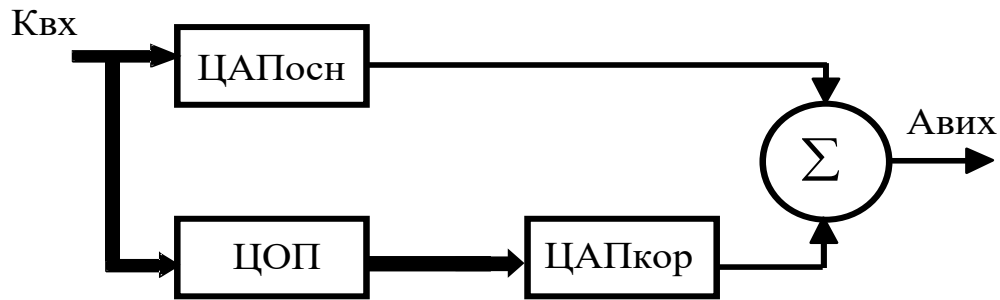


Рисунок 2.5 — Коригування вихідної величини двійкового ЦАП

У спрощеній блок-схемі, показаній на рис. 2.6, пристрій містить схему порівняння аналогових сигналів (СП), основний ЦАП (ЦАПосн), коригувальний ЦАП (ЦАПкор), суматор аналогових значень, цифровий обчислювальний пристрій, регістр коригувального ЦАП (Рг), вихідний регістр (Ргвих), регістр послідовного наближення (РПН) та блок керування (БК).

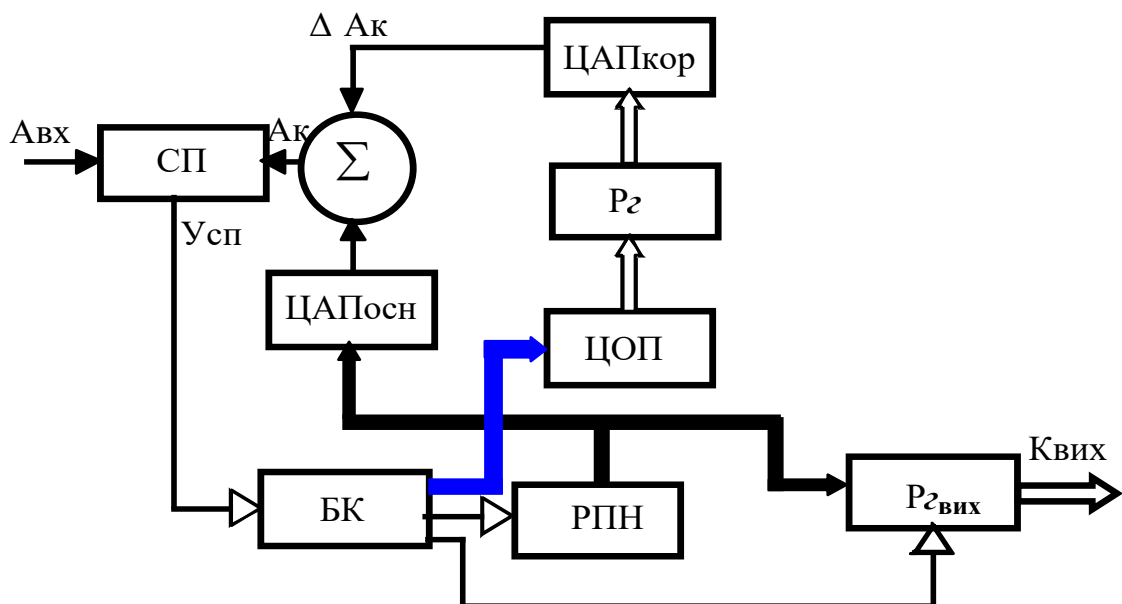


Рисунок 2.6 — Самокалібрований двійковий АЦП

У головному режимі АЦП приймає вхідний сигнал  $A_{вх}$  для перетворення, який компенсується сигналом  $A_{к}$ , що складається з сигналу  $A_{осн}$ , вихідного сигналу ЦАПосн, та поправки  $\Delta A_{к}$ , що генерується ЦАПкор. Значення коду  $\Delta A_{к}$  визначається ЦОП на кожному такті, коли вмикаються старші недостовірні розряди. Час перетворення в режимі з корекцією визначається за формулою:

$$t_{пр} = nt\Gamma + mt_{кор},$$

де  $n$  — кількість тактів врівноваження;

$t\Gamma$  — тривалість такту врівноваження;

$m$  — кількість каліброваних розрядів;

$t_{кор}$  — час обчислення коригувальної поправки.

Якщо помилка формування розгляду ЦАПосн виникає одночасно або з використанням незахищеної технології і стосується багаторозрядних перетворювачів ( $n > 12$ ), то кількість розрядів, що підлягають коригуванню, може досягати значень  $m \geq n/2$ . Якщо час  $t_{кор}$  порівнюється з часом  $t\Gamma$ , то це призводить до помітного збільшення часу  $t_{пр}$ . Таким чином, використання цього підходу для підвищення точності вимагає розрахунку коригувальних поправок для кожного з "неточних" розрядів під час врівноважування і призводить до зниження швидкості перетворення, навіть для АЦП середньої швидкодії.

Оптимізація зазначених характеристик аналого-цифрового перетворення викликає суперечливість. В більшості випадків традиційні покращення одного показника, такого як точність, призводять до погіршення швидкості. Спроби зменшити обладнання або спростити пристрій часто призводять до втрати точності або швидкості, і так далі. Однак, введення надлишковості у формі НПСЧ в розроблювані пристрої дозволяє вирішити проблеми комплексного покращення декількох характеристик аналого-цифрового перетворення до певної міри. Застосування такого підходу дозволяє збільшити кількість тактів при порозрядному врівноважуванні при подовженні розрядної сітки пристрою. Це, зокрема, дозволяє підвищити точність середньо- і високошвидкісного АЦП, які використовують грубі аналогові вузли. Також цей підхід підвищує швидкість високоточних АЦП, які використовують аналогову елементну базу середньої швидкості.

Існує два способи підвищення продуктивності багаторозрядних аналого-цифрових преобразувачів (АЦП). Перший спосіб полягає в застосуванні більш

вдосконаленої бази елементів. Другий спосіб пов'язаний з впровадженням надлишковості в проєктовані пристрої. Найстарішим підходом у цьому напрямку є використання структурної надлишковості. Суть цього підходу головним чином відображається через паралельно-послідовний принцип перетворення. Існують два варіанти структурних схем паралельно-послідовних АЦП: один з одним набором компараторів та налаштовуваними порогами спрацьовування на кожному кроці, і інший - з використанням кількох наборів компараторів, по одному на кожен такт [9].

На рисунку 2.7 показано спрощену структурну схему більш поширеного варіанту самокоригованого паралельно-послідовного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) з 14-розрядною двійковою точністю [10].

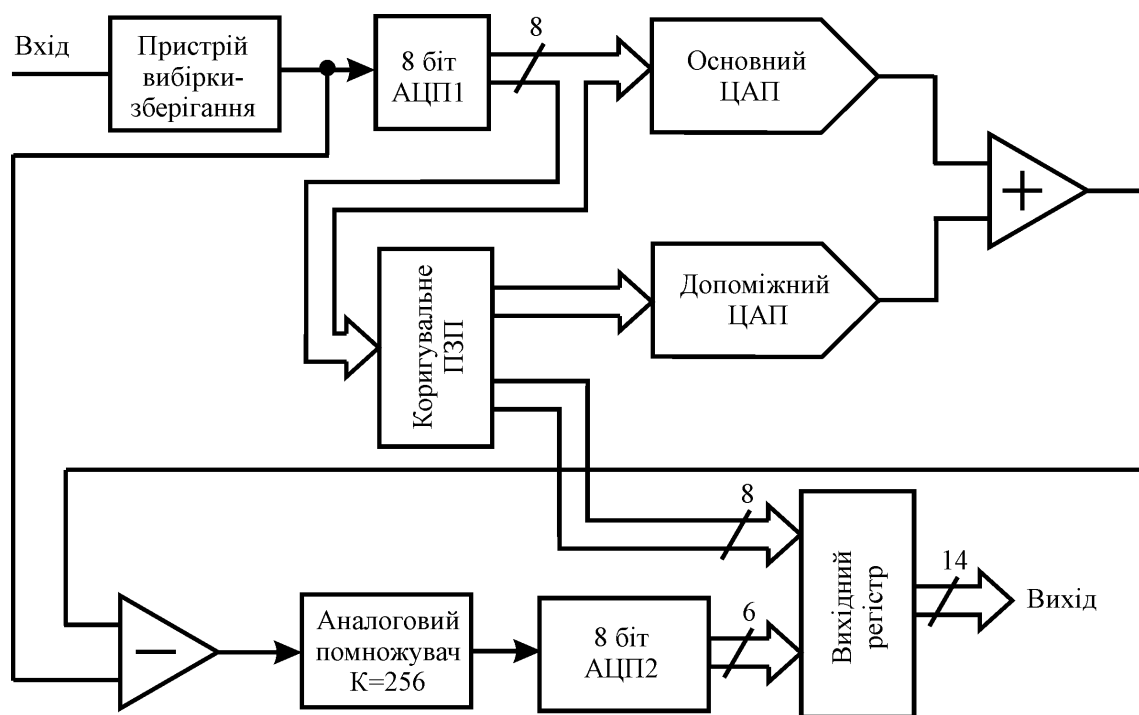


Рисунок 2.7 — Структурна схема паралельно-послідовного АЦП з коригуванням

У даному пристрої спочатку проводиться конвертація з 8-бітової форми в 6-бітову. Для створення послідовно-паралельних конвертерів зазвичай використовують паралельні АЦП як набір компараторів. Однак, неможливо досягти точності 16 біт, наприклад, за допомогою двох паралельно інтегрованих

8-бітових АЦП. Це пояснюється тим, що різницевий сигнал, який подається на вхід другого етапу АЦП2, складається з різниці, що відповідає неперетвореній частині вхідного сигналу, та помилки, яка виникає через недосконалість першого етапу АЦП1, схеми віднімання, аналогового перемножувача та основного ЦАП. Тому метод масштабування АЦП на першому та другому кроці часто використовується для досягнення необхідної точності конвертації в послідовно-паралельних конвертерах.

У цій структурній схемі присутній програмований пристрій пам'яті (ПЗУ) та допоміжний цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), який здійснює з'єднання між першим і другим етапом. Цей метод налаштування за допомогою ПЗУ називається програмним корегуванням. Щоб розширити діапазони температур і часу налаштування, ПЗУ можна замінити програмованою оперативною пам'яттю (ОЗУ), що працює на мікропроцесорі. Алгоритм налаштування самокалібруючого перетворювача в такому випадку полягає у заповненні комірок ОЗУ кодами, які генеруються під час самокалібрування аналого-цифрового перетворювача АЦП1 на різних вхідних опорних рівнях напруги. Загалом, для калібрування N-бітового АЦП1 першого ступеня потрібно сформувати  $2N-1$  опорних рівнів напруги, що вимагає значних апаратних та часових затрат. Існують структурні та алгоритмічні рішення, які зменшують кількість необхідних вхідних рівнів та контрольний час. Проте ці рішення не повністю усувають необхідність у складному багаторівневому джерелі напруги.

Аналогова частина паралельно-послідовних АЦП відрізняється високою точністю і швидкістю диференціального підсилювача. Практична реалізація таких АЦП ускладнена високим рівнем перешкод, що виникають між першим і наступним тактами перетворення. Ці перешкоди виникають через одночасне спрацювання компараторів АЦП1 на першому кроці та ключів ЦАП. Викиди амплітуди і тривалості ("глітч") під час цього процесу можуть негативно вплинути на зусилля, спрямовані на збільшення швидкодії АЦП. Особливо важливою стає проблема стійкості до перешкод при використанні таких АЦП в складі вимірювальних систем, які включають високочутливі попередні

підсилювачі. Проблема стійкості до перешкод при роботі таких АЦП разом з високочутливими попередніми підсилювачами є особливо актуальною.

Узагалі, основною перевагою паралельно-послідовних АЦП є можливість їх побудови на базі наявних мікросхем паралельних перетворювачів. Однак, недоліком є складність і значна апаратна надмірність, високе енергоспоживання та низька стійкість до перешкод.

## 3 РОЗРОБКА І ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АЦП

### 3.1 Мікроконтролерна реалізація самокаліброваної АЦ-системи

Мікроконтролерні засоби є простим варіантом для реалізації багатоканальної цифрової обробки аналогових сигналів. Сучасні мікроконтролери, які мають велику продуктивність, значні об'єми RAM- та Flash-пам'яті, а також широкий спектр периферійних пристроїв, широко використовуються у нових розробках. Зазвичай, 32-бітні мікроконтролери з ARM-ядром є найпопулярнішими серед виробників. ARM, англійська компанія, спеціалізується на розробці мікропроцесорних ядер і продажі ліцензій на них. Виробники поєднують ARM-ядро з RAM- та Flash-пам'яттю та різноманітними периферійними пристроями, щоб створити свої власні мікроконтролери. На ринку доступні ARM мікроконтролери від кількох десятків виробників.

Архітектура Cortex стає все більш поширеною завдяки поліпшенню класичної ARM архітектури, що призвело до створення процесорних ядер Cortex. Завдяки своїй вищій продуктивності, спрощеній моделі програмування, удосконаленій системі обробки переривань та доступній вартості, архітектура Cortex набуває все більшої популярності. Можна запропонувати використовувати мікроконтролер з ядром Cortex-M для реалізації багатоканальної цифрової обробки аналогових сигналів, оскільки це економічно вигідне та ефективне рішення для створення засобів обробки сигналів. Такі мікроконтролери широко використовуються в різних галузях, включаючи інтелектуальні вимірювальні прилади, інтерфейси користувача, системи управління автомобілями та промисловими системами, а також медичне обладнання.

Мікроконтролери серії STM32 від компанії STMicroelectronics є найбільш популярними серед розробників, які використовують мікроконтролери з ядром Cortex-M [11]. Основні причини цього успіху полягають у їх низькій вартості, високій продуктивності, доступності документації, наявності засобів розробки та налагодження (включаючи безкоштовні варіанти), а також наявності готових рішень та бібліотек для роботи з периферією. Все це сприяє спрощенню та скороченню термінів розробки. Особливої уваги серед мікроконтролерів STM32

заслуговує родина STM32F4, що базується на ядрі Cortex M4. Ці мікроконтролери відрізняються наявністю апаратної підтримки цифрової обробки сигналів (модуль DSP) і операцій з числами з плаваючою точкою (модуль FPU). Загальні характеристики мікроконтролерів родини STM32F4 включають наступне:

- процесор ARM Cortex-M4 32-біт;
- тактова частота 168 МГц, 210 DMIPS/1.25 DMIPS/МГц;
- підтримка DSP-інструкцій;
- нова високопродуктивна матриця шин АНВ;
- флеш-пам'ять до 1 Мбайта;
- оперативна пам'ять SRAM до 192+4 кбайт;
- напруга живлення 1,8 ... 3,6 В (POR, PDR, PVD і BOR);
- внутрішні генератори RC на 16 МГц і 32 кГц (для RTC);
- зовнішнє джерело тактування 4...26 МГц і для RTC – 32,768 кГц;
- модулі налагодження SWD/JTAG, ETM модуль;
- три 12-бітових АЦП на 24 вхідних канали (швидкість до 7,2 мегасемплів, температурний датчик);
- два 12-бітових ЦАП;
- DMA-контролер на 16 потоків з підтримкою пакетної передачі;
- 17 таймерів (16 та 32 розряди);
- два сторожових таймери (WDG та IWDG);
- комунікаційні інтерфейси: I2C, USART (ISO 7816, LIN, IrDA), SPI, I2S;
- CAN (2,0 В Active);
- USB 2.0 FS/HS OTG;
- 10/100 Ethernet MAC (IEEE 1588v2, MII/RMII);
- контролер SDIO (карти SD, SDIO, MMC, CE-ATA);
- інтерфейс цифрової камери (8/10/12/14-бітові режими);
- FSMC-контролер (Compact Flash, SRAM, PSRAM, NOR, NAND та LCD 8080/6800);

- апаратний генератор випадкових чисел;
- апаратне обчислення CRC, 96-бітний унікальний ID;
- модуль шифрування AES 128, 192, 256, Triple DES, HASH (MD5, SHA-1), HMAC.

На вимогу багатоканальної цифрової обробки аналогових сигналів, цікавим є наявність трьох АЦП та двох одноканальних ЦАП. АЦП, позначені як ADC1, ADC2 і ADC3, здійснюються за схемою 12-бітного АЦП послідовного наближення і дозволяють обробляти сигнали з 16 зовнішніх аналогових каналів, які перемикаються за допомогою мультиплексора. Кожен АЦП має свій список зовнішніх каналів, які можуть бути підключені до нього. Аналого-цифрове перетворення може здійснюватися у режимах одноканального (single), багатоканального (scan), безперервного (continuous) або переривчастого (discontinuous) [12].

Можна класифікувати вхідні канали як регулярні (з до 16-ма каналами) або інжектвані (з до 4-х каналів). Порядок опитування каналів визначається програмно. Результати перетворення регулярних каналів записуються в одну реєстрацію, яка вимагає своєчасного зчитування даних, наприклад, з використанням прямого доступу до пам'яті. Для збереження результатів перетворення інжектованих каналів використовується окремий реєстр для кожного каналу. Інжектвані канали мають вищий пріоритет для перетворення, тому при одночасному використанні регулярних та інжектованих каналів опитування регулярних каналів призупиняється на час опитування інжектованих [13].

Часові затрати на перетворення визначаються шляхом додавання часу вибірки до безпосереднього часу перетворення, який триває протягом 12 тактів. При максимальній швидкості вибірки, яка становить 3 такти, загалом на перетворення витрачається 15 тактів. Відповідно до цього, при максимальній тактовій частоті АЦП 30 МГц, найменший час перетворення складає 0,5 мкс. АЦП можуть функціонувати в режимах зведеного або строєного сканування, які дозволяють прискорити процес сканування. В зведеному режимі АЦП1 та АЦП2



працюють разом, і після завершення перетворення результати з обох АЦП одночасно зберігаються в 32-бітному регістрі даних ADC1. Розділення результатів дозволяє одночасно отримувати дані з двох окремих каналів. У строєному режимі АЦПЗ завжди працює незалежно і не синхронізується з іншими АЦП.

Найоптимальнішим режимом для використання у системі моніторингу й обробки низькочастотних сигналів є "одночасний" подвійний режим для регулярних або інжекттованих каналів. В цьому режимі АЦП1 сканує канали від 0 до 15 для регулярних каналів або від 0 до 3 для інжекттованих каналів, тоді як АЦП2 сканує канали у зворотному напрямку, від 15 до 0 або від 3 до 0 відповідно. Таким чином, кожен канал буде оброблений двічі за той самий період [14] (див. рис. 3.1).

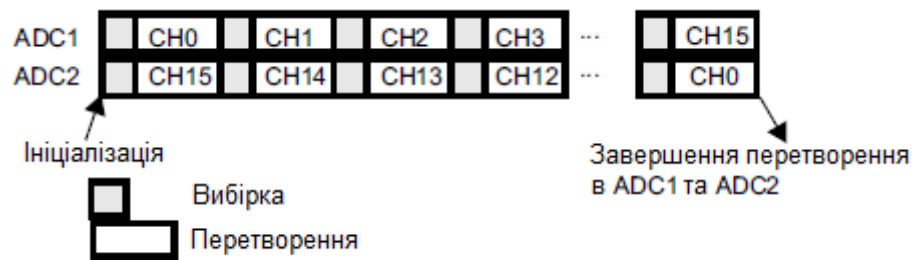


Рисунок 3.1 — Здвоєний одночасний режим для регулярних каналів

На основі мікроконтролера сімейства STM32F4 можна використовувати схему, зображену на рис. 3.2, для здійснення 12-бітного синхронного опрацювання чотирьох аналогових каналів.

Згідно з розглядуваним варіантом, одночасно обробляються аналогові канали 1, 2, 3 і 4. В результаті, перетворення сигналів у каналах 1 і 2 відповідатимуть значенням у момент часу  $t + 2n\Delta t$ , а сигнали в каналах 3 і 4 - у момент часу  $t + 2(n + 1)\Delta t$ . Потрібно врахувати часову затримку  $\Delta t$  при отриманні результатів перетворення з каналів 3 і 4, щоб визначити дійсні часові зсуви між сигналами, що надходять по всім каналам 1...4.

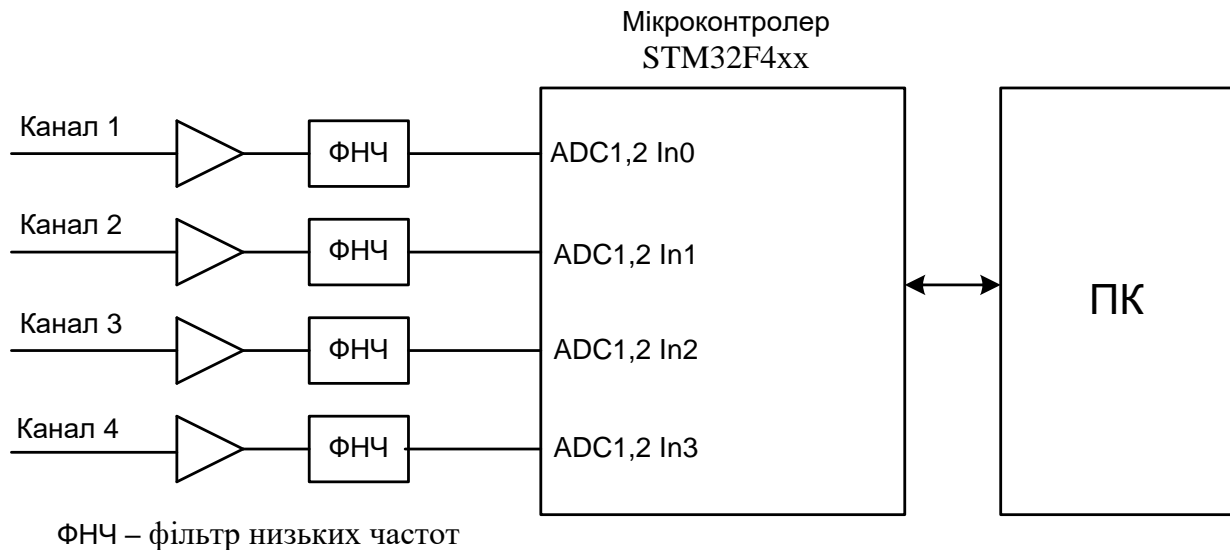


Рисунок 3.2 — Синхронна обробка чотирьох аналогових каналів за допомогою мікроконтролера сімейства STM32F4 з використанням зведеного одночасного режиму інжектіваних каналів

Цю затримку можна додати програмно або за допомогою апаратного введення затримки  $\Delta t$  в каналах 3 і 4. При максимальній швидкості перетворення, частота дискретизації кожного каналу становитиме 1 МГц, що обчислюється як  $30 \text{ МГц} / (2 \cdot (3 + 12))$ .

Варіант реалізації 4-канальної синхронної обробки аналогових сигналів, який розглянули, базується на повному використанні ресурсів мікроконтролера і потребує мінімальної кількості зовнішніх компонентів. Проте, в результаті роздільна здатність квантування не перевищуватиме 12 біт, і можливість калібрування існує лише для АЦП мікроконтролера. Таким чином, різниці в параметрах елементів, які утворюють вхідні канали аналогових сигналів, і зміни цих параметрів під впливом зовнішніх факторів або з часом не можуть бути компенсовані під час роботи.

Рис. 2.10 показує можливість виправити вказані недоліки шляхом реалізації 4-канальної аналого-цифрової системи, яка має вбудовану функцію самокалібрування. Кожен з чотирьох вимірювальних каналів складається з ряду компонентів: аналогового комутатора (АК), програмованого підсилювача (ПП), фільтра нижніх частот для попередження антиаліасінгу (АФЧХ), пристрою для

зберігання та вибірки (ПВЗ), цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) та компаратора (КП).

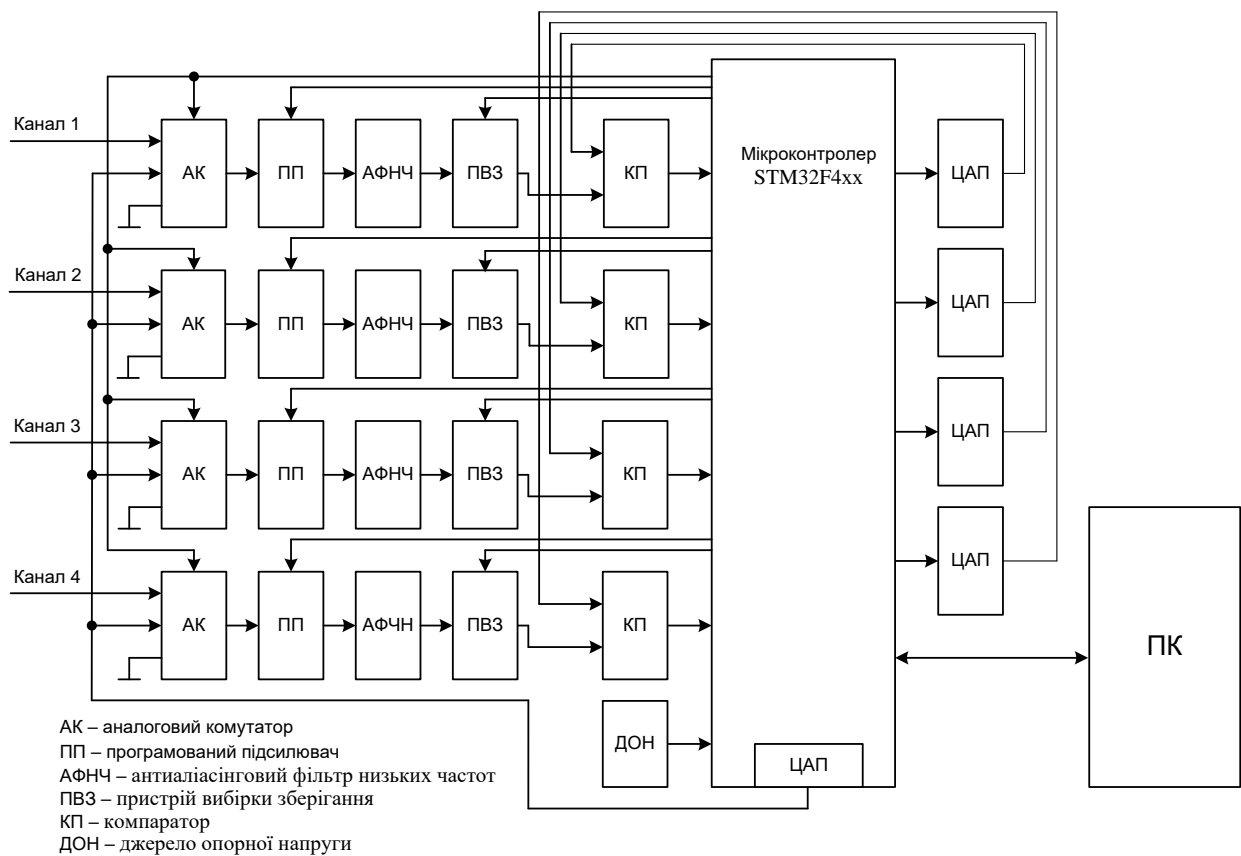


Рисунок 3.3 — Структурна схема 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи

У даній системі діють два режими роботи: вимірювання та самокалібрування, під час вимірювання сигнали, які надходять через канали 1...4, перенаправляються через аналогові комутатори до вимірювальних каналів, які є входами програмованих підсилювачів, керування комутаторами здійснюється мікроконтролером.

Функції програмованих підсилювачів складаються з двох основних етапів: перетворення вхідного сигналу з диференціального на недиференціальний та вирівнювання динамічного діапазону вхідного сигналу з діапазоном вхідних напруг антиаліасінгових фільтрів. Зазвичай програмовані підсилювачі будуються на основі класичної різницевої схеми з використанням трьох операційних підсилювачів, але їх також можна створити з використанням струмових підсилювачів з симетричними вхідними, проміжними та буферними каскадами

[15]. Коефіцієнти підсилення програмованих підсилювачів можуть мати кілька дискретних значень, що дозволяє вибирати діапазони вхідних напруг. Зміна коефіцієнта підсилення для кожного каналу відбувається незалежно за допомогою сигналів мікроконтролера.

Пасивні фільтри першого порядку використовуються як антиаліасінгові фільтри нижніх частот для обмеження спектрів вхідних сигналів, з метою уникнення ефекту перекриття спектрів, що виникає при дискретизації сигналів з необмеженим зверху спектром.

Після відсіву високочастотних складових сигналу, фільтрований сигнал подається на пристрої зберігання вибірок, які фіксують миттєві значення аналогового сигналу під час вибірки. Ці значення зберігаються на пристроях вибірки до моменту, коли вони будуть перетворені на цифровий формат. Таким чином, пристрої зберігання вибірок здійснюють дискретизацію сигналів. Мікроконтролер формує імпульсні тактові сигнали, які використовуються для процесу дискретизації у пристроях зберігання вибірок. У більшості випадків ці пристрої базуються на накопичувальному конденсаторі та аналогових ключах з узгоджувальними підсилювачами.

Отже, ми можемо створити вимірювальні канали для АЦ-систем, використовуючи мікроконтролерний блок управління. Це дозволить нам автоматично коригувати передавальні характеристики АЦП і здійснювати комплексну самокалібрування статичних і динамічних характеристик вимірювальних каналів.

### 3.2 Структурні та схемотехнічні рішення вимірювальних каналів ац-системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів

Після формулювання вимог до вимірювальних каналів АЦ-системи, які були наведені у попередньому розділі, необхідно розробити функціональні та принципові схеми цієї системи. Одним із важливих аспектів розробки АЦ-системи є вибір типу аналого-цифрового перетворювача (АЦП). З огляду на аналіз, проведений у попередніх розділах, було виявлено можливість

використання двох типів АЦП — порозрядного врівноваження і дельта-сигма перетворення. АЦП порозрядного врівноваження мають перевагу у тому, що їх можна використовувати окремо в кожному каналі системи або один загальний для всіх каналів з послідовною комутацією.

Якщо потрібно змінити частоту дискретизації сигналів у АЦ-системі, раціональною буде використання дельта-сигма АЦП, оскільки вони не потребують складних ФНЧ зі змінною частотою зрізу. Дельта-сигма АЦП мають в своєму складі цифровий фільтр високого рівня, який має фіксоване значення відношення частоти зрізу до частоти дискретизації, тому не потребує регулювання. Використання дельта-сигма АЦП ускладнюють вбудовані в них ФВЧ, які не пропускають низькі частоти та постійні сигнали, що може ускладнити процес калібрування зсуву "нуля" вхідних кола АЦ-системи та роботу з сенсорами постійних сигналів. Це є недоліком дельта-сигма АЦП перетворювачів.

Після оцінки переваг і недоліків, приходимо до компромісного рішення. Вибір порозрядних АЦП підходить для схеми з фіксованою частотою дискретизації сигналів, тоді як дельта-сигма АЦП буде використовуватись, коли потрібно обробити сигнали зі змінною частотою дискретизації. Це особливо важливо для експериментального зразка АЦ-системи, який буде розроблено.

Отже, для обробки звукових сигналів з різними частотами дискретизації в експериментальному зразку системи аналого-цифрового перетворення, доцільно використовувати дельта-сигма аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і одночасно передбачити можливість встановлення АЦП з рівномірним розподілом бітів у кожному каналі (на додаткових місцях для монтажу на друкованій платі). Вибраний для використання сучасний 24-розрядний дельта-сигма АЦП AD 1871 від компанії Analog Devices [16] (78). Ця мікросхема має послідовні інтерфейси I2C, SPI та DSP, а також може працювати від живлення  $\pm 5\text{В}$ .

Вибір мікропроцесора АЦ-системи залежить від його здатності одночасно обслуговувати чотири послідовні інтерфейси АЦП, чотири канали ЦАП джерел

живлення, калібрувальний ЦАП, вхідні аналогові комутатори АК, програмовані підсилювачі ПП, USB/COM інтерфейс та безпроводний інтерфейс Bluetooth. Було обрано мікроконтролер типу STM32F407VET6 від ST Microelectronics (32-бітний, Cortex-M4 + FPU, 168 МГц, 512 кБ Flash, USB OTG HS/FS, Ethernet) з урахуванням його швидкодії, кількості портів вводу-виводу, універсальності та доступності [17].

Для отримання незалежної фантомної напруги живлення з 4-ма каналами використовується мікросхема ЦАП AD5665 від компанії Analog Devices. Зазначена мікросхема ЦАП має 16-розрядні вихідні напруги та простий послідовний інтерфейс.

Для використання обраних мікросхем необхідно забезпечити двополярне живлення напругою  $\pm 5\text{В}$ . Для досягнення цього було обрано поширену мікросхему MC34063 від компанії Texas Instruments, яка, як DC/DC інвертор, забезпечує необхідне живлення з порту USB (+5 В). Вхідні комутаційні кола, попередні та програмовані підсилювачі також повинні бути підібрані таким чином, щоб працювати з живленням  $\pm 5\text{В}$ , що вимагає окремого відбору. Тому в якості основних операційних підсилювачів було вибрано здвоєні підсилювачі OP275A, в якості комутаторів - чотирьох каналні ADG709, а як програмовані підсилювачі - AD8251 від компанії Analog Devices. Усі обрані мікросхеми мають високу якість та відповідають технічним вимогам АЦ-системи.

Функціональна схема експериментального зразка 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи для обробки акустичних сигналів, яка зображена на рисунку 3.3, розроблена на основі вибраних основних компонентів.

### 3.3 Розробка електричної принципової схеми

Кожен з чотирьох вхідних каналів має аналоговий комутатор (АК), який складається з мікросхем ADG 409 та працює в режимі комутації диференційних сигналів (мікросхеми DA5...DA8). На кожному першому диференційному вході є струмообмежуючі захисні резистори R9...R16 з опором 1 кОм. Другі входи АК підключені до шини "нуля" для калібрування зсуву "нуля", а треті входи

підключені до виходу калібрувального ЦАП (мікросхеми DA10, DA15), щоб передавати сигнал для калібрування.

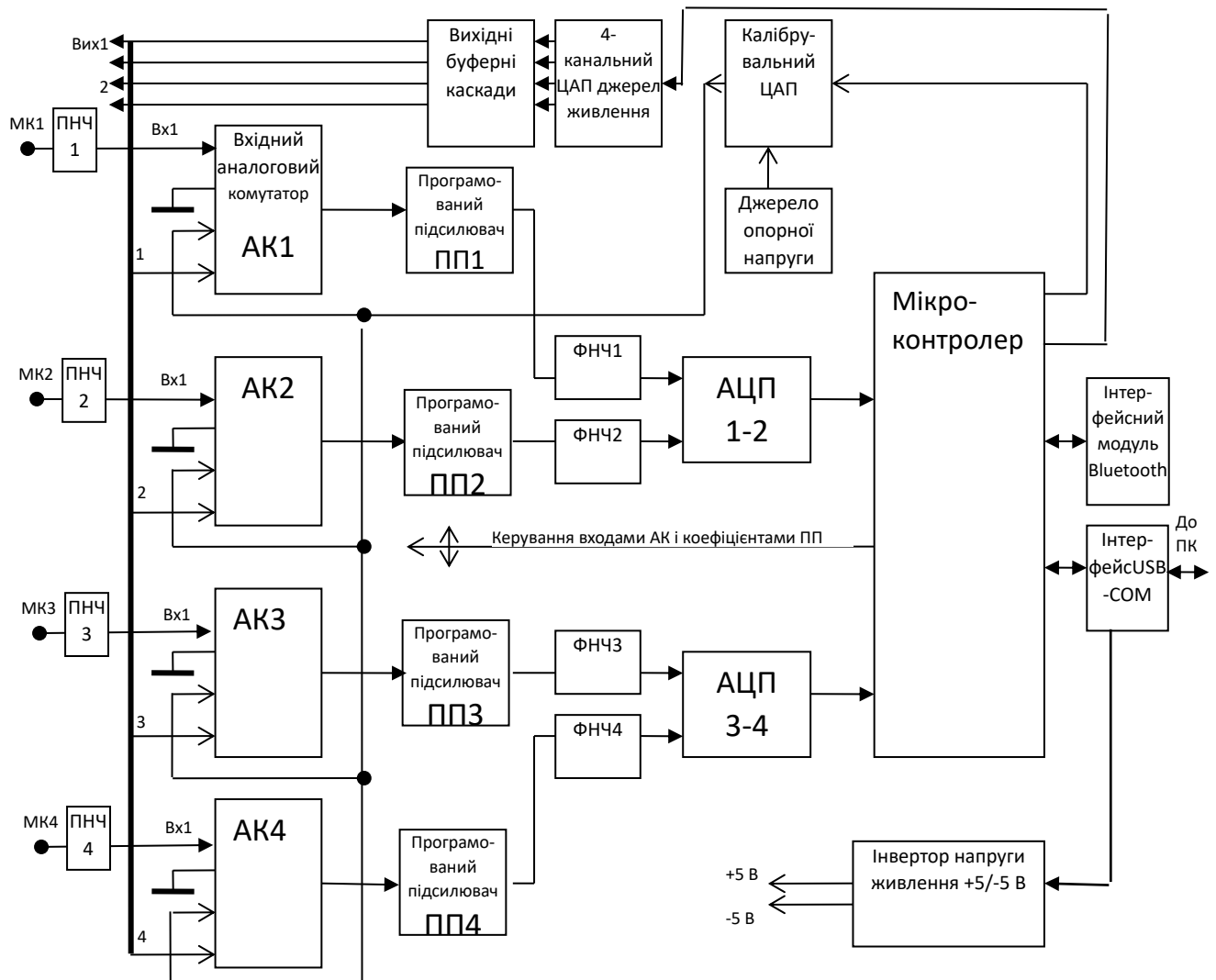


Рисунок 3.3 — Функціональна схема 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи

Вхідні напруги відповідних каналів 4-канального ЦАП джерел живлення (мікросхеми ОП DA1...DA4 та ЦАП DA9) подаються на четверті входи АК. Вибір одного з чотирьох входів АК керується мікроконтролером DD1 одночасно для всіх чотирьох каналів, оскільки процедура калібрування здійснюється для всіх каналів одночасно.

Аналогові сигнали з виходів комутаторів АК надходять на диференційні входи програмованих підсилювачів ПП1...ПП4 (DA11...DA14). Коефіцієнти підсилення ПП можуть бути налаштовані на значення  $K_p = 1, 2, 3, 4$ , що

визначає діапазони вхідних напруг: 2В, 1В, 0.5В, 0.25В відповідно. У кожному з чотирьох каналів можна незалежно вибрати діапазон вхідних напруг.

Для забезпечення антиаліазінгової фільтрації низьких частот на вході дельта-сигма АЦП використовуються пасивні фільтри першого порядку (з використанням резисторів R27 – R30 та конденсаторів C29 – C32). Крім того, програмовані підсилювачі (ПП) здійснюють функцію перетворення диференційного сигналу на недиференційний і зсувають свою вихідну напругу на величину опорної напруги +2,5 В. Це досягається завдяки мікросхемам АЦП DA16, DA17, які формують опорну напругу і необхідні для роботи АЦП при використанні однополярної напруги живлення +5 В.

Дельта-сигма АЦП здійснюють формування свого вихідного цифрового потоку з об'ємними даними каналів у парах, оскільки вони є двоканальними (стереофонічними). Ці цифрові потоки потім передаються через інтерфейс SPI і приймаються мікроконтролером за допомогою портів А, В та Е, що також відповідають за формування часових діаграм керування АЦП та їх інформаційних сигналів.

Фірма Analog Devices розробила калібрувальний ЦАП, який використовує перемножуючий 12-розрядний ЦАП DAC 8043 (DA15) та окреме джерело опорної напруги ADK 03 (DA18). Незважаючи на лінійність і квантування 12 розрядів у ЦАП, ця схема може використовуватись як каліброване джерело гармонійного сигналу за амплітудою. Це досягається завдяки точному передаванню значення зовнішньої опорної напруги в верхній точці шкали з похибкою до 0,01%.

Мікроконтролер використовує порти В і Е для створення цифрових тестових сигналів, що калібрують ЦАП і 4-канальний ЦАП, а також для подачі напруги до джерел напруги (DA9). Чотириканальний ЦАП має буферні підсилювачі, які встановлені на ОП DA1 ... DA4 від Analog Devices. Ці підсилювачі створюють вихідні диференційні напруги живлення для вхідних сенсорів, які називаються "фантомною" напругою для активних мікрофонів.



Мікроконтролер має вбудований USB-інтерфейс, який забезпечує зв'язок з зовнішнім ПК. Для безпроводного зв'язку використовується Bluetooth-модуль HC05 від ITEAD Studio.

АЦ-система отримує електроживлення від двох джерел. Перше - комп'ютерний порт USB, який надає напругу +5 В. Друге джерело живлення - DC/DC інвертор на мікросхемі MC 34063 (DA19). Для живлення через порт USB +5 В може використовуватися зовнішній акумулятор Power Bank з ємністю 6000 мА/год.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської дипломної роботи здійснено комплексне дослідження аналого-цифрової системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів. У роботі були поставлені та вирішені такі основні завдання:

— проведено аналіз теоретичних основ аналого-цифрового перетворення низькочастотних сигналів, детально розглянуто принципи роботи АЦП та їхню математичну модель, вивчено основні методи дискретизації та квантування сигналів, а також алгоритми обробки і реконструкції сигналів;

— проведений аналіз предметної області, вивчено існуючі архітектури АЦП та їхні переваги та недоліки, розглянуті різні типи модуляції та розроблені методи вибору оптимальної архітектури для високоточного перетворення низькочастотних сигналів;

— досліджено важливі параметри аналого-цифрових систем, такі як частота дискретизації, кількість бітів, динамічний діапазон, спектральна ширина і шумові характеристики, визначено їх вплив на якість перетворення сигналів та зроблено висновки про оптимальні значення цих параметрів для низькочастотних сигналів;

— досліджено практичні аспекти реалізації аналого-цифрових систем, розглянуто вибір компонентів, зокрема аналогових операційних підсилювачів, опорних джерел, інтегральних схем, а також вибір оптимальних алгоритмів обробки сигналів. Вивчено методи мінімізації впливу шумів, спотворень та інших негативних факторів.

В результаті проведених досліджень отримано цінні практичні рекомендації щодо вибору та реалізації аналого-цифрових систем високоточного перетворення низькочастотних сигналів. Робота внесла вагомий внесок у розуміння принципів функціонування АЦП та методів оптимізації їхньої роботи для досягнення високої якості перетворення сигналів.

Оскільки поставлені задачі виконано, отже можна вважати мету бакалаврської дипломної роботи досягнутою.

## ПРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Бондар, В.; Крупельницький, Л.. Мікроконтролерна реалізація самокаліброваної багатоканальної АЦ-системи введення й обробки аналогових сигналів. НТКП ВНТУ. Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Ukraine, mar. 2023. [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2023/paper/view/17456/14494>.
2. Analog Devices AD7768. [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7768-7768-4.pdf>.
3. Microchip MCP3424. [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP3424>.
4. Cirrus Logic CS5368. [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: [https://octopart.com/cs5368-cqz-cirrus+logic-401475?gclid=CjwKCAjw1YCKBhAOEiwA5aN4AQRSnCsHkwQnBhyyp0TgjVZ2UNJc3JOgaw3ViFkhs5SjNjGKzCfMbhoCSzMQAvD\\_BwE](https://octopart.com/cs5368-cqz-cirrus+logic-401475?gclid=CjwKCAjw1YCKBhAOEiwA5aN4AQRSnCsHkwQnBhyyp0TgjVZ2UNJc3JOgaw3ViFkhs5SjNjGKzCfMbhoCSzMQAvD_BwE).
5. Walt Kester Data Conversion Handbook. – Newnes, 2004. – 953p.
6. Principles of Data Conversion System Design / Behzad Razavi, December 1994. - Wiley-IEEE Press. - 272 p.- ISBN: 978-0-780-31093-3.
7. Brubaker I., Boyacigiller Z., Bradshaw P. 14-bit DAC mates with mPS, settles in less than 1  $\mu$ s / Electronic Design. – April 16, 1981. – P. 147-151.
8. Watson D. 16-bit monolithic DAC attains modular performance / Electronic Design. – November 11, 1982. – P. 121-130.
9. Boyacigiller Z., Sockolov S. Increase analog system accuracy with a 14-bit monolithic ADC // EDN. – 1992. – August. – N18. – P. 137-144.
10. Alexey D. Azarov , Vladimir A. Harnaha Multichannel Analog-to-Digital System for Registration of Pulse Low Frequency Signals Based on Redundant Digital-to-Analog Converter // Journal of Automation and Information Sciences / Volume 49, 2017 Issue 12, pages 35-44 / DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v49.i12.40.

11. [Baoqing Deng](#), [Zhang Bo](#), [Yuchuan Jia](#), [Zengfa Gao](#) Research on STM32 Development Board Based on ARM Cortex-M3 // [IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology](#).- Oct. 2020.- P. 14-16.- doi: [10.1109/ICCASIT50869.2020](#).
12. STM32F405xx STM32F407xx [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf>.
13. О. Азаров, О. Черняк і О. Стахов АЦП порозрядно-слідкувального врівноваження з ваговою надлишковістю // ІТКІ.- Груд. 2020.- Vol. 49.- № 3.- С. 37-44.
14. [Azarov, O., Heneralnytskyi, Y., & Rybko, N. \(2020\). Multi-channel digital-analog system based on current-current converters //Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska.- 2020.-№ 10\(4\).- P. 43-46.- <https://doi.org/10.35784/iapgos.2082>.](#)
15. О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, О. Я. Стахов Багатоканальна швидкодіюча система АЦП-ЦАП на базі високолінійних перетворювачів струм-струм // ІТКІ.- Квіт. 2021.- № 1.- С. 69–79.
16. Quad, 12-/14-/16-Bit nanoDACs with 5 ppm/ C On-Chip Reference, I2 C Interface AD5665 Data Sheet / Analog Devices [Електронний ресурс]. – URL: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5625R\\_5645R\\_5665R\\_5625\\_5665.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5625R_5645R_5665R_5625_5665.pdf).
17. Grondin F. Lightweight and optimized sound source localization and tracking methods for open and closed microphone array configurations / Grondin F., Michaud F. // Robotics and Autonomous Systems. – 2019. – Vol. 113. – P. 63–80.

**ДОДАТОК А**

Технічне завдання

Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет

Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії

Кафедра обчислювальної техніки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., професор

\_\_\_\_\_ О.Д. Азаров

“ 24 ” квітня 2023 р.**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

На виконання комплексної бакалаврської дипломної роботи

«Аналого – цифрова система високоточного перетворення низькочастотних  
сигналів. Частина 1. Апаратна частина»

08-23. КБДР.027.00.000 ТЗ

Керівник, к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Л.В. Крупельницький

Виконавець

\_\_\_\_\_ В.А. Бондар

2023 р.

## 1 Підстава для проведення робіт

1.1 Сучасні технології зростаючої складності та розвиток індустрії споживають все більш високу якість та точність обробки сигналів. Особливо важливим є перетворення низькочастотних аналогових сигналів у цифрову форму, яка дозволяє їх обробку та зберігання за допомогою електронних пристроїв. Аналого-цифрові системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів (АЦС) є важливим компонентом сучасних електронних систем, таких як медична техніка, комунікаційні системи, аудіо та відео обробка, радіолокаційні системи та багато інших. Вони виконують перетворення неперервних аналогових сигналів у цифрову форму, що дозволяє їх подальшу обробку, передачу та зберігання.

### 1.2 Наказ про затвердження теми БДР

Робота проводиться на підставі наказу по ВНТУ № 67 від 20.03.2023

## 2. Мета БКР і призначення розробки

2.1 Метою роботи є підвищення точності, швидкодії методів опрацювання багатоканальних даних, схем, алгоритмів, апаратних і програмних засобів для новітніх аналого-цифрових систем (АЦ-систем) обробки низькочастотних сигналів.

### 2.2 Призначення розробки

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) використовуються для перетворення аналогових сигналів на цифровий формат. Вони є ключовими компонентами в багатьох сферах технології, науки та промисловості.

## 3 Основні технічні вимоги

3.1 При розробці компонентів і експериментальних зразків багатоканальних аналого-цифрових самокаліброваних систем моніторингу й синхронного опрацювання низькочастотних сигналів необхідно виходити з наступних основних вимог, обумовлених її призначенням:

— апаратна складова АЦ-систем повинна періодично самокалібруватись для забезпечення потрібних параметрів точності;

— програмна складова АЦ-систем повинна бути модульною, з паралельним виконанням операцій сканування, візуалізації, аудіодетекції, реконструкції акустичного поля.

3.2 Апаратна складова експериментальних зразків АЦ-систем повинна забезпечити:

- приймання вхідних низькочастотних сигналів з чотирьох та восьми вимірювальних каналів;
- підсилення звукових сигналів малошумними лінійними підсилювачами низьких частот;
- синхронне аналого-цифрове перетворення сигналів з високою роздільною здатністю, ідентичністю та лінійністю амплітудно-фазо частотної характеристики (АФЧХ);

3.3 Вимоги до параметрів апаратної частини:

- число незалежних вхідних вимірювальних каналів з одночасною комутацією, підсиленням та АЦ—перетворенням – 4;
- значення програмованих діапазонів вхідної напруги в кожному каналі:  $\pm 0.25$  В;  $\pm 0.5$  В;  $\pm 1.0$  В;  $\pm 2.0$  В;
- тип входів — симетричний, з максимальним сумарним значенням синфазної та диференційної складових в межах напруги живлення  $\pm 5.0$  В. Передбачити захист входів від перевантаження напругою до  $\pm 50$  В;
- діапазон робочих частот сигналів сенсорів – від 1 Гц до 10 кГц;
- роздільна здатність АЦ-перетворення — не менше 20 двійкових розрядів;
- частота дискретизації АЦП – змінювана від 32 кГц до 98 кГц.

3.4 Спеціалізоване програмне забезпечення повинно виконувати наступні функції:

- постійне приймання цифрових сигналів каналів 1...4 та 5...8 з інтерфейсів USB;
- буферизація (накопичення) сигналів у двох вхідних буферах даних на час обробки (3...5) с;

3.5 Конструктивне виконання вимірювальної частини експериментальних зразків АЦ-систем – чотири мікрофонні решітки з 4-ма вимірювальними мікрофонами кожна, чотири модулі АЦ-перетворення.

3.6 Діапазон робочих температур експлуатації — від мінус 10 град. С до +40 град. С.

#### 4. Етапи БДР та очікувані результати

##### 4.1 Етапи та очікувані результати в таблиці А.1.

Таблиця А.1 — Етапи БДР

Номер етапу	Назва етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	кінець	
1	Огляд і аналіз існуючих методів та рішень побудови АЦС	12.03.2023	19.03.2023	Аналітичний огляд літературних джерел, задачі досліджень, розділ 1 ПЗ
2	Дослідження методів порівняння аналогових сигналів	05.04.2023	12.04.2023	Розділ 2
3	Розробка структурної та функціональної схем АЦС	20.04.2023	30.04.2023	Розділ 3
4	Написання програмного забезпечення для АЦС	02.05.2023	15.05.2023	Розділ 3
5	Оформлення пояснювальної записки, графічного матеріалу і презентації	16.05.2023	23.05.2023	ПЗ, графічний матеріал і презентація
6	Підготовка супроводжуючих документів, їх підписування, проходження нормоконтролю та тесту на плагіат	01.06.2023	09.06.2023	Оформлені документи

#### 5 Матеріали, що подаються до захисту БКР

До захисту подаються: пояснювальна записка БДР, графічні і ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту БДР на кафедрі, відгук наукового керівника, анотації до БДР українською та іноземною мовами.

#### 6 Порядок контролю виконання та захисту БКР

Виконання етапів графічної та розрахункової документації БКР контролюється науковим керівником згідно зі встановленими термінами. Захист БКР відбувається на засіданні Екзаменаційної комісії, затвердженої наказом ректора.



## 7 Вимоги до оформлювання та порядок виконання БКР

### 7.1 При оформлювання БКР 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 бакалаврських кваліфікаційних робіт зі спеціальності 123 — «Комп'ютерна інженерія» (освітня програма «Комп'ютерна інженерія»). Кафедра обчислювальної техніки ВНТУ 2022;
- документами на які посилаються у вище вказаних.

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

## **ДОДАТОК Б**

Схема електрична принципова АЦС



Поз. значення	Назва	Кіл.	Примітка
A1	Модуль HC-06	1	Wi-Fi
BQ1	Резонатор HC 49SMD 16 МГц	1	
	Конденсатори		
C1...C17	0805-X7R-0,1 uF $\pm$ 5% - 50B	18	
C18	0805-HPO-15 pF $\pm$ 5% - 50B	1	
C19...C28	0805-X7R-0,1 uF $\pm$ 5% - 50B	10	
C29...C32	0805-HPO-1 nF $\pm$ 5% - 50B	4	
C33,C34	ECR-16B-10 uF	2	
C35...C38	0805-X7R-0,1 uF $\pm$ 5% - 50B	4	
C39,C40	ECR-16B-10 uF	2	
C41...C44	0805-X7R-0,1 uF $\pm$ 5% - 50B	4	
C45,C46	ECR-16B-10 uF	2	
C47	0805-X7R-0,1 uF $\pm$ 5% - 50B	1	
C48	ECR-16B-100 uF	1	
C49	0805-X7R-0,1 uF $\pm$ 5% - 50B	1	
C50	ECR-16B-100 uF	1	
C51...C54	0805-HPO-1 nF $\pm$ 5% - 50B	4	
C55	0805-X7R-0,1 uF $\pm$ 5% - 50B	1	
C56,C57	ECR-16B-100 uF	2	
C58	0805-X7R-0,1 uF $\pm$ 5% - 50B	1	

Зм.	Лист	№ докум.	Підр.	Дата	08-23. КБДР.027.00.000 ПЗ			
Розробив		Бондар В.А			Аналого - цифрова система високочотного перетворення низькочастотних сигналів Перелік елементів	Літ.	Лист	Листів
Перевірів		Крупельницький Л.В					58	4
Нормоконт.		Швець С.Л						
Рецензент		Войтко В.В.						
Затвердив		Азаров О.Д.						



Поз. значення	Назва	Кіл.	Примітка
K1	Кнопка ТАСТ 6x6-8.0 SMD	1	тактова
L1	Дросель CD32-330MT	1	
	Резистори		
R1...R8	RC11-0805-10 Ом $\pm$ 1%-0,125W	8	
R9...R16	RC11-0805-1 кОм $\pm$ 1%-0,125W	8	
R16...R26	RC11-0805-10 кОм $\pm$ 1%-0,125W	10	
R27...R30	RC11-0805-49,9 Ом $\pm$ 1%-0,125W	4	
R31,R32	RC11-0805-0 Ом $\pm$ 1%-0,125W	2	
R33	RC11-0805-0,2 Ом $\pm$ 1%-0,125W	1	
R34	RC11-0805-3 кОм $\pm$ 1%-0,125W	1	
R35	RC11-0805-1 кОм $\pm$ 5%-0,125W	1	
R36	RC11-0805- 0 кОм $\pm$ 5%-0,125W	1	
R37	RC11-0805-10 кОм $\pm$ 5%-0,125W	1	
R38... R40	RC11-0805-1 кОм $\pm$ 5%-0,125W	3	
R41,R42	RC11-0805- 68 Ом $\pm$ 5%-0,125W	2	
R43	RC11-0805-1 кОм $\pm$ 5%-0,125W	1	
	Діоди		
VD1	SS14	1	SMA
VD2... VD4	Світлодіод SMD 0805	3	

					08-23. КБДР.027.00.000 ПЗ	
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		





## ДОДАТОК Д

## Функціональна схема 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи

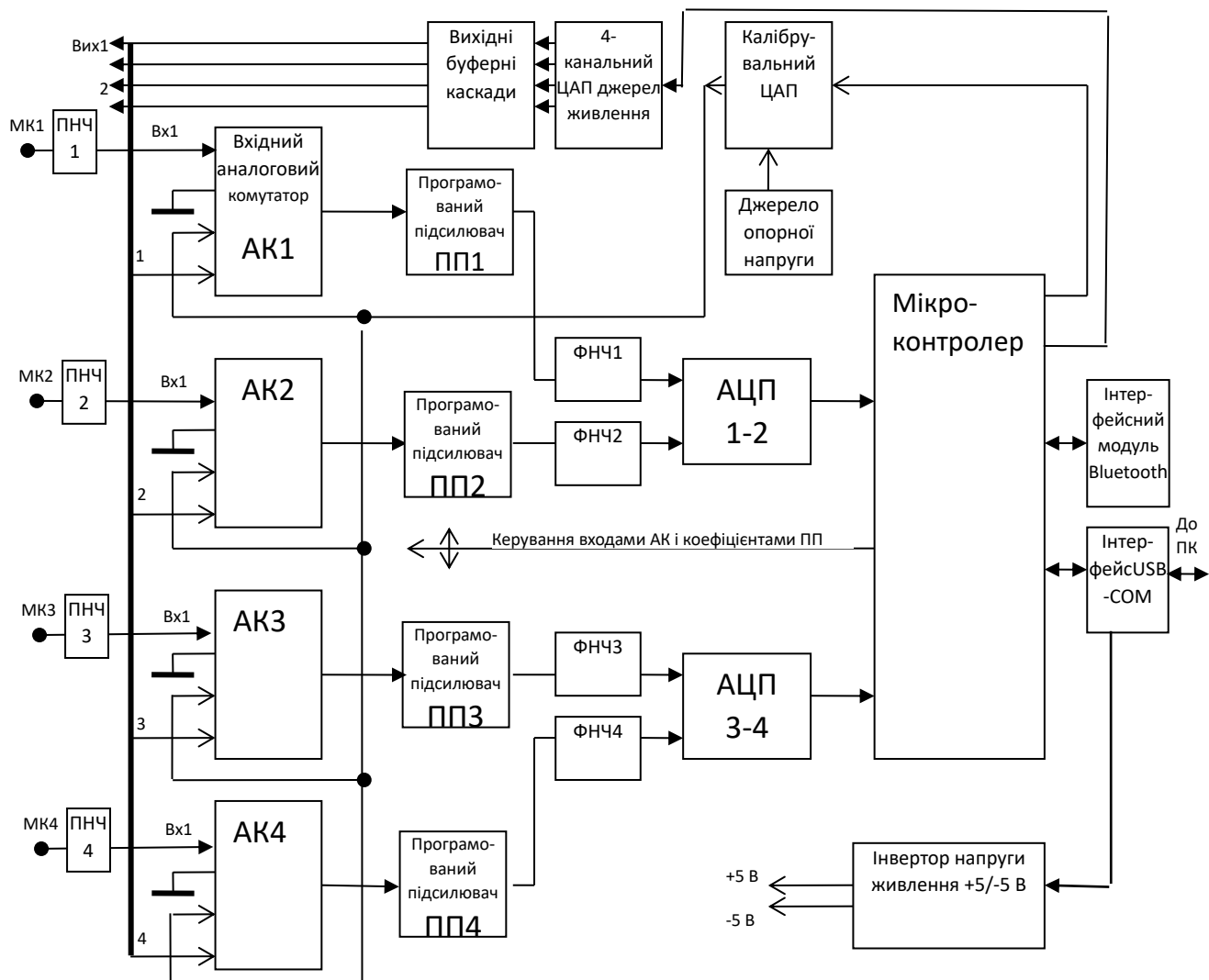


Рисунок Д.1 — Функціональна схема 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи



## ДОДАТОК Е

## Структурна схема 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи

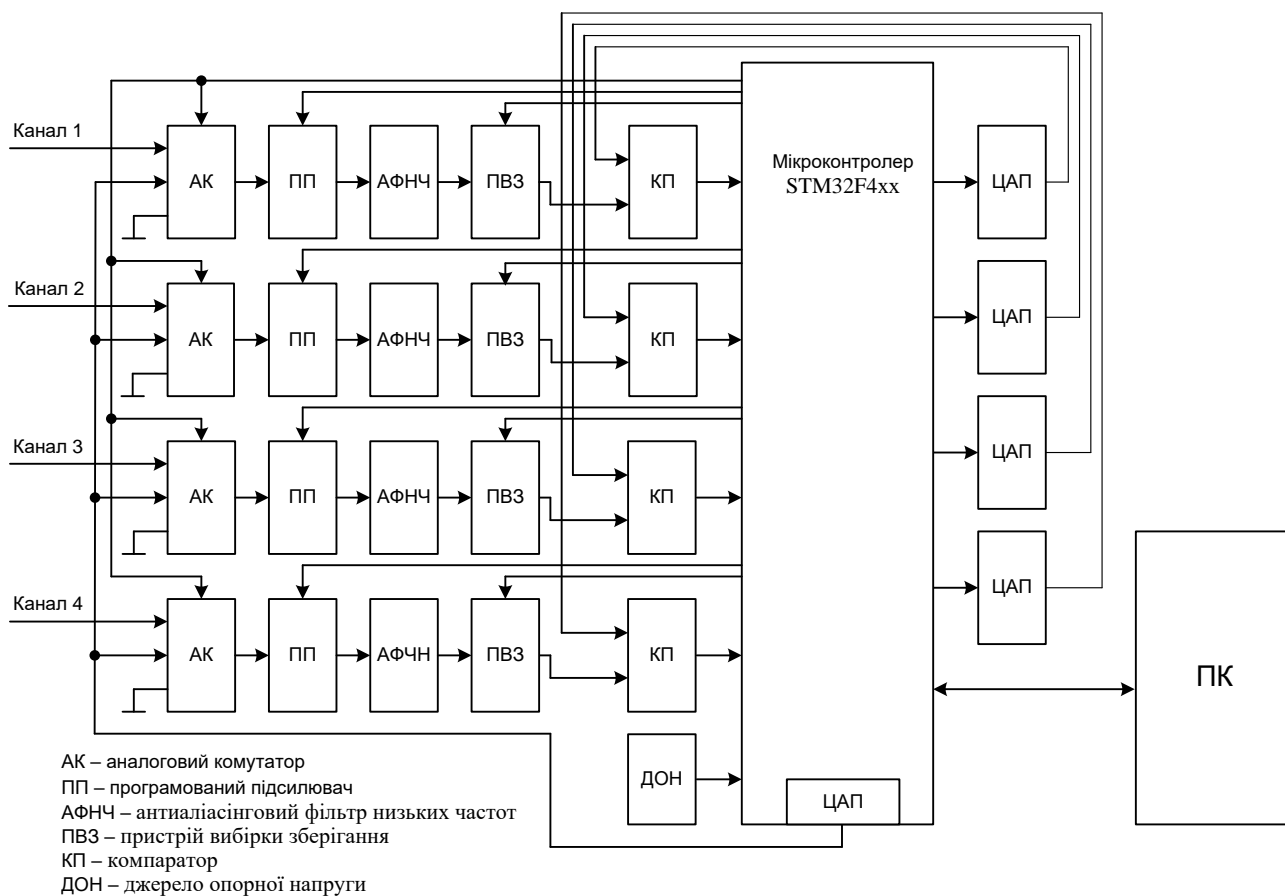


Рисунок Е1 — Структурна схема 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи

## ДОДАТОК Ж

Структурна схема паралельно-последовного АЦП з коригуванням

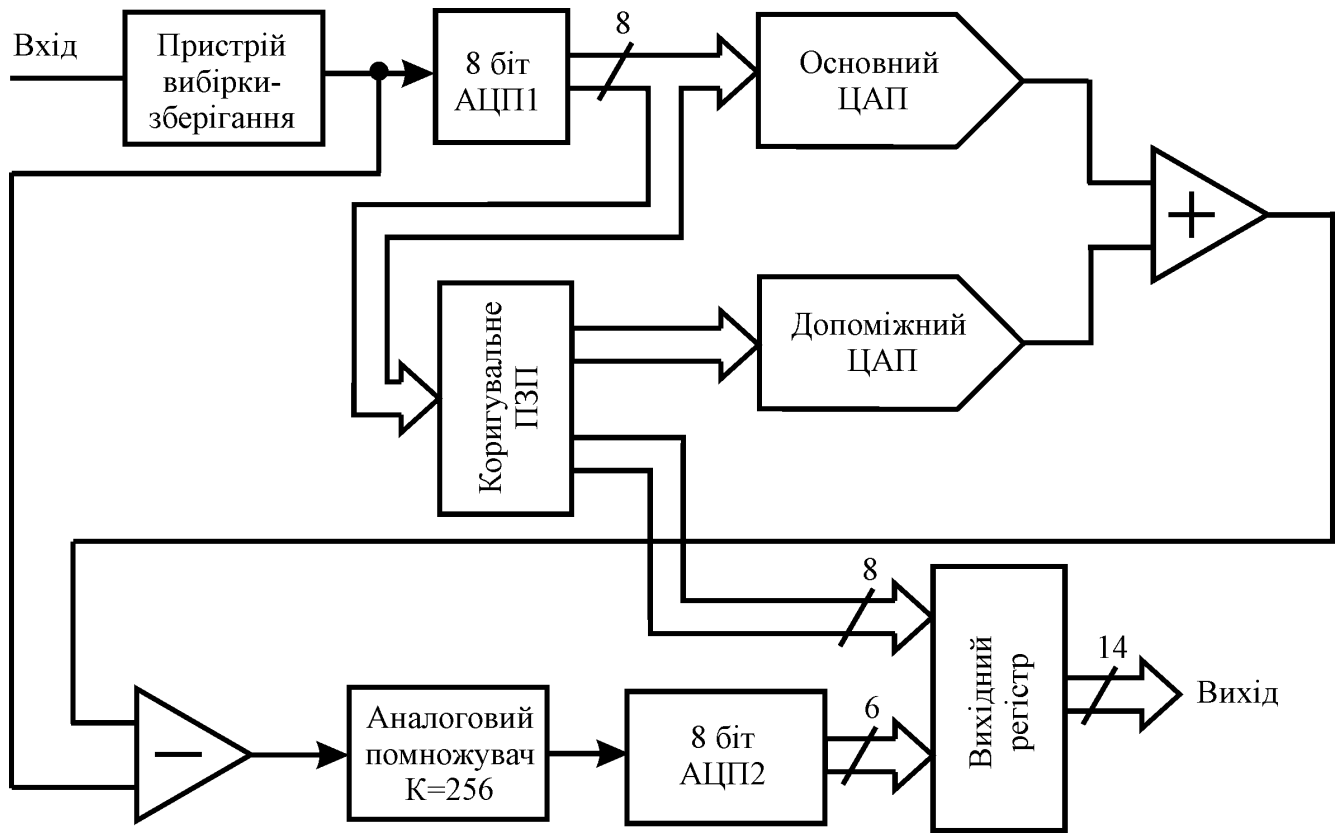


Рисунок Ж1 — Структурна схема паралельно-последовного АЦП з коригуванням

