


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

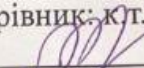
**КОМПЛЕКСНА БАКАЛАВРСЬКА ДИПЛОМНА РОБОТА НА ТЕМУ:**


«Аналого-цифрова система високоточного перетворення низькочастотних  
сигналів». Частина 2. Програмне забезпечення

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

123 Комп'ютерна інженерія,  
освітня програма «Комп'ютерна інженерія»

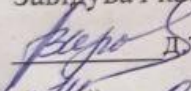
 Слободянюк П.П.

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

 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»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерна інженерія»

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ ОТ

д.т.н., проф. Азаров О. Д

«20» 05 2023 р.

### ЗАВДАННЯ

#### НА КОМПЛЕСНУ БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

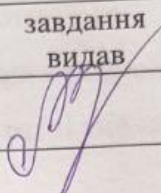
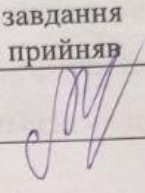
Слободянюку Павлу Петровичу

1. Тема проекту «Аналого – цифрова система високоточного перетворення низькочастотних сигналів. Частина 2. Програмна 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, Bluetooth. Наявність самокорекції.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) вступ, огляд і аналіз інформації, коротка історія аналого-цифрових перетворювачів, огляд предметної області, характеристика перетворення аналогового сигналу, теоретичні дослідження, моделювання методу і розробка загального алгоритму, аналіз відомих аналогів, формулювання своїх рішень, порівняння параметрів, алгоритми калібрування статичних вимірювальних каналів, алгоритми калібрування динамічних вимірювальних каналів, структурні та схемотехнічні рішення вимірювальних каналів ац-системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів, розробка і експериментальні дослідження програмного забезпечення, схемотехнічна та програмна реалізація підсистеми підсилення й ац-перетворення, висновок, перелік джерел посилань, додаток а, додаток б, додаток в, додаток д, додаток е, додаток ж, додаток к.



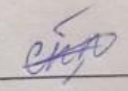
5. Перелік графічного матеріалу: Процес перетворення аналогового сигналу на цифровий, Фактори, які впливають на вибір частоти дискретизації, Структурна схема АЦП AD7091R-5, Структурна схема АЦП ADS122U04, Структурна схема АЦП LTC2499, Структура вимірювального каналу та кіл калібрування, Блок-схема алгоритму калібрування статичних характеристик вимірювальних каналів, Блок-схема алгоритму калібрування динамічних характеристик вимірювальних каналів, Функціональна схема 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи.
6. Консультанти розділів роботи

7. Дата видачі завдання 20.03.2023

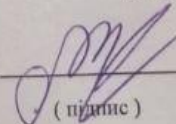
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-3	Крупельницький Л.В. к.т.н., доцент кафедри ОТ		

### 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	Огляд і аналіз систем контролю та управління доступом	01.03-14.03.23	
4	Проектування програмної частини АЦП	15.03-28.03.23	
5	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу	12.04-25.04.23	
6	Аналіз виконання проекту. Висновки. Додатки	26.04-09.05.23	
7	Перевірка якості виконання бакалаврського проекту та усунення недоліків	16.05.23	

Студент   
(підпис)

Слободянюк П.П.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи   
(підпис)

Крупельницький Л.В.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

УДК 08-23. КБДР.028.00.000 ПЗ

Слободянюк П.П. Аналого-цифрова система високоточного перетворення низькочастотних сигналів. Частина 2. Програмне забезпечення. Бакалаврська дипломна робота зі спеціальності 123 – Комп'ютерна інженерія, освітня програма – Комп'ютерна інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2023.

Дана бакалаврська дипломна робота присвячена детальному дослідженню та розробці аналого-цифрової системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів. Основною метою дослідження є розробка ефективної та точної системи, яка здатна перетворювати низькочастотні аналогові сигнали в цифровий формат з високою ступенем точності.

У рамках дослідження будуть розглянуті основні концепції та принципи аналого-цифрового перетворення, включаючи важливі параметри, які впливають на точність та якість отриманих цифрових сигналів. Додатково, будуть проведені порівняльні аналізи різних методів та алгоритмів, які застосовуються в аналого-цифрових системах високоточного перетворення низькочастотних сигналів, та написано програмне забезпечення для АЦС.

Ключові слова: квантування, дискретизація, перетворення, система, роздільна здатність, мікроконтролер.



## ЗМІСТ

<b>Вступ.....</b>	<b>8</b>
<b>ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЇ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Коротка історія аналого-цифрових перетворювачів.....	10
Огляд предметної області.....	13
1.3 Характеристика перетворення аналогового сигналу.....	17
<b>2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДУ І РОЗРОБКА ЗАГАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ.....</b>	<b>25</b>
2.1 Аналіз відомих аналогів, формулювання своїх рішень, порівняння параметрів.....	25
2.2 Алгоритми калібрування статичних вимірювальних каналів.....	30
2.3 Алгоритми калібрування динамічних вимірювальних каналів.....	35
Структурні та схемотехнічні рішення вимірювальних каналів ац-системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів.....	40
<b>3 РОЗРОБКА І ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....</b>	<b>44</b>
<b>ВИСНОВОК.....</b>	<b>49</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>50</b>
<b>ДОДАТОК А Технічне завдання.....</b>	<b>51</b>
<b>ДОДАТОК Б Лістинг файлу DataCom.h.....</b>	<b>57</b>
<b>ДОДАТОК В Лістингу файлу VirtualCom.h.....</b>	<b>60</b>
<b>ДОДАТОК Д Лістинг файлу HC05.c.....</b>	<b>64</b>
<b>ДОДАТОК Е Лістинг файлу OP_SetAmp.h.....</b>	<b>68</b>

					08-23. КБДР.028.00.000 ПЗ					
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Аналого – цифрова система високоточного перетворення низькочастотних сигналів. Частина 2.Програмна частина Пояснювальна записка			<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
Розроб.		Слободянюк П.П.						6	78	
Перевір.		Крупельницький Л								
Реценз.		Войтко В.В.						<i>ВНТУ, гр. 2КІ-196</i>		
Н. Контр.		Швець С. І.								
Затверд.		Азаров О.Д.								

ДОДАТОК Ж Лістингу файлів AD5666.h, N\_ADC.c.....70

ДОДАТОК К ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА  
НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ.....77

					08-23. КБДР.028.00.000 ПЗ	Арк.
						7
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ВСТУП

В останні роки високоточні аналого-цифрові системи (АЦС) знайшли актуальне застосування в різних сферах, включаючи медицину, комунікації, промисловість та наукові дослідження. АЦС відіграють важливу роль у перетворенні аналогових сигналів у цифрову форму для обробки і аналізу.

Одним з ключових аспектів високоточного перетворення сигналів є низькочастотні сигнали. Ці сигнали мають низьку частоту, але вимагають високої точності перетворення для забезпечення відповідності вимогам додатку. Високоточна аналого-цифрова система високоточного перетворення низькочастотних сигналів стає важливою складовою для досягнення високої якості і точності вимірювань.

**Мета** даної бакалаврської дипломної роботи полягає у дослідженні та розробці аналого-цифрової системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів. У роботі вирішені завдання, пов'язані з проектуванням, реалізацією та характеристиками системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів.

Для коректного виконання роботи сформульовано наступні задачі:

- дослідити основні принципи перетворення аналогових сигналів у цифрову форму, зокрема методи квантування, вибірки та кодування;
- розглянути різні архітектури і топології АЦС, які підходять для високоточного перетворення низькочастотних сигналів;
- провести аналіз і порівняння різних моделей АЦС, які є популярними на ринку;
- проаналізувати алгоритми калібрування динамічних вимірювальних каналів;
- реалізувати схемотехнічну та програмну підсистему підсилення й аналого-цифрового перетворення.

Загалом, метою цієї бакалаврської дипломної роботи є розуміння та розвиток системи перетворення низькочастотних сигналів з використанням аналого-



цифрової технології. Вивчення цієї теми не лише збагатить наші знання про сучасні технології, але також сприятиме подальшому прогресу в галузі електроніки та застосуваннях, де точне перетворення сигналів є вирішальним фактором

## ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЇ

### 1.1 Коротка історія аналого-цифрових перетворювачів

Історія аналого-цифрових систем (АЦС) має глибокі коріння, починаючи з винайдення першої аналогової системи, але була визначальною з появою цифрової технології.

Аналого-цифрова конверсія сигналів почала розвиватися в 20-х роках 20 століття. У 20-х роках 20 століття аналого-цифрова конверсія була на початкових етапах свого розвитку. Технологічний прогрес у сфері електроніки та комунікацій поступово створював умови для перетворення аналогових сигналів у цифровий формат.

У цей період було розроблено перші примітивні пристрої для аналого-цифрової конверсії, що використовувалися в основному для телеграфних систем. Наприклад, телеграфний пристрій, який використовував код Морзе, можна вважати одним з перших прикладів аналого-цифрової конверсії. Сигнали, які надходили з допомогою дотику до клавіш, перетворювалися на послідовні цифрові символи, які потім передавалися по дротовій лінії. Однак, у 20-х роках аналого-цифрова конверсія була обмежена залежностями від механічних та електричних компонентів. Зазвичай використовувались пристрої на основі лампових елементів, які мали обмежену швидкість та точність. Прогрес у розвитку електронних компонентів і технологій у подальших десятиліттях привів до значного покращення аналого-цифрової конверсії. Інтегральні схеми, впровадження цифрової обробки сигналів та розробка нових методів квантування, вибірки та кодування сприяли збільшенню швидкості та точності АЦС. Таким чином, в 20-х роках 20 століття аналого-цифрова конверсія вже існувала, але вона була ще в ранньому етапі свого розвитку.

Перші спроби перетворення аналогових сигналів у цифрову форму використовували механічні та електричні пристрої, такі як телеграфний апарат та дзвоник-датчик. Проте, ці методи були обмежені швидкістю та точністю.

З появою електронних пристроїв і технологічних проривів, наприклад, початку використання транзисторів у 1947 році, з'явилися нові можливості для розвитку АЦС.

У 1950-х роках було запропоновано перші інтегральні схеми, що сприяли збільшенню швидкості і ефективності перетворення. Перші інтегральні схеми, що сприяли збільшенню швидкості та ефективності перетворення в аналого-цифрових системах (АЦС), були створені в 1960-х роках. Одним з найважливіших досягнень було впровадження інтегрованих схем з реєстрацією прямого доступу до пам'яті (Direct Memory Access - DMA).

DMA дозволило пряме зчитування аналогових сигналів та їх передачу в пам'ять без участі центрального процесора (ЦП). Це значно збільшило швидкість перетворення, оскільки дані могли бути передані без затримок, пов'язаних з обробкою ЦП. DMA також знизило ймовірність втрати даних і покращило ефективність системи.

Крім DMA, винайдення інтегральних схем з великою кількістю операційних посилювальних елементів (оп-амп) також сприяло збільшенню швидкості та ефективності перетворення в АЦС. Інтегровані оп-ампи забезпечували більш точне і стабільне посилення сигналу, що було необхідно для точного і надійного перетворення аналогового сигналу в цифрову форму.

Поступово, з появою нових технологій інтеграції, таких як високоефективні CMOS (комплементарно-метал-оксид-напівпровідникова) технології, було можливо розміщувати більше компонентів на одній інтегральній схемі. Це дозволило створювати більш складні та функціональніші АЦС з високою швидкістю та ефективністю.

Зростання швидкості та ефективності перетворення в АЦС також було підсилено розвитком цифрової схемотехніки, включаючи використання більш потужних процесорів, вдосконалення алгоритмів квантування та обробки сигналів, а також оптимізацію архітектури АЦС для конкретних застосувань. Протягом наступних десятиліть відбувалися значні технологічні прогреси в

галузі АЦС. Виникли нові методи та алгоритми квантування, вибірки та кодування, які забезпечували вищу точність та якість перетворення сигналів.

Значний вплив на розвиток АЦС мала цифрова революція, яка почалася в 1970-х роках. Цифрова революція в контексті аналого-цифрових систем (АЦС) відіграла ключову роль у перетворенні цих систем і забезпечила значні переваги у швидкості, точності та ефективності перетворення.

Перша хвиля цифрової революції в АЦС почалася в 1970-х роках з появою мікропроцесорів і цифрових сигнальних процесорів (ЦСП). Це відкрило нові можливості для обробки і аналізу цифрових сигналів, що передували їх перетворенню з аналогової форми. Однією з головних переваг цифрової обробки сигналів стало використання алгоритмів для поліпшення якості сигналу. Цифрові фільтри, коригуючі алгоритми та компенсаційні методи забезпечували зменшення шуму, лінійність, підсилення динамічного діапазону та покращення роздільної здатності. Також цифрова обробка дозволяла забезпечити більш точне квантування та збереження даних, оскільки цифрові дані стійкіші до шуму та спотворень.

Завдяки цифровим технологіям стало можливим збереження, передача та обробка великих обсягів даних з високою швидкістю. Це відкрило нові можливості для розвитку швидкісних АЦС, які забезпечують високу частоту зразків та швидке перетворення сигналів. Це знадобилося у таких галузях, як телекомунікації, медицина, мультимедіа, радіо та телебачення.

Друга хвиля цифрової революції АЦС настала у 1990-2000-х роках зі зростанням швидкості обробки даних та появою нових технологій. З'явилися високошвидкісні АЦС з швидкістю зразків від кількох мегагерц до гігагерців, що відкрило двері для реалізації нових додатків, таких як радари, високошвидкісні комунікаційні системи та обробка великих обсягів даних в реальному часі. Запровадження інтегрованих схем зі зниженим споживанням енергії, таких як низькопотужні АЦС і АЦС з енергоефективними архітектурами, також стали частиною цифрової революції в АЦС. Це дозволило зменшити споживання

енергії, забезпечити мобільність та зробити АЦС доступними для різних портативних пристроїв.

Цифрова революція в АЦС триває й далі, прогресуючи в напрямку високошвидкісних, високоточних, енергоефективних та компактних рішень. Нові технології, такі як масивні паралельні обчислення, машинне навчання та штучний інтелект, також вносять свій внесок у розвиток АЦС, забезпечуючи нові можливості та застосування у різних галузях науки та технологій.

Введення мікропроцесорів та цифрових сигнальних процесорів (ЦСП) відкрило нові можливості для обробки та аналізу цифрових сигналів. Це призвело до розширення застосування АЦС в таких галузях, як телекомунікації, медицина, радіо, телебачення, автоматизація та багато інших. У 21 столітті АЦС продовжує активно розвиватися, пристосовуючись до зростаючих вимог до точності, швидкості та енергоефективності. З'являються нові технології, такі як потокові АЦС, високошвидкісні АЦС, інтегровані схеми зі зниженим споживанням енергії та багато інших інноваційних рішень.

Загалом, історія питання стосовно аналого-цифрових систем є постійним процесом розвитку та вдосконалення технологій для забезпечення точного та ефективного перетворення аналогових сигналів у цифрову форму.

## 1.2 Огляд предметної області

Аналого-цифрова система високоточного перетворення низькочастотних сигналів є пристроєм або системою, яка призначена для перетворення аналогових сигналів низького частотного діапазону на цифровий формат з високою точністю.

У такій системі аналоговий сигнал спочатку проходить через функцію, яка його підсилює та може змінювати його амплітуду або інші параметри. Наступним кроком є дискретизація сигналу, коли аналоговий сигнал вимірюється і перетворюється на цифровий формат. Це здійснюється шляхом використання аналого-цифрового перетворювача(АЦП), який відповідає за вимірювання

амплітуди сигналу на певних інтервалах часу і призначений для перетворення цих амплітуд на цифрові значення.

Високоточна система перетворення забезпечує високу роздільну здатність, тобто здатність розрізняти малі зміни амплітуди сигналу. Це досягається за допомогою високої роздільної здатності АЦП, який може вимірювати інтервали амплітуди з великою точністю. Це особливо важливо для додатків, які потребують високої точності, наприклад, у медичних пристроях, системах контролю та вимірювання, аудіоапаратурі тощо.

Аналого-цифрові системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів можуть мати різні характеристики, такі як швидкість перетворення (семплування), роздільна здатність, діапазон вимірювання та шум. Вибір конкретної системи залежить від вимог конкретного застосування. Наприклад, вимоги до аналого-цифрової системи для медичного обладнання можуть бути іншими, ніж для системи звукозапису.

Основні параметри, які варто враховувати при виборі аналого-цифрової системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів, включають наступні:

— роздільна здатність (бітова глибина), вона визначає кількість бітів, які використовуються для представлення цифрового значення амплітуди, вища роздільна здатність дозволяє отримувати більш точне представлення аналогового сигналу у цифровій формі;

— швидкість перетворення (семплування) — це кількість вимірів, які система може здійснити протягом однієї секунди, швидкість перетворення повинна відповідати потребам додатку та частоті сигналу, для низькочастотних сигналів, швидкість перетворення може бути меншою, ніж для високочастотних сигналів;

— діапазон вимірювання — це максимальна амплітуда сигналу, яку система може вимірювати без спотворень, важливо вибрати систему з достатньо широким діапазоном вимірювання, щоб вона задовольняла потреби застосування;



— шум і спотворення, вони впливають на точність вимірювання сигналу, високоякісні системи мають низький рівень шуму та мінімальні спотворення сигналу.

При виборі аналого-цифрової системи високоточного перетворення низькочастотних сигналів, важливо збалансувати ці параметри з урахуванням конкретних потреб та обмежень вашого застосування. Наприклад, якщо вам потрібна висока роздільна здатність для точного вимірювання сигналів з високою чутливістю, вам можуть знадобитись системи з більшою бітовою глибиною. Якщо пріоритетом є висока швидкість перетворення для вимірювання швидкозмінних сигналів, ви можете шукати системи з відповідною швидкістю дискретизації.

Крім того, важливо врахувати бюджетні обмеження та доступність на ринку систем. Зазвичай, системи з більшою точністю та розширеними функціональними можливостями коштують більше.

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює аналоговий сигнал на цифровий шляхом дискретизації і квантування.



Рисунок 1.1 — Процес перетворення аналогового сигналу на цифровий

Основний процес включає наступні кроки:

— дискретизація, АЦП вимірює значення аналогового сигналу на певних моментах часу, цей процес відбувається згідно зі швидкістю дискретизації, визначеною частотою зразків (семплів) на секунду, відомої як частота дискретизації, чим вища частота дискретизації, тим точнішим буде представлення аналогового сигналу у цифровій формі;

— квантування, наступним кроком є квантування, при якому амплітуда вимірюваного сигналу розділяється на дискретні рівні, це відбувається шляхом призначення цифрового значення для кожного вимірювання, яке найбільш точно відповідає амплітуді сигналу в певний момент часу, цей процес визначає роздільну здатність АЦП, яка вимірюється в бітах і визначає кількість можливих цифрових значень;

— індексування й кодування, після квантування цифрові значення індексуються та кодуються для подальшого збереження або передачі, звичайно, це виконується у форматі двійкового коду, де кожне вимірювання представлене послідовністю бітів.

Цей процес дискретизації та квантування дозволяє перетворити безперервний аналоговий сигнал на цифровий формат, який можна обробляти та зберігати в цифровій електронній формі. Високоточні АЦП забезпечують більш точне відтворення аналогового сигналу у цифровому вигляді, з меншою втратою спотворень. Це особливо важливо для додатків, де точність вимірювання і відтворення сигналу має вирішальне значення, таких як вимірювальні пристрої, аудіоапаратура, системи зберігання та обробки сигналів.

Після перетворення на цифровий формат, отриманий сигнал може бути подальше оброблений, збережений, переданий або використаний для подальшого аналізу. АЦП використовується в широкому спектрі додатків, від комунікаційних систем і медичного обладнання до автоматизації, робототехніки та сенсорних пристроїв. Важливо вибрати АЦП з відповідними характеристиками, що задовольняють потреби конкретного застосування, зокрема роздільною здатністю,

швидкістю дискретизації, діапазоном вимірювання і шумом, для забезпечення надійного та точного перетворення аналогових сигналів у цифровий формат.

### 1.3 Характеристика перетворення аналогового сигналу

Перетворення сигналу відбувається у двох основних етапах: дискретизації і квантування. В процесі дискретизації аналоговий сигнал перетворюється на послідовність дискретних зразків у часі.

Детальний опис дискретизації включає наступні аспекти: частота дискретизації, інтервали дискретизації, зразки сигналу.

Частота дискретизації є однією з ключових характеристик аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Вона визначає, з якою швидкістю аналоговий сигнал вимірюється та перетворюється на цифровий формат. Частота дискретизації вимірюється у герцах (Hz) і вказує, скільки зразків сигналу береться за одну секунду.

Вплив частоти дискретизації на якість перетворення сигналу може бути розглянутий у контексті теореми Котельникова-Шеннона. Згідно з цією теоремою, щоб аналоговий сигнал був повністю відтворений у цифровому вигляді без втрати інформації, частота дискретизації повинна бути щонайменше двічі вищою за найвищу частоту сигналу. Наприклад, якщо найвища частота вхідного сигналу складає 20 кГц, тоді згідно з теоремою Котельникова-Шеннона мінімальна частота дискретизації повинна бути 40 кГц або більше. Така частота дискретизації забезпечить здатність АЦП точно виміряти і відтворити амплітуду сигналу усередині відповідного діапазону частот. Якщо частота дискретизації нижча, ніж мінімально необхідна, відбувається ефект, відомий як аліасинг. Це призводить до спотворень сигналу, коли високочастотні компоненти сигналу спотворюються та перемішуються з компонентами частота яких нижча.

Однак, варто зазначити, що вибір частоти дискретизації також залежить від конкретних вимог і характеристик системи або додатку, в якому використовується АЦП.

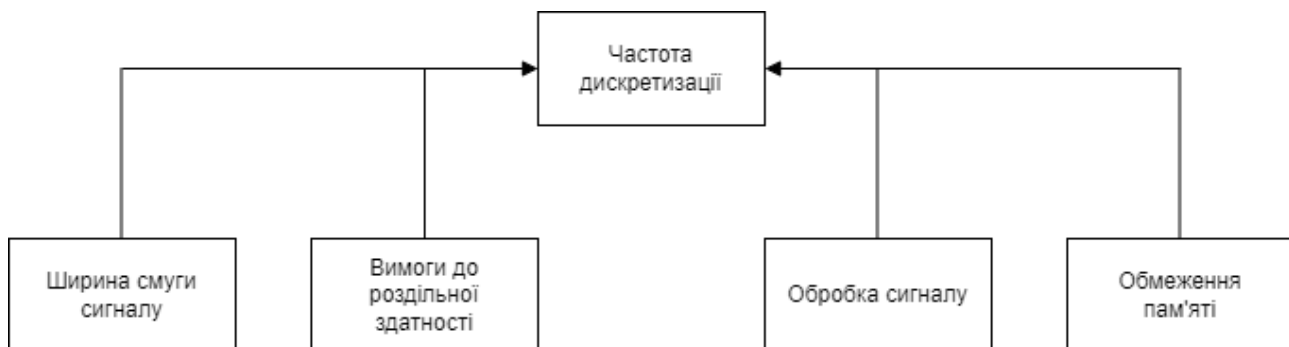


Рисунок 1.2 — Фактори, які впливають на вибір частоти дискретизації

Деякі фактори, які впливають на вибір частоти дискретизації, включають:

— ширина смуги сигналу, якщо вхідний сигнал має широкий спектр частот, то для точного відтворення потрібна вища частота дискретизації;

— вимоги до роздільної здатності, якщо потрібно виміряти або відтворити дуже малі зміни амплітуди сигналу, то може бути потрібна вища частота дискретизації для забезпечення високої роздільної здатності;

— обробка сигналу, якщо планується проводити складну обробку або аналіз сигналу, то вища частота дискретизації може забезпечити кращу якість обробки та точніші результати;

— обмеження пам'яті та обчислювальних ресурсів, вища частота дискретизації призводить до більшого обсягу даних, який потрібно зберігати та обробляти, у деяких випадках обмеження ресурсів можуть змусити обрати нижчу частоту дискретизації.

Вибір оптимальної частоти дискретизації є компромісом між точністю вимірювання, потужністю обчислень, обсягом пам'яті та вимогами до системи. Важливо ретельно аналізувати потреби додатку та забезпечувати достатню частоту дискретизації для забезпечення заданих вимог до якості сигналу.

Інтервали дискретизації визначають часові проміжки між послідовними зразками сигналу в процесі дискретизації. Є декілька основних аспектів пов'язаних з інтервалами, які будуть описані далі.

Частота дискретизації визначає кількість зразків, що беруться на одиницю часу, виразною одиницею для частоти дискретизації є герц (Hz), що означає

кількість зразків, що беруться за одну секунду. Наприклад, якщо частота дискретизації становить 44100 Гц (або 44,1 кГц), це означає, що береться 44100 зразків сигналу за секунду;

Інтервал дискретизації визначає часовий проміжок між послідовними зразками сигналу, він обчислюється як обернена величина частоти дискретизації. Іншими словами, інтервал дискретизації є часом, що пройде між двома послідовними зразками сигналу. Наприклад, якщо частота дискретизації становить 44100 Гц, інтервал дискретизації буде  $1/44100$  секунди, що приблизно дорівнює 22,68 мікросекундам;

Відношення до найвищої частоти, згідно з теоремою дискретизації Найквіста-Шеннона, для коректної реконструкції аналогового сигналу з дискретних зразків, частота дискретизації повинна бути мінімум удвічі більшою за найвищу частоту сигналу, яка присутня у сигналі. Це означає, що для забезпечення точної реконструкції аналогового сигналу, якщо найвища частота присутня в сигналі дорівнює  $f_{\max}$ , то частота дискретизації повинна бути не менше ніж  $2 \cdot f_{\max}$ ;

Аліасінг — це явище, коли високочастотні складові сигналу неправильно реконструюються через неправильну дискретизацію, якщо частота дискретизації недостатньо висока, щоб адекватно відобразити всі складові сигналу, то високочастотні складові можуть з'явитися у нижчих частотах, створюючи аліасні компоненти. Щоб уникнути аліасінгу, потрібно використовувати достатньо високу частоту дискретизації, щоб забезпечити правильне відображення всіх складових сигналу;

Загалом, правильна дискретизація відіграє важливу роль у збереженні точності та якості сигналу під час перетворення аналогового сигналу на цифровий. Це дозволяє зберегти інформацію про амплітуду сигналу і пізніше використовувати цей цифровий сигнал для обробки, аналізу, передачі чи збереження даних.

Зразки сигналу — це послідовність значень амплітуди аналогового сигналу, які вимірюються на різних моментах часу під час дискретизації. Кожен зразок

відображає амплітуду сигналу в певний момент часу і представляється у цифровому форматі.

Основні характеристики зразків сигналу повинні включати наступне.

Амплітуду, вона відноситься до фізичної величини сигналу і вимірюється в одиницях, які відповідають конкретній величині. Наприклад, вольтам для аудіо сигналів, амперам для електричного струму або децибелам для акустичних сигналів. Амплітуда вказує на максимальну величину сигналу в певний момент часу. Вона характеризує силу, інтенсивність або магнітуду сигналу. Наприклад, у випадку аудіо сигналу амплітуда визначає гучність або силу звуку, який відтворюється;

Роздільну здатність, в контексті аналого-цифрового перетворення визначає кількість можливих значень, які можуть бути призначені кожному зразку аналогового сигналу у цифровому вигляді. Вона вимірюється в бітах і залежить від розрядності АЦП;

Швидкість дискретизації, визначає, як часто збираються зразки сигналу на одиницю часу і вимірюється в герцах (Hz). Вона визначає, наскільки деталізованим є представлення сигналу і впливає на максимальну частоту, яку можна відтворити зразками.

У цифровому представленні сигналу амплітуда вимірюється за допомогою числових значень. Кожен зразок сигналу має своє числове значення, яке відображає амплітуду сигналу в конкретний момент часу. Ці значення можуть бути беззнаковими цілими числами (наприклад, від 0 до 255 для 8-бітного представлення) або знаковими цілими числами (наприклад, від -32768 до 32767 для 16-бітного представлення). Важливо враховувати динамічний діапазон амплітуди сигналу. Динамічний діапазон визначає різницю між найбільшим і найменшим значеннями амплітуди, які можуть бути представлені. Більший динамічний діапазон дозволяє відтворити ширший спектр гучності або деталей в сигналі.

Роздільна здатність визначає мінімальний крок між двома сусідніми значеннями, який може бути виміряний АЦП. Чим більше бітів у роздільності,



тим більша кількість можливих значень може бути представлена, і тим більша точність перетворення аналогового сигналу в цифровий. Наприклад, для АЦП з 8-бітною роздільністю, кожен зразок може мати значення від 0 до 255 ( $2^8 - 1$ ). Це означає, що сигнал буде розділено на 256 рівнів амплітуди. Кожному рівню відповідає одне цифрове значення. Збільшення роздільної здатності АЦП дозволяє більш точне вимірювання амплітуди сигналу і зменшення можливих похибок. Наприклад, при використанні 16-бітного АЦП, роздільна здатність становить 65536 рівнів, що дає значно більш деталізоване представлення аналогового сигналу.

Зразки сигналу використовуються для подальшого аналізу, обробки або відтворення. Чим більша роздільна здатність і швидкість дискретизації, тим більш точне і високоякісне перетворення аналогового сигналу в цифровий формат. Більша роздільна здатність дозволяє відтворити більшу кількість деталей і динаміки оригінального сигналу, тоді як вища швидкість дискретизації дозволяє точніше відтворити швидкозмінні компоненти сигналу. При правильному підборі роздільної здатності і швидкості дискретизації можна забезпечити високу якість цифрового представлення аналогового сигналу. Однак, важливо враховувати обмеження розрядності АЦП і роздільної здатності людського сприйняття, оскільки зайва деталізація може викликати перевантаження і втрату ефективності обробки сигналу.

Після дискретизації, зразки сигналу можуть бути подальше оброблені за допомогою алгоритмів обробки сигналу, які використовуються для фільтрації, компресії, покращення якості або відновлення оригінального аналогового сигналу. Крім того, цифровий сигнал може бути збережений, переданий по мережі або використаний для аналізу, моделювання і подальших досліджень. Квантування — це процес, за яким аналоговий сигнал розбивається на дискретні рівні амплітуди, і кожен рівень відповідає певному цифровому значенню. Основні етапи квантування включають наступні кроки: рівень квантування, квантована похибка, роздільна здатність, кількість бітів.

Рівень квантування є важливим параметром, який визначає кількість можливих цифрових значень, які можуть бути призначені для представлення амплітуди вимірювання в АЦП. Цей параметр визначає роздільну здатність і точність перетворення сигналу. Кількість рівнів квантування залежить від кількості бітів, які використовуються для кодування сигналу. Зазвичай, більша кількість бітів дозволяє більшу роздільну здатність і, отже, більше рівнів квантування. Наприклад, для АЦП з роздільною здатністю 12 біт, кількість можливих рівнів квантування становить  $2^{12}$ , тобто 4096 рівнів. Важливо зазначити, що збільшення кількості рівнів квантування дозволяє отримати більш точне представлення аналогового сигналу у цифровому вигляді. Більше рівнів квантування зменшують квантовану похибку і спотворення сигналу, що дозволяє отримати більш відтворюваний і точний цифровий сигнал. Однак, більша кількість рівнів квантування також вимагає більшої кількості бітів для кодування, що може призвести до більшого обсягу пам'яті для зберігання та більшої обчислювальної потужності для обробки сигналу. Тому при виборі рівня квантування потрібно збалансувати точність представлення сигналу та потреби в ресурсах системи.

Квантована похибка виникає при перетворенні аналогового сигналу на цифровий через процес квантування. Це похибка, яка виникає через обмежену кількість цифрових значень, які можуть бути призначені для представлення амплітуди сигналу. Оскільки аналоговий сигнал має безліч значень в будь-якому моменті часу, а цифрове представлення обмежене кількістю рівнів квантування, виникає невідповідність між точним значенням сигналу і значенням, яке використовується для його представлення. Квантована похибка може бути розглянута як різниця між аналоговим значенням сигналу і цифровим значенням, яке використовується для його представлення. Ця різниця може бути позитивною або від'ємною, залежно від того, чи було округлено значення вище або нижче точного значення. Квантована похибка є видимою формою шуму у цифровому сигналі і може призвести до спотворення сигналу.

Величина квантованої похибки залежить від роздільної здатності АЦП, яка визначає кількість рівнів квантування. Зазвичай, чим більше рівнів квантування, тим менша квантована похибка і краща точність представлення сигналу. Однак, використання більшої кількості рівнів квантування також вимагає більшої кількості бітів для кодування, що може призвести до більшої обробки даних та збільшення вимог до обсягу пам'яті.

Зменшення квантованої похибки може бути досягнуто шляхом використання більш точного АЦП з більшою роздільною здатністю, а також шляхом використання методів компенсації похибок, таких як додаткові аналого-цифрові обробки, фільтрація шуму або використання алгоритмів корекції. Крім того, важливо враховувати динамічний діапазон АЦП, який визначає максимальний рівень сигналу, який може бути правильно виміряний без перевантаження. Квантована похибка є невід'ємною характеристикою процесу квантування, і її величина залежить від роздільної здатності і рівня шуму в системі. Щоб забезпечити якісне перетворення сигналу, слід враховувати роздільну здатність і шумовий рівень АЦП, вибираючи підходящий пристрій для конкретного додатку.

Деякі методи зменшення квантованої похибки включають використання технік компресії динамічного діапазону, які розширюють корисний діапазон сигналу і зменшують шумову складову, а також використання методів довірчого інтервалу для врахування невизначеності вимірювання. Крім того, для деяких додатків можуть використовуватись додаткові техніки, такі як квазіпаралельні АЦП, які поєднують декілька АЦП з різними роздільними здатностями для досягнення кращої точності.

Роздільна здатність (англ. resolution) АЦП визначається кількістю бітів, які використовуються для представлення квантованої амплітуди сигналу. Це впливає на точність та деталізацію перетворення аналогового сигналу у цифровий формат. Вища роздільна здатність означає більшу кількість можливих значень, які можна представити і, відповідно, більш точне відображення амплітуди сигналу. Роздільна здатність вимірюється в бітах і визначається формулою  $2^N$ ,

де  $N$  - кількість бітів. Наприклад, для 8-бітного АЦП роздільна здатність становить  $2^8$ , тобто 256 рівнів квантування. Чим більше роздільна здатність, тим точніше можна представити амплітуду сигналу. Наприклад, при використанні 8-бітного АЦП значення амплітуди буде квантуватись на 256 рівнів, що дає досить хорошу точність для багатьох застосувань. Однак, високоточні системи можуть використовувати 12, 16 або навіть більше бітів для досягнення вищої роздільної здатності.

Важливо враховувати, що збільшення роздільної здатності також вимагає більшої кількості пам'яті для зберігання цифрових значень і більшої ширини смуги для передачі цих значень. Тому при виборі АЦП потрібно знайти баланс між потребою в точності та обмеженнями ресурсів.

Кількість бітів у квантованому сигналі визначається роздільною здатністю АЦП і впливає на точність та динамічний діапазон представлення сигналу. Чим більше бітів використовується, тим більша точність перетворення, але й збільшується потреба в пам'яті для зберігання та пропускну здатності для передачі даних. Кількість бітів визначає кількість можливих цифрових значень, які можуть бути призначені для кожного вимірювання сигналу. Формула для визначення кількості можливих значень полягає в піднесенні числа 2 до ступеня кількості бітів. Наприклад, у 8-бітному АЦП можуть бути  $2^8 = 256$  можливих значень квантування.

Кількість бітів прямо впливає на роздільну здатність АЦП. Загальна роздільна здатність вимірюється у бітах і обчислюється як діапазон вимірювання, який може бути представлений з деякою точністю. Зазвичай, роздільна здатність визначається як діапазон вимірювання, поділений на  $2^{(\text{кількість бітів})}$ .

Наприклад, у 12-бітному АЦП з роздільною здатністю 1 мВ, діапазон вимірювання становить  $2^{12} = 4096$  мВ (12 біт -  $2^{12} = 4096$  рівнів). Таким чином, кожен біт у цьому АЦП відповідає  $1 \text{ мВ} / 4096 \approx 0.244$  мкВ.

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДУ І РОЗРОБКА ЗАГАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ

2.1 Аналіз відомих аналогів, формулювання своїх рішень, порівняння параметрів

Оскільки потреба в високоякісних АЦП в коп'ютерних системах щорічно зростає, передові компанії з виготовлення мікросхем та інших цифрових приладів постійно створюють нові АЦП та вдосконалюють старі розробки. Яскравими прикладами можуть стати АЦП від компанії Analog Devices AD7091R, Texas Instruments ADS122U04 та ADI LTC2499.

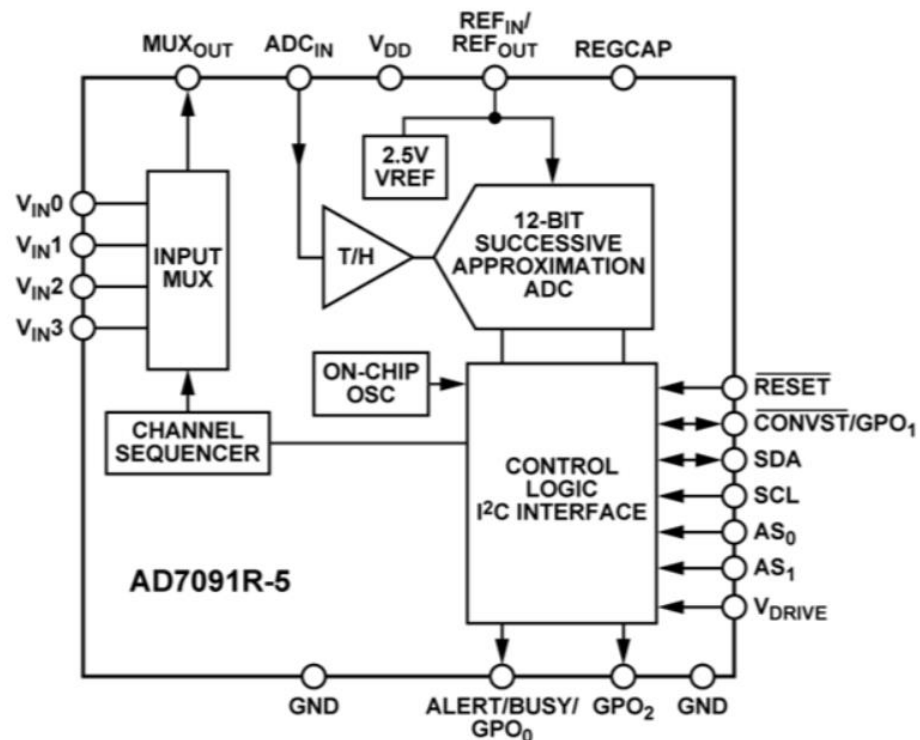


Рисунок 2.1 — Структурна схема АЦП AD7091R-5

АЦП Analog Devices AD7091R-5 [1] - це високоточний 12-бітний одноканальний АЦП зі вбудованим опорним напруговим джерелом. Цей пристрій розроблений для вимірювання аналогових сигналів з високою точністю та низьким рівнем шуму.

## Основні характеристики AD7091R-5:

— швидкість дискретизації, визначає, як часто збираються зразки сигналу на одиницю часу і вимірюється в герцах (Hz), вона визначає, наскільки деталізованим є представлення сигналу і впливає на максимальну частоту, яку можна відтворити зразками.

— роздільна здатність, AD7091R-5 забезпечує 12-бітну роздільну здатність, що означає, що він може представляти амплітуду вимірюваного сигналу у 4096 рівнях, це дозволяє отримати деталізовані вимірювання з високою точністю;

— швидкість дискретизації, цей АЦП може працювати зі швидкістю дискретизації до 1 мегасемплу в секунду (MSPS), висока швидкість дискретизації дозволяє отримувати високоякісні дані зі швидкозмінних сигналів;

— вбудоване опорне напругове джерело, AD7091R-5 має вбудоване внутрішнє опорне напругове джерело, що спрощує зовнішню схему підключення, це джерело дозволяє отримувати стабільну і точну опорну напругу для перетворення сигналу;

— інтерфейси комунікації, АЦП підтримує різні інтерфейси комунікації, включаючи SPI та I2C, це забезпечує зручний спосіб взаємодії з АЦП та його інтеграцію з мікроконтролерами або іншими цифровими пристроями;

— низький рівень шуму, AD7091R-5 забезпечує високу точність вимірювань, особливо в низькочастотних діапазонах, це особливо важливо при отриманні точних даних зі слабких аналогових сигналів або в вимірюваннях з високою динамічною областю;

— підтримка внутрішніх і зовнішніх посилювачів, AD7091R-5 має можливість підключення внутрішнього або зовнішнього посилювача сигналу, це дає можливість розширити діапазон вимірювання та забезпечити оптимальний рівень підсилення для конкретних додатків;

— низьке споживання енергії, AD7091R-5 має дуже низьке споживання енергії, що робить його ідеальним для додатків з обмеженими джерелами живлення або пристроїв, які працюють в режимі живлення від батареї;



— вбудовані функції, цей АЦП має різноманітні вбудовані функції, такі як вбудований фільтр нижньої частоти для зменшення шуму, автоматична регулювання посилення, програмовані зсуви нуля та інші, які полегшують налаштування та оптимізацію вимірювань.

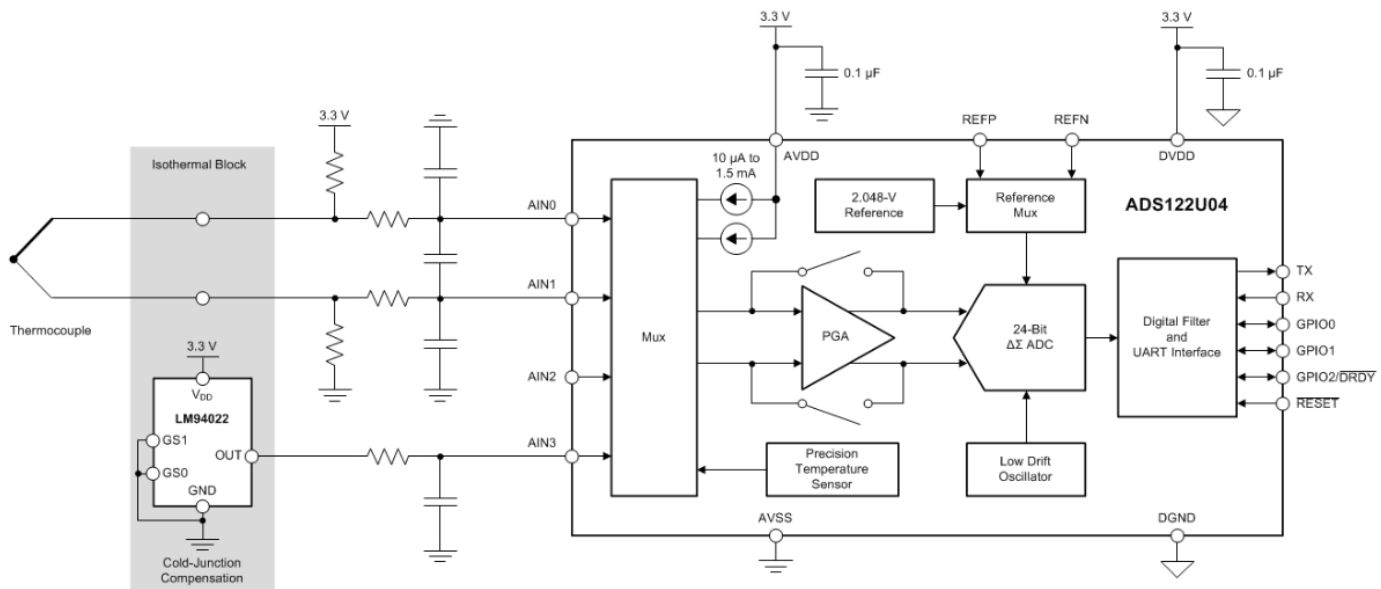


Рисунок 2.2 — Структурна схема АЦП ADS122U04

є високоточним 24-бітним АЦП, розробленим для застосувань, які вимагають високої точності вимірювання сигналів з низькочастотним шумом. Основні характеристики цього пристрою включають:

— роздільна здатність, ADS122U04 забезпечує роздільну здатність 24 біта, що дозволяє отримати дуже точне представлення амплітуди вимірювання, це дозволяє досить детально аналізувати низькочастотні сигнали;

— швидкість дискретизації, цей АЦП підтримує швидкості дискретизації в діапазоні від 20 до 2000 вимірів на секунду (SPS), такий широкий діапазон швидкостей дозволяє вибрати оптимальну швидкість для конкретних потреб додатку;

— низький шум, ADS122U04 має низький рівень шуму, що дозволяє отримати високу якість сигналу, він включає програмований низькочастотний фільтр для подавлення шумів зовнішнього джерела;

— вбудовані функції, цей АЦП має вбудовані функції, такі як програмований зсув нуля і програмований підсилювач інструментального посилення, що дозволяє налаштувати його під конкретні потреби додатку;

— інтерфейси, ADS122U04 підтримує різні інтерфейси зв'язку, такі як SPI і I2C, для зручного підключення до мікроконтролерів або інших пристроїв;

— низьке споживання енергії, цей АЦП працює з низьким споживанням енергії, що робить його ідеальним вибором для застосувань, де енергоефективність є важливою, таких як батарейно-живлені пристрої або системи з обмеженими джерелами енергії;

— внутрішня опора, у ADS122U04 є внутрішня опора, що дозволяє легко вимірювати зовнішні опори або встановлювати зворотне зв'язування для інтеграції в системи з датчиками;

— вбудований датчик температури, цей АЦП має вбудований датчик температури, що дозволяє вимірювати температуру навколишнього середовища або компенсувати температурні зміни під час вимірювання;

— захист від перевантаження, ADS122U04 має вбудовані захисні механізми, які дозволяють виявляти і захищати пристрій від перевантажень, що допомагає забезпечити надійну роботу і тривалу експлуатацію;

— гнучкі налаштування, цей АЦП надає багато програмованих параметрів, таких як роздільна здатність, швидкість дискретизації, фільтри та інтерфейси, що дозволяє налаштувати його під конкретні вимоги додатку.

Загалом, Texas Instruments ADS122U04 є потужним і точним 24-бітним АЦП з низьким шумом і споживанням енергії, що робить його популярним в багатьох вимірювальних, контрольних і медичних застосуваннях, де важлива висока якість сигналу і енергоефективність.

є високоточним 24-бітним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП), розробленим компанією Analog Devices Inc. Він є одним з найточніших АЦП, доступних на ринку, і має високу роздільну здатність та низький рівень шуму.

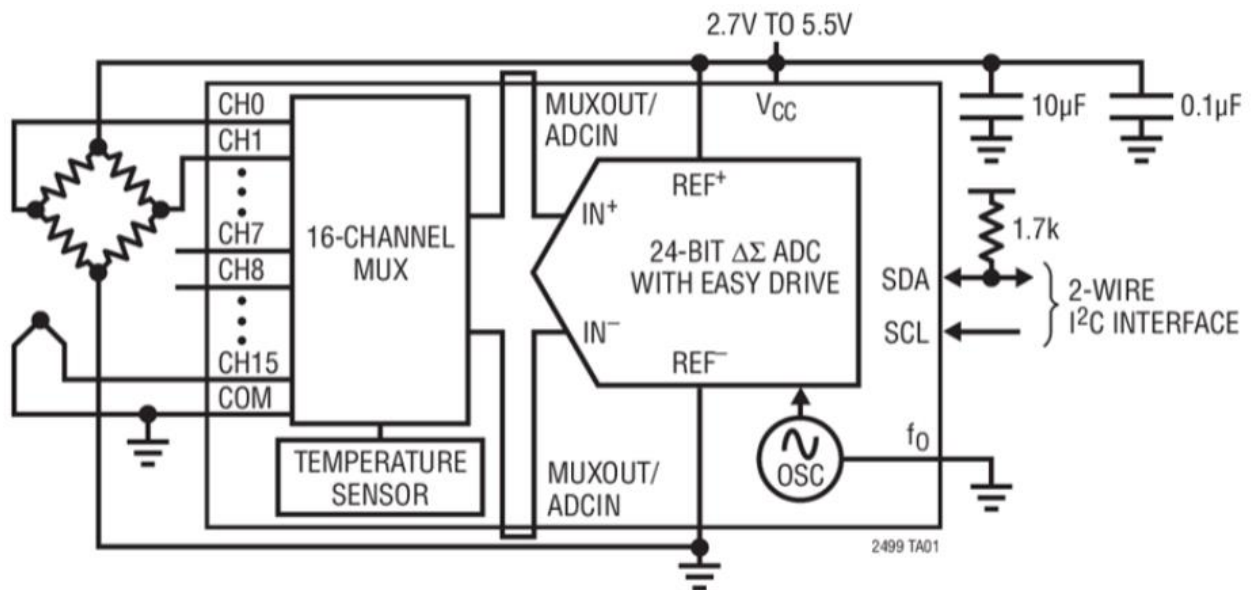


Рисунок 2.3 — Структурна схема АЦП LTC2499

Основні особливості LTC2499 включають:

— висока точність, LTC2499 забезпечує високу точність перетворення завдяки своїм 24 бітам роздільної здатності, це дозволяє досягти високої деталізації і точності вимірювань;

— низький рівень шуму, цей АЦП має низький рівень шуму, що дозволяє отримати чисті сигнали навіть у вимірюваннях з низькими амплітудами, це особливо корисно при роботі з дуже слабкими сигналами або вимірюваннях з високою чутливістю;

— вбудовані функції, LTC2499 має вбудовані функції, які полегшують використання, він включає вбудований внутрішній опір зсуву нуля, а також внутрішній опір програмованого посилення, що дозволяє налаштувати входні параметри для вимірювань;

— гнучкість вимірювання, АЦП підтримує різні режими вимірювання, включаючи одиночне вимірювання, серійне вимірювання та зовнішній старт вимірювання, це дозволяє адаптувати його до різних вимог і застосувань;

— інтерфейс зв'язку, LTC2499 має різні варіанти інтерфейсів зв'язку, включаючи I2C і SPI, що дозволяє зручне підключення до мікроконтролерів;

— висока частота дискретизації, цей АЦП може працювати на високій частоті дискретизації до 123 спектральних відліків в секунду (SPS), це дозволяє збирати дані з великою швидкістю і використовувати його для вимірювань в динамічних системах;

— діапазон вимірювання, LTC2499 має широкий діапазон вимірювання, який може бути програмований для відповідання конкретним вимогам застосування, він підтримує вимірювання в діапазонах від  $\pm 2,5$  В до  $\pm 10$  В;

— висока стабільність, LTC2499 має добре забезпечену стабільність вимірювань з високою точністю впродовж широких температурних діапазонів і довгих періодів часу, це робить його надійним і стабільним рішенням для критичних додатків;

— висока лінійність, ADI LTC2499 має дуже високу лінійність, що дозволяє йому давати точні результати вимірювань з мінімальними спотвореннями або неточностями.

Отже, розглянуті схеми є популярними високоточними АЦП для вимірювань у різних областях, включаючи промислові системи контролю, наукові дослідження, медичні пристрої та багато інших. Їх висока точність, низький рівень шуму і гнучкість роботи роблять їх відмінним вибором для вимогливих додатків, де точність і надійність мають першочергове значення.

Але недоліком цих систем є:

- вразливість двополюсних входів;
- вразливість безпроводних інтерфейсів.

## 2.2 Алгоритми калібрування статичних вимірювальних каналів

На рисунку 2.4 показана функціональна структура кожного з вимірювальних каналів, які знаходяться у експериментальному зразку 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи SADS-4M. Ця система розроблена для здійснення аналого-цифрового перетворення та попереднього опрацювання акустичних сигналів.

Кожен з чотирьох вимірювальних каналів має свій вхід, в якому знаходяться аналоговий комутатор АК, програмований підсилювач ПП, антиаліасінговий фільтр низьких частот ФНЧ та аналого-цифровий перетворювач АЦП. Незважаючи на те, що ці аналогові та аналого-цифрові компоненти мають достатньо високі статичні та динамічні передатні характеристики, їх можна значно поліпшити шляхом калібрування та корекції [4].

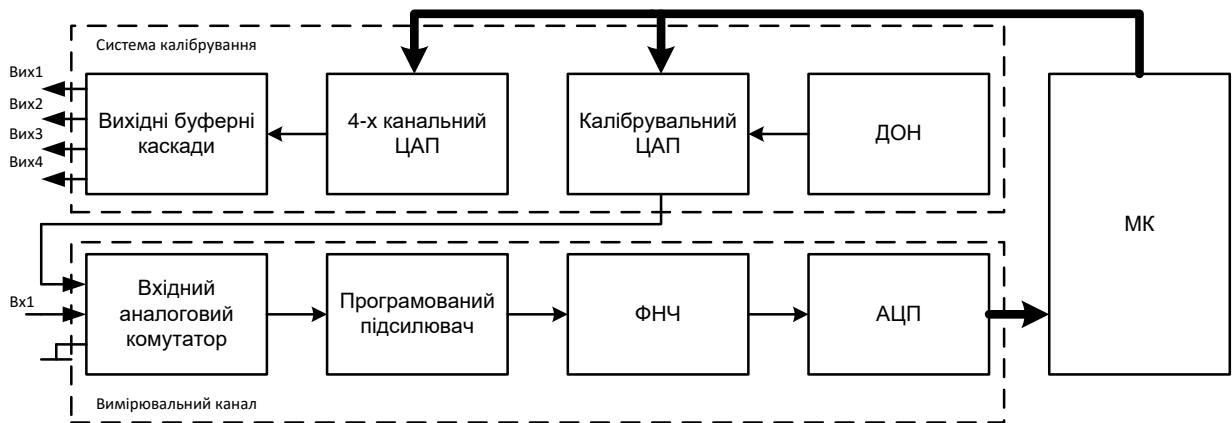


Рисунок 2.4 — Структура вимірювального каналу та кіл калібрування

Для проведення процесу калібрування використовуються компоненти, які містяться в функціональній схемі: джерело опорної напруги ДОН, калібрувальний перемножувальний ЦАП та шина "нуля". Щоб визначити реальні параметри джерел живлення сенсорів, також передбачено підключення виходів цих джерел до окремих входів аналогових комутаторів у 4-канальному ЦАП.

Пояснення використання перемножувального ЦАП як джерела калібрувальних сигналів полягає в тому, що завдяки його схемотехніці на основі  $R - 2R$  матриці та КМОН-ключів можна точно відтворити амплітуду опорної напруги. Значення амплітуди джерела опорної напруги буде точно відтворюватися на виході ЦАП у верхній точці діапазону (код 111...1). Це дозволяє створити точно відкалібрований за амплітудою опорний сигнал. Залежно від режиму калібрування, сигнал може бути постійним, імпульсним, моногармонійним або полігармонійним з заданою опорною частотою. Моногармонійний сигнал найкраще підходить для спектрального опрацювання,

де його амплітуда на опорній частоті  $f_0$  визначається за спектром сигналу. Обмежена розрядність калібрувального ЦАП майже не впливає на амплітудне значення сигналу. Зсув "нуля" ЦАП також не впливає на результат калібрування, оскільки амплітуда сигналу вимірюється тільки на опорній частоті. Загальний зсув "нуля" вимірювального каналу буде визначено і скориговано після підключення шини "нуля" до вхідного аналогового комутатора.

У системі обробки акустичних сигналів з самокаліброваною 4-канальною АЦ-системою, характеристики вимірювальних каналів можна розділити на статичні і динамічні. Для калібрування статичних передатних характеристик каналів вимірювання використовується загальна блок-схема алгоритму, зображена на рис. 2.5 [5]. Для калібрування "нуля" і коефіцієнтів підсилення спочатку вводиться гармонійний сигнал амплітудою  $A_0$ , яка дорівнює амплітуді джерела опорної напруги, на калібрувальний ЦАП. Поточні цифрові значення результатів АЦ-перетворення "нуля" ( $O_i$ ) та опорного сигналу ( $A_i$ ) використовуються для визначення коефіцієнта підсилення  $K_i$ .

У кожному з чотирьох каналів і на кожному з чотирьох коефіцієнтів підсилення  $K_i$  з набору  $\{1, 2, 4, 8\}$  проводиться визначення зміщень "нуля" і реальних коефіцієнтів підсилення.

Для коригування реального коефіцієнта підсилення в кожному з каналів використовується наступний вираз:

$$K_i = \frac{A_i}{A_0}$$

В режимі безпосереднього АЦ-перетворення вхідних відліків сигналів  $S$  на кожному коефіцієнті підсилення відбувається наступне їхнє коригування:

$$S_i = (S - O_i) \cdot K_i$$

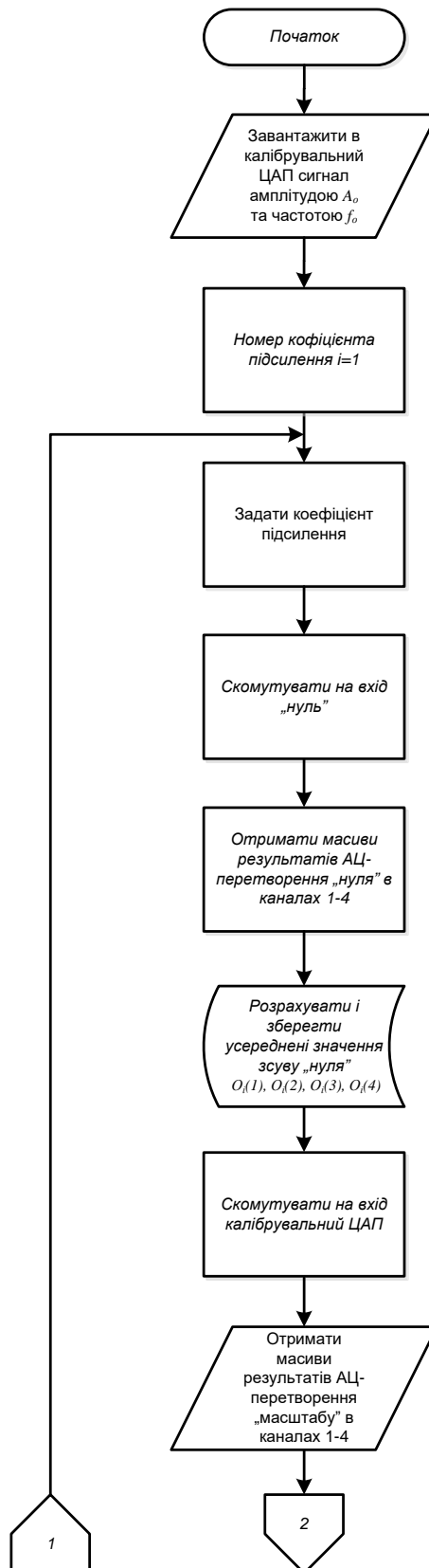


Рисунок 2.5 — Блок-схема алгоритму калібрування статичних характеристик вимірювальних каналів, аркуш 1

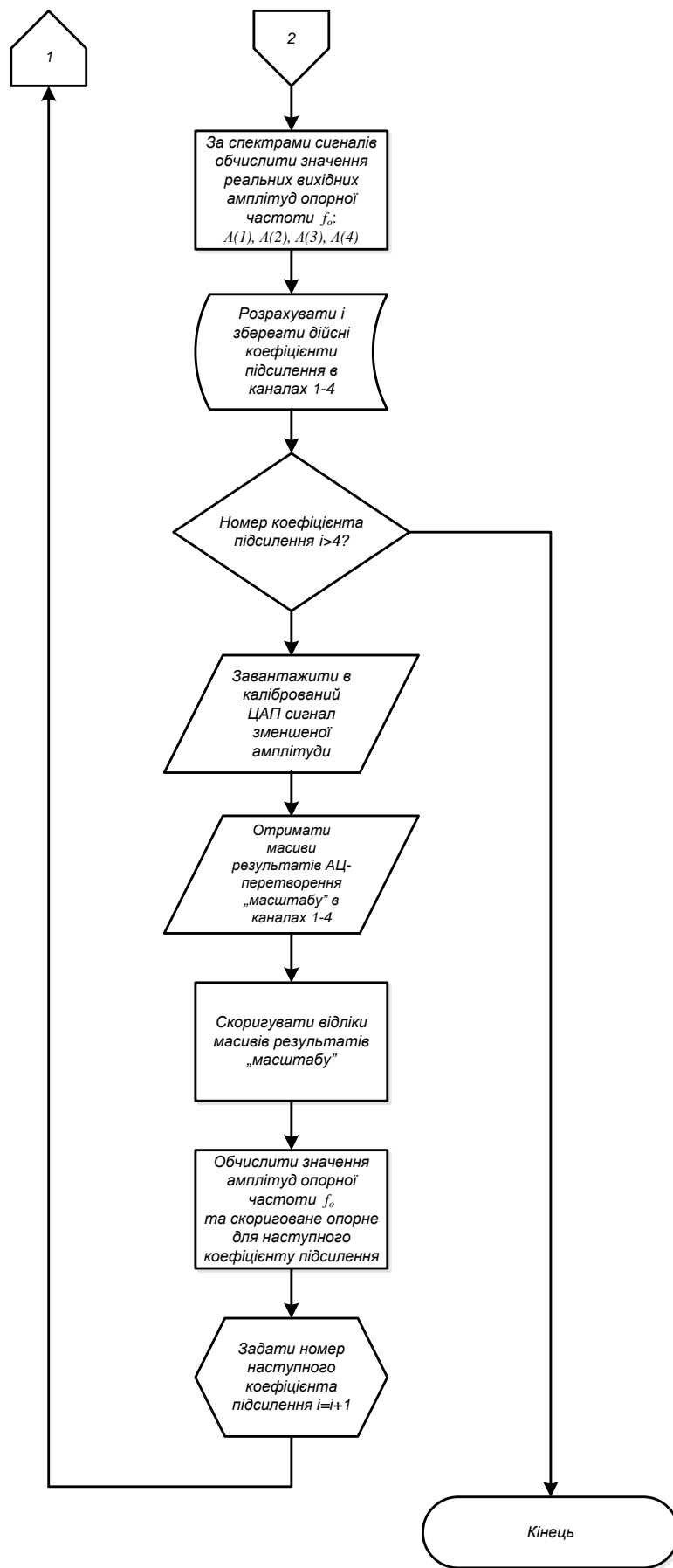


Рисунок 2.5, аркуш 2



Дійсне значення опорного сигналу  $A_0$  визначається після застосування відкаліброваних зсувів "нуля"  $O_1$  та коефіцієнта підсилення  $K_1$ . Це значення буде використовуватись під час калібрування зсувів "нуля"  $O_2$ ,  $O_3$  та  $O_4$ , а також коефіцієнтів підсилення  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  для кожного каналу. Формула (1) використовується для урахування цих значень при перетворенні реальних сигналів.

На рисунку 2.5, використовуючи алгоритм калібрування, виконуються такі дії. Спочатку здійснюється завантаження максимально амплітудного опорного моногармонійного сигналу частотою  $f_0$  в калібрувальний ЦАП. Під час завантаження амплітуда циклічно відтворюваного сигналу буде відповідати напрузі опорного джерела живлення  $A_0=U_0$ , яке залишається стабільним в широкому діапазоні температурного режиму.

Після цього, в кожному з чотирьох вимірювальних каналів виконується процес налаштування "нуля" і коефіцієнтів підсилення. Після встановлення "нуля" на вхід аналогових комутаторів, отримуються проміжні масиви цифрових даних, що є результатом аналого-цифрового перетворення в каналах 1 - 4:  $D_{01}$ ,  $D_{02}$ ,  $D_{03}$ ,  $D_{04}$ . Кожен з цих масивів, які мають розмірність 256 - 1024 відліків, піддається усередненню для визначення зсувів "нуля"  $O_i(1)$ ,  $O_i(2)$ ,  $O_i(3)$ ,  $O_i(4)$  для кожного окремого коефіцієнта підсилення.

Алгоритми калібрування динамічних вимірювальних каналів

Після подачі сигналу калібрувального ЦАП на вхід вимірювальних каналів та отримання проміжних масивів результатів АЦ-перетворення в каналах 1-4 (блок 8) проводиться визначення фактичних коефіцієнтів підсилення. Кожен з масивів даних, що має розмірність 256-1024 відліків, передається на зовнішній комп'ютер, де здійснюється спектральний аналіз сигналів шляхом застосування швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Під час цього аналізу виділяються спектральні компоненти  $A(1)$ ,  $A(2)$ ,  $A(3)$ ,  $A(4)$  при опорній частоті  $f_0$ . Відношення амплітуд цих компонент до амплітуди опорного сигналу визначає фактичні коефіцієнти підсилення в каналах.

Для наступного (i+1)-го діапазону підсилення, після завантаження та точного вимірювання сигналу калібрувального ЦАП, використовуються відкориговані значення з i-го діапазону. В процесі цієї процедури також створюються та коригуються проміжні масиви даних DM1, DM2, DM3, DM4 з урахуванням зсуву "нуля" та реальних значень коефіцієнтів підсилення K<sub>i</sub>, отриманих раніше.

В кожному із чотирьох каналів, для (i+1) діапазону підсилення, амплітуда сигналу калібрувального ЦАП визначається безпосередньо за спектрами сигналів, і отримується скориговане середнє значення A<sub>0</sub>. Описані кроки калібрування та коригування виконуються послідовно для всіх чотирьох діапазонів підсилення в циклі, організованому за номером діапазону.

У статті детально розглянуто відомі методи визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів, зокрема амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) та фазо-частотну характеристику (ФЧХ). Один з запропонованих методів використовує полігармонійний сигнал (ПГС), який формується шляхом сумування гармонічних компонентів. Частоти цих компонентів можуть бути визначені користувачем з нормованого ряду або обиратись довільно. Нормований ряд включає такі значення частот: 32.5 Гц, 63 Гц, 125 Гц, 250 Гц, 500 Гц, 1000 Гц, 2000 Гц, 4000 Гц, 10000 Гц, 16000 Гц.

Розклад в ряд Фур'є є способом представлення будь-якої періодичної функції як суми гармонійних функцій або комплексних експонент. Таким чином, сигнал може бути виражений у вигляді такого розкладу:

Д

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^n (A_i \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot t - \theta_i))$$

$$\theta_i = \arctg \frac{b_i}{a_i}$$

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$$

- $a_0, a_i, b_i$  — початкові фази гармонійних складових;
- амплітуди гармонійних складових;  $i$  — номер гармоніки;
- основна частота коливань,  $T$  — період коливань;
- коефіцієнти, які визначаються за співвідношеннями:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) dt$$

$$a_i = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \cos(i \cdot \Omega \cdot t) dt, \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

$$b_i = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} s(t) \sin(i \cdot \Omega \cdot t) dt, \quad i = 1, 2, 3 \dots$$

Г

а

Р Для вимірювання АЧХ і ФЧХ вимірювальних каналів потрібно проаналізувати спектр вихідного сигналу (2), вибрати опорну частоту, наприклад 4000 Гц, і обчислити відхилення рівня сигналу на інших частотах, що призводить до нерівномірності АЧХ. Для отримання ФЧХ обчислюється фазова різниця між кожною спектральною складовою та опорною частотою. Під час вимірювання АЧХ і ФЧХ полігармонічний сигнал розраховується як сума гармонічних складових, відтворюється за допомогою ЦАП і подається на вхід вимірювального каналу системи, який потребує калібрування. Вихідний сигнал вимірювального каналу подається на АЦП і перетворюється в цифрову форму, після чого процесор швидко виконує перетворення Фур'є і обчислює спектр сигналу. Визначення параметрів АЧХ, ФЧХ вимірювальних каналів та їх подальше калібрування здійснюється шляхом аналізу спектра згідно з алгоритмом, зображеним на рисунку 2.6.

С Спочатку виконується завантаження кодових комбінацій частот полігармонічного сигналу в 4-канальний ЦАП. Вихід цього сигналу комутується на вхід каналів 1-4.

Т

а

х

$i \cdot \Omega$

$i = 1, 2, 3 \dots$ ) утворюють АЧХ, а початкові фази – ФЧХ. Не важко помітити, що для періодичної функції отримаємо дискретний спектр.

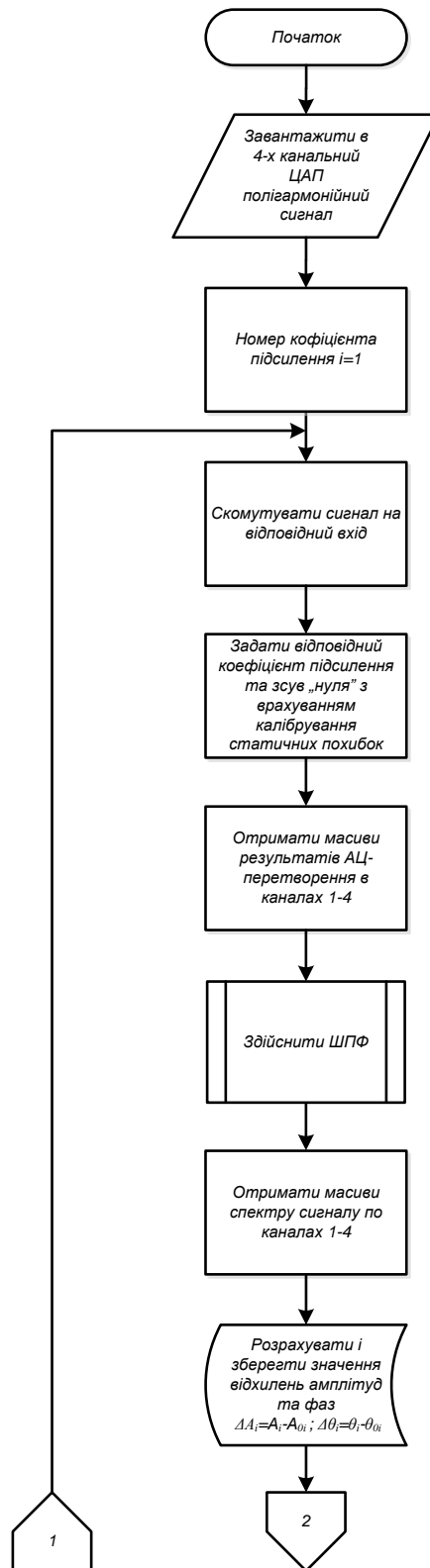


Рисунок 2.6 — Блок-схема алгоритму калібрування динамічних характеристик вимірювальних каналів, аркуш 1

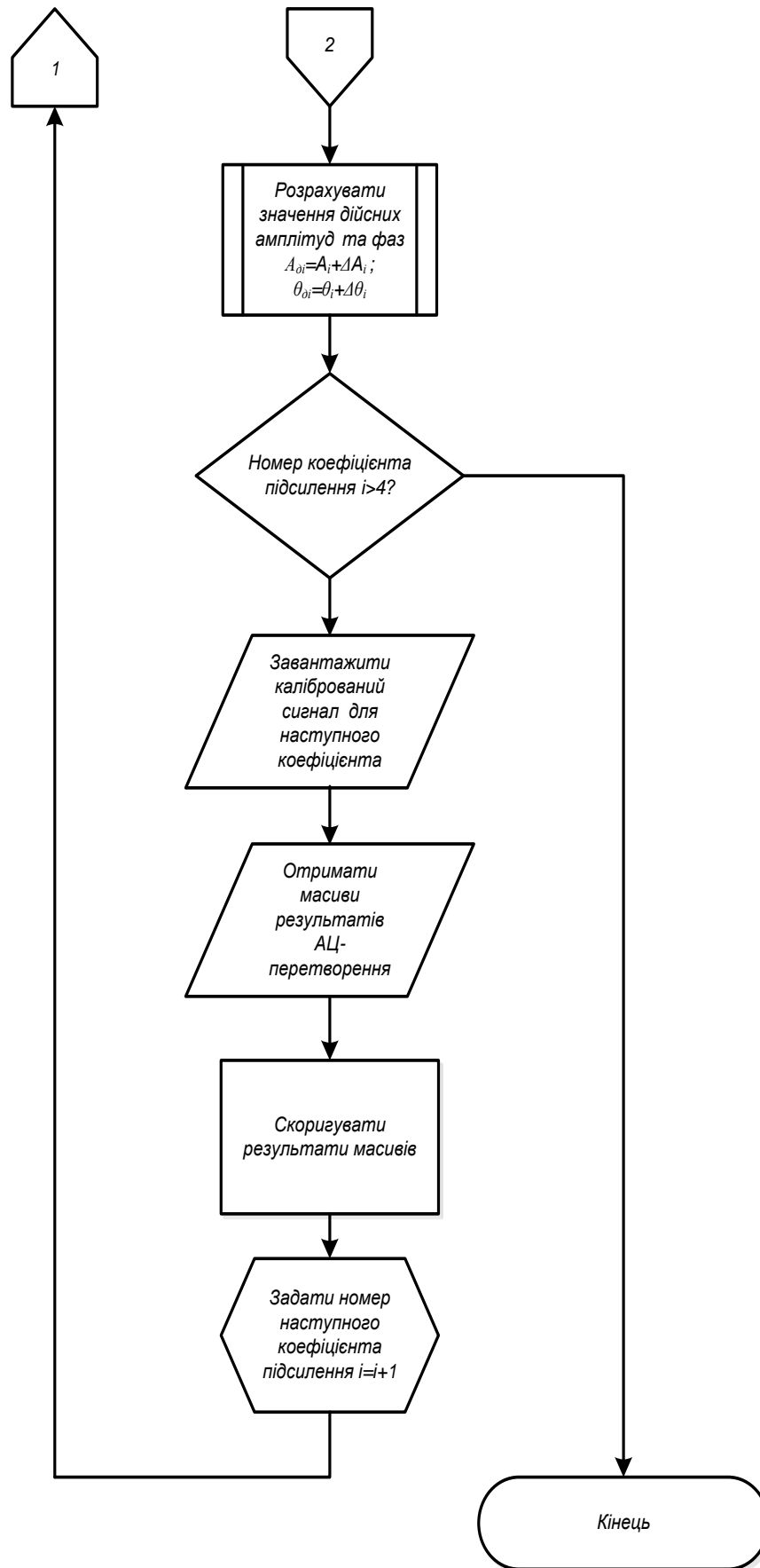


Рисунок 2.6, аркуш 2

Після цього мікропроцесор автоматично налаштовує коефіцієнти підсилення та зсув "нуля" для вимірювальних каналів на основі розрахованих значень, отриманих під час калібрування їх статичних характеристик.

Після цього здійснюється АЦ-перетворення, що дозволяє отримати масиви результатів на основі яких виконується швидке перетворення Фур'є (ШПФ).

Завдяки ШПФ можна отримати набір значень спектру сигналу для конкретного каналу. За допомогою отриманих даних проводиться обчислення відхилень амплітуд та фази:

$$\Delta A_i = A_i - A_{0i}$$

із урахуванням яких можна отримати дійсні значення АЧХ і ФЧХ.

Після цього, потрібно завантажити та точно виміряти сигнал 4-канального ЦАП для (i+1)-го коефіцієнта підсилення, використовуючи скориговані значення вимірювальні канали для всіх коефіцієнтів підсилення та всіх частот не будуть скалібровані згідно АЧХ і ФЧХ. Описані операції калібрування та коригування виконуються послідовно для всіх чотирьох діапазонів підсилення в циклі, організованому за номером діапазону.

Алгоритми калібрування, які були описані, можна використовувати для налаштування статичних і динамічних характеристик вимірювальних каналів не лише в АЦ-системах, а й у різних інших аналого-цифрових системах та їх багатоканальних пристроях.

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

Після визначення вимог до вимірювальних каналів АЦ-системи, які були наведені у попередньому розділі, наступним кроком буде розробка її функціональних та принципівих схем.

Один з найважливіших етапів розробки АЦ-системи полягає в обранні типу АЦП. Після огляду та аналізу, здійснених у попередніх розділах, виявлено

можливість використання двох типів АЦП: порозрядного врівноваження та дельта-сигма перетворення. АЦП порозрядного врівноваження має перевагу у тому, що їх можна використовувати як окремі компоненти у кожному каналі системи, або як один спільний елемент для всіх каналів з послідовною комутацією.

Для зміни частоти дискретизації сигналів в АЦ-системі рекомендується використовувати дельта-сигма АЦП замість складних ФНЧ зі змінною частотою зрізу. У дельта-сигма АЦП використовується цифровий фільтр високого порядку, який має фіксоване співвідношення між частотою зрізу і частотою дискретизації, що не потребує налаштування. Втім, використання дельта-сигма АЦП ускладнюється наявністю вбудованих ФВЧ, які не пропускають наднизькі частоти і постійні сигнали, що ускладнює калібрування зсуву "нуля" вхідних кола АЦ-системи та роботу з постійними сигналами. Це є недоліком дельта-сигма АЦП перетворювачів.

Після ретельного аналізу переваг та недоліків, ми прийшли до компромісного рішення, яке полягає у використанні порозрядних АЦП для схеми з фіксованою частотою дискретизації сигналів, а також дельта-сигма АЦП для обробки сигналів зі змінною частотою дискретизації, що є характерним для експериментального зразка АЦ-системи, що ми розробляємо.

Отже, для обробки звукових сигналів зі змінною частотою дискретизації в експериментальному зразку АЦ-системи ми вирішили використати дельта-сигма АЦП, а також передбачити можливість встановлення порозрядного АЦП в кожному каналі (на додаткових монтажних місцях друкованої плати). Ми обрали сучасний 24-розрядний дельта-сигма АЦП типу AD 1871 від компанії Analog працювати з живленням  $\pm 5\text{В}$ .

Мікропроцесор АЦ-системи обирається залежно від його здатності одночасно обслуговувати чотири послідовних інтерфейси АЦП, чотири канали ЦАП джерел живлення, калібрувальний ЦАП, вхідні аналогові комутатори АК, програмовані підсилювачі ПП, USB/COM інтерфейс та безпроводний інтерфейс

Bluetooth. Для забезпечення швидкості, кількості вводу-виводу, універсальності та доступності був обраний мікроконтролер STM32F407VET6 від компанії ST Microelectronics (32-бітний, Cortex-M4 + FPU, 168 МГц, 512 кБ Flash, USB OTG

Для створення незалежного джерела живлення з чотирма каналами фантомної напруги, було використано мікросхему ЦАП AD5665 від компанії генерації напруги, а також простий послідовний інтерфейс.

Для використання обраних мікросхем потрібно, щоб вони живилися двома полярностями напруги, а саме  $\pm 5\text{В}$ . Для цього ми вибрали поширену мікросхему MC34063 від компанії Texas Instruments [9] [81], яка з використанням схеми DC/DC інвертора може створювати необхідне живлення з порта USB (+5 В). Щоб забезпечити виконання цих умов, також потрібно вибрати вхідні комутаційні схеми, попередні підсилювачі та програмовані підсилювачі, які можуть працювати з живленням  $\pm 5\text{В}$ . Тому ми вибрали здвоєні підсилювачі OP275A [10] [82] як основні операційні підсилювачі, чотирьохканальні комутатори ADG709 Devices. Всі ці мікросхеми мають високу якість та відповідають технічним вимогам АЦ-системи.

Функціональна схема експериментального зразка 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи для обробки акустичних сигналів, яка представлена на рисунку 2.7, розроблена на основі вибраних основних компонентів. У додатках Б та В наведено електричну принципову схему самокаліброваної 4-канальної АЦ-системи SADS-4М та переліки її елементів, відповідно.



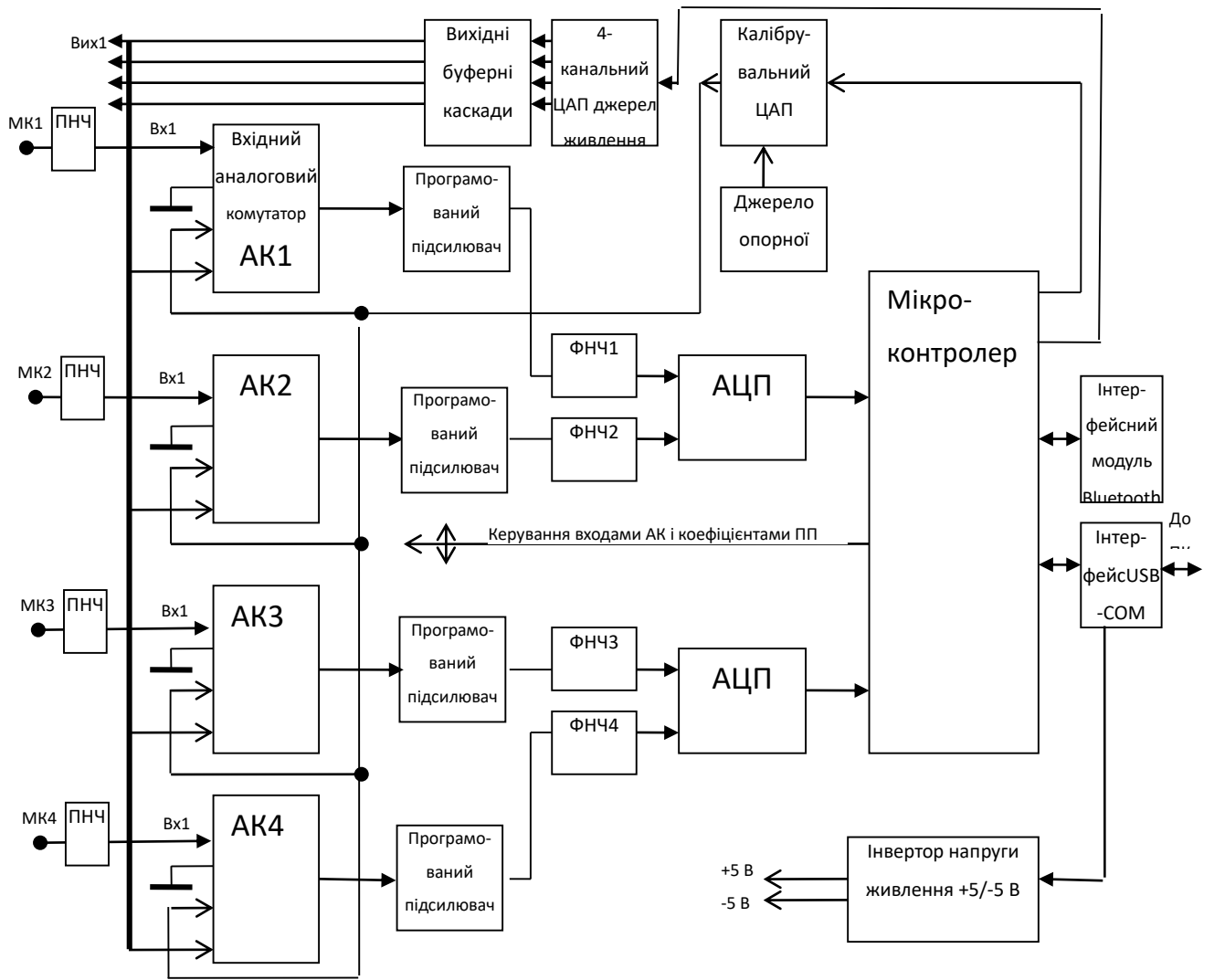


Рисунок 2.7 — Функціональна схема 4-канальної самокаліброваної АЦ-системи

## РОЗРОБКА І ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Мікроконтролер (МК) STM32f407 з ARM-архітектурою сімейства STM32 є основним процесорним елементом самокаліброваної аналого-цифрової системи. Він має достатньо функціональних характеристик для управління, обробки інформаційних сигналів і здійснення необхідних перетворень. Система SADS-4M використовує внутрішні вузли, які знаходяться безпосередньо в МК, а також зовнішні мікросхеми, такі як АЦ і ЦА перетворювачі та аналогові і цифрові пристрої. Автори SADS-4M отримали патенти на корисні моделі джерела опорної напруги й двотактних симетричних підсилювачів струму та опублікували статті обмінюються інформацією з МК за допомогою стандартних інтерфейсів та протоколів, таких як UART, SPI, I2C. Деякі інтерфейси і протоколи реалізовано апаратно в МК, але під час розробки експериментального зразка знадобилися додаткові програмні інтерфейси.

Існують два способи передачі даних з АЦ системи на комп'ютер: через Bluetooth (BT) і USB. Щоб керувати потоком даних і команд та мати можливість працювати як з USB, так і з BT, був розроблений спеціальний протокол під назвою DataCom (див. Додаток К). Цей протокол дозволяє одночасно встановлювати зв'язок через обидва канали. Обмін інформацією між пристроями відбувається за допомогою фреймів. Відповідь на фрейм від партнера надсилається по тому самому каналу, через який він був отриманий.

Загальна структура фрейму:

Таблиця 3.1 — Загальна структура фрейму

--	--	--	--	--	--	--

uint16\_t uwFrameSize; - розмір фрейму.

uint8\_t ubFrameId; - ID фрейму. Використовується для розбиття великого потоку даних.

tMD\_DATACOM\_GROUP eGroupId; - Визначає до якої групи команд відноситься даний фрейм (АЦП, ЦАП, ОП, і т.д.).

uint8\_t ubCommand; - власне команда.

tMD\_BUFF sData; - дані.

Модуль, що створено над реалізацією ST, виконує функцію керування та передачі даних через віртуальний послідовний порт у межах інтерфейсу USB. Com, див. Додаток Л).

Структура модуля:

tMD\_BUFF sRxBuffer; - буфер з отриманими даними.

tMD\_VCP\_STATE sState; - стан модуля.

Дані для передачі не зберігаються окремо, а зразу відсилаються.

API модуля:

void); ініціалізує USB пристрій та буфер для прийому даних.

tMD\_VCP\_STATE MD\_VCP\_eGetState(void) – отримати поточний стан. (Готовність даних, очікування з'єднання і т.д.).

bool MD\_VCP\_bSendData(uint8\_t\* pBuffer, uint8\_t ubLength); - передає дані з буфера pBuffer довжини ubLength.

uint16\_t MD\_VCP\_bReadData(uint8\_t\* pBuffer, uint8\_t ubLength); - вчитати отримані дані в буфер вказаної довжини. Повертає кількість вчитаних даних.

uint8\_t MD\_VCP\_ubAvailableDataCount(void);- кількість доступних даних.

vReceiveCB (uint8\_t\* pRxBuffer, uint8\_t ubLength); - функція обробки переривання від апаратного блоку USB в МК.

Для забезпечення зв'язку з модулем HC-06 використовується апаратний UART мікроконтролера через UART-інтерфейс. Управління UART здійснюється за допомогою HAL від ST. Над цим рівнем реалізовано модуль, що дозволяє взаємодіяти з HC-06 за допомогою AT-команд (див. Додаток М). Модуль підтримує наступні можливості: конфігурування, автоматичне визначення швидкості передачі даних (Baud rate) і його зміна, а також зміну назви Bluetooth-пристрою.

API модуля:

bool MD\_HC05\_vInit(void); - ініціалізація UART МК, синхронізація частоти з HC\_06 та встановлення імені за замовчуванням.

void MD\_HC05\_vSendData (uint8\_t\* ubData, uint8\_t ubSize) - передача даних  
HC05\_vReadData (uint8\_t\* ubData, uint8\_t ubSize) – зчитування даних з буферу прийому.

bool MD\_HC05\_bCommandAt(void) – перевірка наявності зв'язку з HC-06.

bool MD\_HC05\_bCommandSetName(uint8\_t\* pubNameBuffer, uint8\_t ubNameSize) – встановлення нового імені.

bool MD\_HC05\_bSetNewBaudrate(uint16\_t uwBaudrate) – встановлення нової швидкості передачі.

ОП AD8251 відноситься до програмованих операційних підсилювачів. Його коефіцієнт підсилення можна налаштувати за допомогою керуючих входів A0 та A1. В схемі ці входи позначаються як лінії KP0 та KP1 для підсилювачів першого аналого-цифрового перетворювача (АЦП), а також як KP2 та KP3 для підсилювачів другого АЦП. Зміна коефіцієнта відбувається при спаді фронту на піні WR.

Для зміни коефіцієнту підсилення потрібно виконати наступні дії:

встановити WR в одиницю;

виставити на лініях A0 та A0 (у нашому випадку це KP0-KP3) бажаний коефіцієнт підсилення;

задати логічний рівень WR=0 та, не раніше, ніж через 40 нс, встановиться бажаний коефіцієнт підсилення.

Можливі коефіцієнти підсилення:

Таблиця 3.2 — Можливі коефіцієнти підсилення

		Коефіцієнт підсилення

Управління портами введення/виведення МК відбувається за допомогою HAL функцій від ST. Виглядає вона так:

В цьому проекті використовується один порт PORT E. Встановлення в одиницю виглядає наступним чином:

Управління ЦАП. Управління ЦАП відбувається через SPI. Використовується апаратний SPI зі швидкістю передачі 50 МГц.

API модуля:

`void DAC_Init(bool standalone_mode, bool ref_off, bool spi_reset);` - ініціалізація ЦАП.

задання рівня сигналу на обраному каналі шляхом створення сигналу синусоїди за допомогою використання окремого таймера мікроконтролера. Значення амплітуд синусоїди беруться з певної таблиці. Частота сигналу залежить від налаштувань таймера.

Керування та налаштування аналого-цифрового перетворювача (АЦП) виконується через стандартний інтерфейс SPI, а отримані дані читаються за допомогою I2S. Для цього використовуються стандартні функції HAL від ST, до яких додається власна логіка керування. Ця логіка дозволяє зчитати дані з АЦП та записати їх у пам'ять за допомогою прямого доступу до пам'яті (DMA). Застосування DMA дозволяє записувати дані безпосередньо в оперативну пам'ять

мікроконтролера без участі центрального процесора (ЦП), що забезпечує швидшу передачу даних та знижує ризик втрати інформації. Після цього, за допомогою переривань, дані передаються по UART. Лінія MCLK використовується для тактування АЦП. Ця лінія спільна для двох мікросхем АЦП. Вибір лівого або правого каналу здійснюється за допомогою сигналу LRCLK (це частина I2S). Кожен АЦП має свій власний сигнал LRCLK. Дані зчитуються послідовно.

## ВИСНОВОК

В процесі виконання бакалаврської дипломної роботи проведено комплексне дослідження аналого-цифрової системи, що забезпечує високу точність перетворення низькочастотних сигналів.

Робота охопила такі основні завдання:

— досліджено основні принципи перетворення аналогових сигналів у цифрову форму, зокрема методи квантування, вибірки та кодування, було розглянуто різні алгоритми цих процесів і їх вплив на точність та якість перетворення;

— розглянуто різні архітектури і топології аналого-цифрових перетворювачів (АЦС), які підходять для високоточного перетворення низькочастотних сигналів, були проаналізовані їх переваги та недоліки з точки зору швидкості, роздільної здатності та шуму;

— проведено аналіз і порівняння різних моделей АЦС, які є популярними на ринку, оцінено їх характеристики, включаючи роздільну здатність, динамічний діапазон, лінійність та енергоефективність;

— проаналізовано алгоритми калібрування динамічних вимірювальних каналів АЦС, досліджено різні методи корекції систематичних похибок та зміщень, що дозволяють досягти високої точності вимірювання низькочастотних сигналів.

Дослідження дали цінні практичні рекомендації щодо вибору та використання аналого-цифрових систем для точного перетворення низькочастотних сигналів. Робота дала значний внесок у розуміння принципів роботи АЦП та оптимізаційних методів для досягнення високої якості сигнального перетворення. Оскільки поставлені завдання виконані, можна стверджувати, що була досягнута мета бакалаврської дипломної роботи.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

Е

EA to D and D to A Converter ICs [Електронний ресурс] /Edited by Laroy Davis. – 2010. – Режим доступу: [http://www.interfacebus.com/Analog\\_DAC.html](http://www.interfacebus.com/Analog_DAC.html).

Antoni J. Sparse acoustical holography from iterated Bayesian focusing / Antoni J., Le Magueresse T., Leclère Q., Simard P. // *Journal of Sound and Vibration*. – 2019. – Vol. 446. – P. 289–325.

Gilquin L. Sensitivity analysis of two inverse methods: conventional beamforming and Bayesian focusing / Gilquin L., Bouley S., Antoni J., Le Magueresse T., Marteau G. // [\*Journal of Sound and Vibration\*](#). – 2019. – Vol. 455. – P. 88–202.

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.

Battista G. Inverse methods in aeroacoustic three-dimensional volumetric noise source localization and quantification / Battista G., Chiariotti P., Martarelli M., Castellini P. // *Journal of Sound and Vibration*. – 2020. – Vol. 473. – P. 115208.

Lecomte P. Equivalent source model from acousto-optic measurements and application to an acoustic pulse characterization / Lecomte P., Leclère Q., Ollivier S. // *Journal of Sound and Vibration*. – 2019. – Vol. 450. – P. 141–155.

Wang C. Hybrid uncertainty propagation of coupled structural–acoustic system with large fuzzy and interval parameters / Wang C., Qiu Z., Li Y. // *Applied Acoustics*. – 2016. – Vol. 102. – P. 62–70.

He Z. A non-contact acoustic pressure-based method for load identification in acoustic-structural interaction system with non-probabilistic uncertainty / He Z., Lin X., Li E. // *Applied Acoustics*. – 2019. – Vol. 148. – P. 223–237.

Foth B. A fuzzy clustering method for periodic data, applied for processing

М

М

Д

Г



turbomachinery beamforming maps / Toth B., Vad J. // Journal of Sound and Vibration. – 2018. – Vol. 434. – P. 298–313.

[Патент на корисну модель 144216, \(UA\) МПК: H04 L 1/00. Спосіб виправлення пакетів помилок за допомогою перемикування циклічних кодів / Семеренко В. П. патентовласник: Вінницький національний технічний університет. - №u202002826, заявл. 12.05.2020. - Опубл. 10.09.2020, бюл. № 17.](#)

Азаров О. Д., Генеральницький Є. С. Високолінійні балансні двотактні підсилювачі постійного струму із низкою похибкою зсуву нуля // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. - 2020. - № 1. – С. 22 – 31.

Азаров О. Д., Генеральницький Є. С. Статичні і динамічні характеристики високолінійних двотактних буферів напруги на біполярних транзисторах / Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2020. - № 4. - С.89-97.

Азаров О. Д., Черняк О. І. Багатоканальний АЦП порозрядно-слідкувального врівноваження з ваговою надлишковістю // Інформаційні технології та  
Захарченко С. М. Метод визначення відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення в режимі основного перетворення [Текст] / С. М. Захарченко, Р. С. Гуменюк, М. Г. Захарченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія.- В.: ВНТУ, 2017. - № 1. – С. 53-61.

Гуменюк Р.С. Методи та засоби оперативного оцінювання відхилень ваг розрядів АЦП послідовного наближення з ваговою надлишковістю: Дис. на здоб. ступ. доктора філософії за спец. 123 – комп'ютерна інженерія.- Вінниця, 2021.- 160 с.- Режим доступу: [http://inmad.vntu.edu.ua/PhD/dis\\_Humeniuk.pdf](http://inmad.vntu.edu.ua/PhD/dis_Humeniuk.pdf).

## 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 бакалаврської дипломної роботи

«Аналого – цифрова система високоточного перетворення низькочастотних сигналів. Частина 2. Програмне забезпечення»

08-23. КБДР.028.00.000 ТЗ

Керівник, к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Л.В. Крупельницький

Виконавець

П.П. Слободянюк

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

Мета БКР і призначення розробки

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.

Основні технічні вимоги

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.

.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 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.

.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;

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

.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**

Лістинг файлу DataCom.h







## **ДОДАТОК В**

Лістингу файлу VirtualCom.h







## ДОДАТОК Д

Лістинг файлу HC05.c









**ДОДАТОК Е**  
Лістинг файлу OP\_SetAmp.h



## **ДОДАТОК Ж**

Лістингу файлів AD5666.h, N\_ADC.c



## Лістинг файлу N\_ADC.c

```
#define F_CPU 16000000L
#include <avr/io.h>
#include <stdbool.h>
#include "softUart.h"
#include "softUart.c"
//#include "uart.c"
#include "avr/interrupt.h"
#include <util/delay.h>
#include "soft_spi.h"
#include "ad5666.h"

uint8_t sine[] = {64, 65, 67, 68, 70, 72, 73, 75,
    76, 78, 79, 81, 82, 84, 85, 87,
    88, 90, 91, 92, 94, 95, 97, 98,
    99, 100, 102, 103, 104, 105, 107, 108,
    109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116,
    117, 118, 118, 119, 120, 121, 121, 122,
    123, 123, 124, 124, 125, 125, 126, 126,
    126, 127, 127, 127, 127, 127, 127, 127,
    128, 127, 127, 127, 127, 127, 127, 127,
    126, 126, 126, 125, 125, 124, 124, 123,
    123, 122, 121, 121, 120, 119, 118, 118,
    117, 116, 115, 114, 113, 112, 111, 110,
    109, 108, 107, 105, 104, 103, 102, 100,
    99, 98, 97, 95, 94, 92, 91, 90,
    88, 87, 85, 84, 82, 81, 79, 78,
    76, 75, 73, 72, 70, 68, 67, 65,
    64, 62, 61, 59, 58, 56, 54, 53,
    51, 50, 48, 47, 45, 44, 42, 41,
    39, 38, 36, 35, 34, 32, 31, 30,
    28, 27, 26, 25, 23, 22, 21, 20,
    19, 18, 17, 15, 14, 13, 13, 12,
    11, 10, 9, 8, 8, 7, 6, 5,
    5, 4, 4, 3, 3, 2, 2, 2,
    1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1,
    1, 2, 2, 2, 3, 3, 4, 4,
```

```

5 , 5 , 6 , 7 , 8 , 8 , 9 , 10,
11 , 12 , 13 , 13 , 14 , 15 , 17 , 18,
19 , 20 , 21 , 22 , 23 , 25 , 26 , 27,
28 , 30 , 31 , 32 , 34 , 35 , 36 , 38,
39 , 41 , 42 , 44 , 45 , 47 , 48 , 50,
51 , 53 , 54 , 56 , 58 , 59 , 61 , 62};

```

```

void set_Koef(uint8_t p)
{
    DDRC = 0x3f;
    PORTC &= ~(0x3F);
    PORTC |= p;
    PORTB|=(1<<PINB3);
    _delay_ms(1000);
    PORTB&=~(1<<PINB3);
    _delay_ms(1000);
}
bool sinus_flag = false;
uint16_t sine_part_number =0;
uint16_t dac_value = 0;
ISR(TIMER2_COMP_vect)
{
    // DAC_Init(true,false,false);
    if(sinus_flag)
    {
        DAC_Analog_Write(ALL,sine[sine_part_number]*dac_value);
        sine_part_number+=4;
        if(sine_part_number>=256)
            sine_part_number=0;
    }
    else
    {
        DAC_Analog_Write(ALL, dac_value);
    }
    //if(flag)
    //{
    //flag = false;
    //DAC_Analog_Write(ALL, 0);
    //}
    //else
    //{
    //flag = true;
    //DAC_Analog_Write(ALL, 10000);
    //}
}

```

```

void getCommand()
{
    uint8_t startByte =SUART_GetChar();
    SUART_PutChar(startByte);
    if(startByte == 0x55)
    {
        char msg[] = {"Packet received\n"};
        SUART_PutStr(msg);
        uint8_t size = SUART_GetChar();
        SUART_PutChar(size);
        uint8_t package[20];
        for(int i =0; i<size;i++)
        {

            package[i] = SUART_GetChar();
            SUART_PutChar(package[i]);
        }
        if(package[0] == 0x12) // led
        {
            char msg[] = {"LED setup\n"};
            SUART_PutStr(msg);
            PORTB&=~(1<<PINB3);
            PORTB&=~(1<<PINB7);
            if(package[1] & 0x01)
                PORTB|=(1<<PINB3);
            if(package[1] & 0x02)
                PORTB|=(1<<PINB7);
        }
        if(package[0] == 0x10) //dac
        {
            PORTB|=(1<<PINB3);
            _delay_ms(10);
            PORTB&=~(1<<PINB3);
            if(package[1] == 0x01)
                sinus_flag = true;
            else
                sinus_flag = false;

            dac_value = package[2];
            dac_value |= package[3]<<8;
        }
        if(package[0] == 0x11) // koef
        {

```



```

        set_Koef(package[1]);
    }
    char msg2[] = {"End packet\n"};
    SUART_PutStr(msg2);
}
else
{
    char msg[] = {"Wrong packet\n"};
    SUART_PutStr(msg);
}
}
int main(void)
{
    //init_uart();
    /* Replace with your application code */

    SUART_Init();
    OCR2 = 65;

    TCCR2 |= (1 << WGM21);
    // Set to CTC Mode

    TIMSK |= (1 << OCIE2);
    //Set interrupt on compare match

    TCCR2 |= (1 << CS22) ;
    // set prescaler to 64 and starts PWM
    char ch[] = "Start Program\n";
    SUART_PutStr(ch);
    sei();
    //TIMSK |= (1 << TOIE0);
    //sei();
    //enable interrupts
    //TCCR0 |= (1 << CS01) | (1 << CS00);
    // SUART_TurnRxOff();
    DDRC |= 0x3f;
    SPI_Init();
    _delay_ms(200);
    DAC_Init(true,false,false);
    DAC_Init(true,false,false);
    DAC_Analog_Write(ALL,200);
    //PORTC =0x03;
    // PORTC = (0x3F);
    DDRB|=(1<<PINB3) | (1<<PINB7);// set prescaler to 64 and start the timer

```

```

while (1)
{
    //_delay_ms(50);
    //PORTB|=(1<<PINB3);
    //_delay_ms(50);
    //PORTB&=~(1<<PINB3);
    //DAC_Analog_Write(ALL,i*100);
    //_delay_ms(1000);
    //DAC_Analog_Write(ALL,0x0001);
    //PORTB|=(1<<PINB3);
    //_delay_ms(1000);
    //PORTB&=~(1<<PINB3);
    //_delay_ms(1000);
    //set_Koef(SUART_GetChar());
    //_delay_ms(100);
    char inb[5];
    //SUART_PutChar(gchar);
    //for (int i=0;i<4;i++)
    //{
    //inb[i] = SUART_GetChar();
    //}
    //SUART_PutStr(inb);
    getCommand();
    //PORTB|=(1<<PINB3);
    //_delay_ms(1000);
    //PORTB&=~(1<<PINB3);
    //_delay_ms(1000);

    ///PORTE=0;
    //    SUART_TurnRxOff();

    //_delay_ms(1000);
}
return 0;

```

## ДОДАТОК К

### ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Аналого-цифрова система високоточного перетворення  
низькочастотних сигналів. Частина 2. Програмне забезпечення

Тип роботи: бакалаврська дипломна робота  
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра обчислювальної техніки  
(кафедра, факультет)

#### Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 97,9% Схожість 2,1%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку \_\_\_\_\_  
(підпис)

Захарченко С.М.  
(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

А \_\_\_\_\_  
в (підпис)

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
о (підпис)

Крупельницький Л.В.  
(прізвище, ініціали)

р

р

о

б