МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра комп'ютерної фізики

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи

за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Розробка прецизійного багатоканального АЦП»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-64

Ковальчук С.М.

спеціальність:

105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: Комп'ютерна фізика
Керівник:

к.ф.-м.н., доцент Сухов Р.В.

Рецензент:

Харків – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій у фізико-енергетичних системах Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магистр Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Костянтин НЄМЧЕНКО .

підпис

"____"_____2020 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Ковальчук Сергій Миколайович

1.Тема роботи "Розробка прецизійного багатоканального АЦП" керівник роботи: Сухов Руслан Володимирович, кандидат фізико-математичних наук, доцент.

затверджені наказом по університету від 06 грудня 2020 року № 0210-05/2267

2. Строк подання студентом роботи 12 травня 2020 р.
3. Перелік питань, які потрібно розробити:
1) Огляд літератури та формулювання задачі про даних створення багатоканального АЦП
2) Теоретичні засади аналого-цифрових перетворень
3) Математична модель швидкого перетворення Фур'є для цифрової обробки сигналів

4) Аналіз сучасних шаблонів програмування та обрання необхідних для створення програмного забезпечення мікроконтролера та графічної програми для оператора
5) Розгортання програмно-апаратного оточення для розробки АЦП

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми, узгодження, а також затвердження її на кафедрі
2	Робота над літературою та іншими джерелами
3	Затвердження теми на кафедрі
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи(висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5. Дата видачі завдання « »_____ 2020

Студент _____ **Ковальчук С.М.**

підпис ініціали, прізвище

Керівник роботи _____ **Сухов Р.В.**

підпис ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Ковальчук С.М. Розробка прецизійного багатоканального АЦП.

Дипломна робота представлена на 42 сторінках, складається з вступу, 3 розділів, та висновків, містить 15 рисунків, список використаної літератури з 35 найменувань.

Мета роботи – розробка і програмна реалізація системи багатоканального АЦП, призначеної для розв`язку задач пов`язаних з перетворенням аналогового сигналу у цифровий

Об`єкт дослідження - сучасні практичні й теоретичні засади побудови вимірювальних систем.

Предмет дослідження – аналого-цифрові перетворювачі із мікроконтролерним керуванням.

Розроблена система аналого-цифрового перетворення призначена для розв`язку задачі конвертації аналогового сигналу для подальшого сприймання комп`ютером інформації

У системі передбачено використання швидкого перетворення Фур`є.

Для усунення шумів та більш чистої обробки сигналів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АНАЛОГО-ЦИФРОВЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ, ОБРОБКА ДАНИХ, ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛКЕКС, МІКРОКОНТРОЛЕР.

РЕФЕРАТ

Ковальчук С.Н. Разработка прецизионного многоканального АЦП.

Дипломная работа представлена на 42 страницах, состоит из введения, 3 глав, и заключения, включает 15 рисунков, список использованной литературы из 35 наименований.

Цель работы - разработка и программная реализация системы многоканального АЦП, предназначенной для решения задач, связанных с преобразованием аналогового сигнала в цифровой

Объект исследования - современные практические и теоретические основы построения измерительных систем.

Предмет исследования - аналого-цифровые преобразователи с микроконтроллерным управлением.

Разработана система аналого-цифрового преобразования предназначена для решения задачи конвертации аналогового сигнала для дальнейшего восприятия компьютером информации

В системе предусмотрено использование быстрого преобразования Фурье. Для устранения шумов и более чистой обработки сигналов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ, ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ПРОГРАМНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛКЕКС, МИКРОКОНТРОЛЛЕР.

ABSTRACT

Kovalchuk S.N. Development of precision multi-channel ADC.

The thesis is presented on 42 pages, consists of introduction, 3 chapters, and conclusion, includes 15 figures, a list of used literature from 35 titles.

The purpose of the work is the development and software implementation of a multi-channel ADC system designed to solve problems associated with converting an analog signal to digital

Object of study - modern practical and theoretical foundations of the construction of measuring systems.

The subject of the study is analog-to-digital converters with microcontroller control.

A system of analog-to-digital conversion is designed to solve the problem of converting an analog signal for further computer perception of information

The system provides for the use of fast Fourier transform. To eliminate noise and cleaner signal processing.

KEYWORDS: ANALOG-DIGITAL CONVERSION, DATA PROCESSING, SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX, MICROCONTROLLER.

ЗМІСТ

ВСТУП _____9

1. КЛАСИФІКАЦІЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

1.1. Паралельні аналого-цифрові перетворювачі _____11

1.2. Послідовні аналого-цифрові перетворювачі _____12

1.3. Послідовно-паралельні аналого-цифрові перетворювачі _____14

2. ПРИНЦИП РОБОТИ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

2.1. Аналого-цифрове перетворення _____19

2.2. Математична модель швидкого перетворення Фур'є для цифрової обробки сигналів _____26

3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТА ЇЇ ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

3.1. Принцип побудови програмно-апаратного комплексу _____31

3.2. Розробка додаткового програмного забезпечення для демонстрації оброблених результатів _____36

ВИСНОВКИ _____39

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ _____40

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА АБРЕВІАТУР

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

DMA – прямий доступ до пам'яті

UART – універсальний асинхронний приймач/передавач

ЦП – центральний процесор

ПЗ – програмне забезпечення

МК – мікроконтролер

ФС – формувач сигналів

ПК – персональний комп'ютер

ВСТУП

Сучасні наукові дослідження та технологічні процеси супроводжуються великими об’ємами інформаційних потоків, потребують швидкості у прийнятті рішень та точності при вимірюванні величезної кількості параметрів. Такі вимоги неможливо реалізувати без використання сучасної мікроконтролерної техніки та інтелектуального програмного забезпечення, що поєднує алгоритмізацію та досвід людини-оператора.

У більшості випадків датчиком фізичної величини (температури, тиску, зміщеня, концентрації тощо) є деякий аналоговий пристрій. Вихідний аналоговий сигнал не може буди прямо сприйнятий сучасною комп’ютерною технікою й потребує попередньої конвертації у цифрову форму. Саме тому при розробці систем автоматизації та керування особлива увага приділяється теоретичним та практичним засадам аналого-цифрових перетворень (АЦП). Від точності й швидкості оцифровування, можливості ефективної обробки сигналів (наприклад, усувати шумові складові із сигналів у реальному часі) залежить робота усієї системи в цілому.

Мета роботи – розробка багатоканального аналогово-цифрового перетворювача із гнучким налаштуванням режимів роботи.

Завдання, що були вирішені для досягнення мети роботи:

- Провести дослідження вже існуючих рішень подібного роду
- Обрати апаратну платформу для реалізації багатоканального АЦП
- Розробити програмне забезпечення для мікроконтролера із використанням сучасних шаблонів програмування та теоретичних засад обробки сигналів.
- Розробити програмне забезпечення з графічним інтерфейсом для використання оператором на стороні комп’ютера
- Випробувати програмно-апаратний комплекс підчас практичного застосування

Об'єкт дослідження – сучасні практичні й теоретичні засади побудови вимірювальних систем.

1 КЛАСИФІКАЦІЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Аналого-цифрове перетворення - це процес трансформації вхідних фізичних величин в їх числове відображення [1]. Аналого-цифровий перетворювач - це обладнання, котре реалізує цю трансформацію. Тобто вхідним значенням АЦП є будь-яка фізична величина – струм, напруга, ємність, опір, частота проходження імпульсів і т. д. [2]

Концепція аналого-цифрового перетворення пов'язана з концепцією вимірювання. Під вимірюванням ми розуміємо процес який вимірює величини з певним стандартом; в аналого-цифровому перетворенні, величина вхідного сигналу порівнюється з певною опорною кількістю (як правило, це опорна напруга). Тобто, аналого-цифрове перетворення повинно розглядатися як підрахунок значення вхідного сигналу, і до нього застосовуються усі поняття метрології, наприклад помилки виміру [3].

В наш час існує велика кількість методів конвертації аналог-код. Ці методи різні за багатьма ознаками, наприклад швидкістю перетворення, складністю апаратної реалізації і потенційною точністю.

В основу класифікації АЦП покладена ознака, котра вказує як у часі проводиться процес конвертації в цифрову, аналогової величини. Основою перетворення фізичних значень сигналу в цифровий еквівалент є операція кодування та квантування. Ці операції можуть здійснюватися за допомогою

- паралельної
- послідовної
- послідовно-паралельної

процедури наближення цифрового значення до перетворюваної величини.

1.1 Паралельні аналого-цифрові перетворювачі

Паралельні АЦП Рис. 1.1. реалізують [4] квантування сигналу водночас за допомогою компараторів котрі включені паралельно джерелу аналогового сигналу. Можна представити вісім різних чисел, включаючи нуль, за допомогою трьох двійкових розрядів. Отже потрібно сім компараторів. Сім відповідних рівновіддалених опорних напруг, котрі утворюють резистивним дільником.

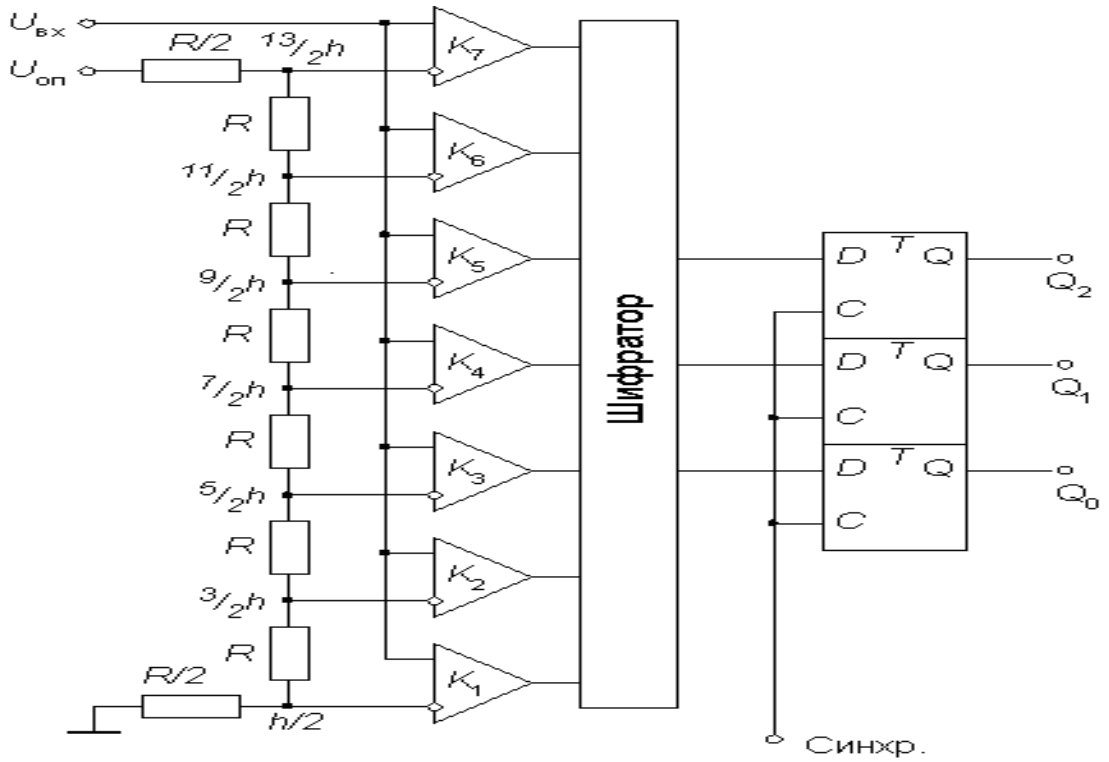


Рис. 1.1. Схема паралельного АЦП

Підключення пріоритетного шифратора саме до виходу АЦП має привести до помилкових результатів при зчитуванні вихідного коду.

Так як результати аналого-цифрового перетворення записуються, як правило, в обладнання, існує ймовірність отримати помилкову величину [5]. Вирішувати існуючу проблему необхідно, наприклад, за допомогою пристроїв вибірки-зберігання, які мають час вибірки порядку 0,10. Інший шлях полягає у використанні коду Грея, особливість якого є зміна, при переході від одного кодового значення до іншого, тільки однієї кодової позиції.

Також, в деяких АЦП для зменшення ймовірностей збою при паралельному АЦ-перетворенню використовують двотактний цикл, тобто, спочатку стан виходу компараторів фіксується, а потім, після встановлення стану шифратора, в нього записують вихідне значення АЦП.

Не тільки перетворювач спалаху є найпростішим з точки зору експлуатаційної теорії, але він є найбільш ефективним із технологій АЦП з точки зору швидкості, обмежуючись лише затримками поширення порівняння та затвора. [6] На жаль, він є найбільш компонентним для будь-якої кількості вихідних бітів. Цей трибітний спалах ADC потребує семи компараторів.

Для чотирибітної версії потрібно 15 компараторів. З кожним додатковим вихідним бітом кількість необхідних компараторів подвоюється. Враховуючи, що вісім біт, як правило, вважаються мінімумом, необхідним для будь-якого практичного АЦП (потрібні 255 компараторів), Методологія спалаху швидко показує свою слабкість.

Додатковою перевагою флеш-перетворювача, що часто не помічається, є можливість його отримання нелінійного виходу. З резисторами з однаковим значенням в мережі дільниць опорного напруги кожен наступний двійковий рахунок представляє однакову кількість збільшення аналогового сигналу, забезпечуючи пропорційну характеристику [7]. Однак для спеціальних застосувань значення резисторів у розділювальній мережі можуть бути нерівними. Це дає АЦП власну, нелінійну відповідь на аналоговий вхідний сигнал. Жоден інший дизайн АЦП не може надати цьому режиму кондиціонування сигналу лише декілька змін значень компонента.

1.2 Послідовні аналого-цифрові перетворювачі

Послідовний перетворювач є реалізацією послідовних АЦП з одиничним наближенням, які складаються з лічильника, компаратора та ЦАП Рис. 1.2. [8] На один вхід компаратора надходить сигнал який є зворотнім зв'язком з ЦАП, а на іншій -. вхідний сигнал

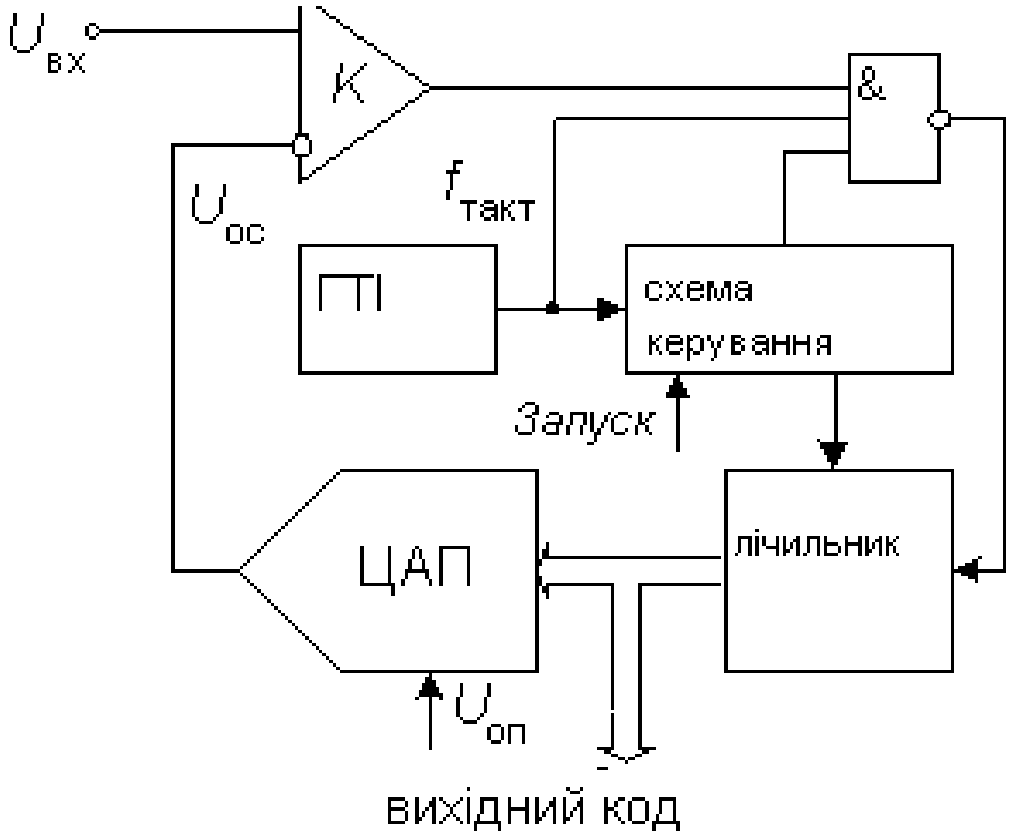


Рис. 1.2. Схема послідовного АЦП

Перетворювач починає працювати з приходом імпульсу запуску, котрий вмикає лічильник, який рахує кількість імпульсів, що надходять з генератора тактових імпульсів. [9] Вихідний код лічильника подають на ЦАП, який здійснює його перетворення в напругу зворотного зв'язку. Процес конвертації триває до тих пір, поки вхідна напруга не зрівняється з напругою зворотного зв'язку і переключиться компаратор, який своїм вихідним сигналом припиняє надходження тактових імпульсів на лічильник. Перехід виходу компаратора з 1 в 0 є завершенням процесу конвертації. Вихідний код є пропорційним вхідній напрузі в момент завершення перетворення, зчитується з виходу лічильника.

Час перетворення АЦП цього типу визначається вхідною напругою і є змінним. Його максимальне значення відповідає максимальній вхідній напрузі при частоті тактових імпульсів $F_{\text{такт}}$ та розрядності двійкового лічильника N

$$t_{\text{пр.макс}} = (2^N - 1)/F_{\text{такт}} \qquad (1.1)$$

Наприклад, при $F_{\text{такт}}$= 1 МГц і N = 10 $t_{\text{пр.макс}}$= 1024 мкс, що є максимальною частотою вибірки порядку 1 кГц.

Статична похибка конвертації визначається сумарною статичною похибкою використовуваних компаратором і ЦАП. Частоту рахункових імпульсів необхідно обрати з урахуванням закінчення перехідного процесу в них.

При роботі без пристроїв вибірки-зберігання з часом перетворення збігається апертурний час. Як наслідок, результати перетворення сильно залежить від пульсацій вхідної напруги. За наявністю високочастотної пульсації середнє значення вихідного коду залежить нелінійно від середнього значення вхідної напруги. Мається на увазі, що АЦП цього типу без пристрою вибірки-зберігання придатний для роботи з постійною або повільно мінливою напругою, яка за час перетворення змінюється не більше, ніж на значення кванта перетворення.

Таким чином, особливість АЦП послідовного рахунку - це невелика кількість, що досягає декількох кілогерц [10]. Перевагою АЦП цього класу є порівняльна простота побудови, обумовлена послідовним характером виконання процесу конвертації.

1.3 Послідовно-паралельні аналого-цифрові перетворювачі

Послідовно-паралельні АЦП - це компроміс між прагненням отримувати високу швидкодію та бажанням зробити це дешевше. Послідовно-паралельні АЦП балансують по роздільній здатності і швидкодії між АЦП послідовного наближення і паралельними АЦП. Послідовно-паралельні АЦП підрозділяють на багатоступінчасті, багататактного і конвеєрні [11].

У багатоступеневому АЦП процес перетворення вхідного сигналу розділяють у просторі. Як приклад на Рис.1.3 представлена схема двоступеневого 8-розрядного АЦП.

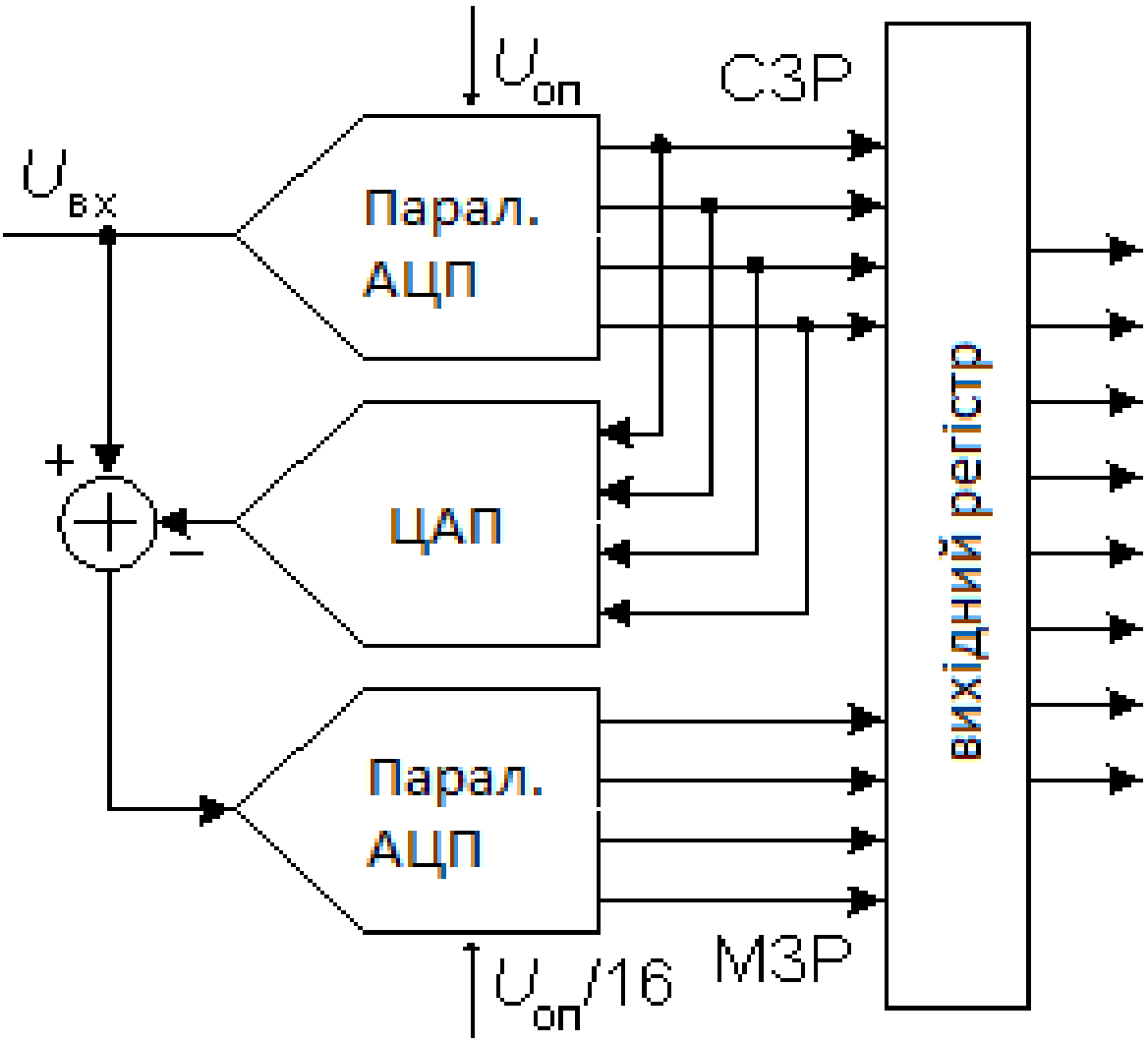


Рис. 1.3. Структурна схема двоступеневого АЦП

Верхній по схемі АЦП здійснює грубе перетворення сигналу у чотири старші розряди вихідного коду. Цифрові сигнали з виходу АЦП надходять на вихідні регістри і одночасно на вхід 4-розрядного швидкодіючого ЦАП.

Залишок від віднімання вихідної напруги ЦАП з вхідної напруги схеми надходить на вхід АЦП2, опорна напруга котрого в 16 разів менше, ніж у АЦП1. Як наслідок, квант АЦП2 в 16 разів менше за квант АЦП1. Цей залишок, перетворений АЦП2 в цифрову форму має чотири молодших розряди вихідного коду. Різниця між АЦП1 і АЦП2 це насамперед вимога до точності: у АЦП1 точність повинна бути такою ж як у 8-розрядного перетворювача, в той же час як АЦП2 має точність 4-розрядної [12].

Грубо наближені і точні величини мають відповідати одній і тій вхідній напрузі $U_{вх}$. Через наявність затримки сигналу в першого ступеня виникає, однак, хто тимчасово запізнювання. Тому при використанні цього способу вхідна напруга необхідно підтримувати постійним за допомогою пристрою вибірки-зберігання до тих пір, поки не буде отримано всі число.

Перетворювач складається з 4-розрядного паралельного аналого-цифрового перетворювача, квант якого визначає величину опорної напруги, 4-розрядного ЦАП і пристрій управління. Якщо максимально вхідний сигнал дорівнює 2,57 В, то в першому такті перетворювач працює з кроком квантування h1 = 0,17 В. В цей час вхідний код ЦАП дорівнює нулю. Пристрій управління пересилає отримані від АЦП в першому такті дані в чотири старших розряди вихідного регістру, подає ці дані на вхід ЦАП і зменшує в 16 разів опорну напругу АЦП. Таким чином, у другому такті крок квантування h2 = 0,01 В і залишок, який утворюється при відніманні вихідної напруги ЦАП з вхідної напруги схеми, буде перетворено в молодший напівбайт вихідного слова[13].

Очевидно, що 4-розрядні АЦП і ЦАП, які використовуються в цій схемі мають мати 8-розрядну точність, в іншому випадку пропуск кодів є можливим, тобто при плавному зростанні вхідної напруги вихідний код АЦП не бере деякі значення зі своєї шкали. Так само, як і в попередньому перетворювачі, вхідна напруга багатотактного АЦП під час перетворення має бути незмінною, для чого між джерелом вхідного сигналу і його входом слід включити пристрій вибірки-зберігання [14].

Швидкодію багатотактного АЦП визначають повним часом перетворення 4-розрядного АЦП, часом встановлення ЦАП з похибкою, часом спрацьовування цифрових схем управління, що не перевищує 0,2 ... 0,3 кванта 8-розрядного АЦП, де час перетворення АЦП, двічі, входить в загальний час перетворення [15]. В результаті перетворювач такого типу при інших рівних умовах є повільнішим двоступеневого перетворювача, який був розглянутим вище. Однак він простіше і дешевше. За швидкодією багатотактного АЦП

займають проміжне положення між АЦП послідовного наближення і багатоступінчатими АЦП.

В аналогово-цифровому перетворювачі, в якому кожна вибіркова частина вхідного відео або іншого аналогового сигналу перетворюється на цифровий символ у безлічі паралельних перетворень, що відбуваються послідовно.

Діапазон опорних сигналів рівня напруги низхідної величини, які застосовуються до порівняльних пристроїв для здійснення відносно тонкого паралельного перетворення вибіркового аналогового сигналу, вибирається таким, що буде більшим за та зміщеним щодо ступенів або збільшення кроку рівня напруги сигнали зменшення величини, які застосовуються до компараторів для здійснення попереднього відносно більш грубого паралельного перетворення, і кодовані виходи з послідовно паралельних перетворень цифровим чином додаються з найменшим значущим бітом кодованого виходу [16].

Від кожного попереднього порівняно більш грубого паралельного перетворення. таку саму вагу, як найбільш значущий біт кодованого виходу від наступного відносно більш тонкого паралельного перетворення, щоб усунути в результаті дефекти цифрового додавання, які в іншому випадку виникли б внаслідок неточностей опорних сигналів рівня напруги та / або в операціях порівняння компараторів.

Запропоновано різні типи аналогових та цифрових перетворювачів, наприклад, для використання в коректорах часової бази. У так званих аналогово-цифрових перетворювачах паралельного типу вибірковий аналоговий сигнал, такий як вхідний відеосигнал, застосовується до першого входу порівняння кожного з безлічі подвійних вхідних компараторів [17], тоді як другий порівняльний вхід компараторів отримує відповідні опорні сигнали рівня напруги, наприклад, з відповідних джерел напруги або з мережі розподілу напруги. Виходи компараторів з'єднані з кодером, який забезпечує двійковий або інший закодований вихід або цифровий символ, що складається з заздалегідь

визначеної кількості біт. Хоча аналогові цифрові перетворювачі паралельного типу здатні працювати з високою швидкістю, вони мають ряд властивих недоліків. Перш за все, для таких перетворювачів потрібна велика кількість компараторів та пов'язаних з ними джерел напруги або резисторів в мережі розподілу напруги для забезпечення відповідних опорних сигналів рівня напруги. Більш конкретно, в аналогових цифрових перетворювачах паралельного типу необхідна кількість компараторів та відповідних опорних сигналів рівня напруги становить $2k - 1$, причому k - кількість біт двійкових кодів, бажаних на виході з кодера [19].

Так, наприклад, якщо вихід кодера повинен містити 8 біт двійкових кодів, необхідна кількість компараторів становить 28 -1 або 255, а також потрібна відповідна кількість джерел напруги. Крім того, в описаних аналого-цифрових перетворювачах паралельного типу будь-які неточності в порівняльних пристроях та / або у відповідних опорних сигналах рівня напруги можуть створювати дефекти в сигналі, який отримують, коли оцифрований вихід аналого-цифрового перетворювача згодом відновлюється. до аналогової форми.

2 ПРИНЦИП РОБОТИ АНАЛОГО ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

2.1 Аналого-цифрове перетворення

Одним з основних переваг АЦП є висока швидкість збору даних навіть на мультиплексованих входах. З винаходом широкого спектра інтегральних мікросхем АЦП збір даних з різних датчиків стає більш точним і швидким. Динамічними характеристиками високопродуктивних АЦП є поліпшена повторюваність вимірів, низьке енергоспоживання, точна пропускна здатність, висока лінійність, чудове ставлення сигнал-шум (SNR) і так далі.

Різноманітними областями застосування АЦП є системи вимірювання та управління, промислове вимірювальне обладнання, системи зв'язку і всі інші сенсорні системи. Класифікація АЦП заснована на таких факторах, як продуктивність, швидкість передачі даних, потужність, вартість і т. Д. Аналого-цифровий перетворювач [20].

Майже кожен вимірюваний в навколишньому середовищі параметр має аналогову форму, таку як температура, звук, тиск, світло і т. Д Розглянемо систему контролю температури, в якій отримання, аналіз та обробка даних про температуру з датчиків неможливі на цифрових комп'ютерах і процесорах. Отже, ця система потребує проміжному пристрої для перетворення аналогових даних про температуру в цифрові дані для зв'язку з цифровими процесорами, такими як мікроконтролери та мікропроцесори.

Існує абсолютна вірогідність спотворення вхідного сигналу на вихідний стороні, якщо він дискретизирован з частотою, відмінною від бажаної. Тому ще одним важливим міркуванням АЦП є частота дискретизації. Теорема Найквеста говорить, що реконструкція отриманого сигналу вносить спотворення, якщо тільки він не дискретизируется з (мінімальної) подвійний частотою найбільшого частотного змісту сигналу, як ви можете спостерігати на діаграмі. Але ця частота в 5-10 разів перевищує максимальну частоту сигналу на практиці.

Типи аналого-цифрових перетворювачів [21]

Деякі з типів аналого-цифрових перетворювачів включають в себе:

• Двошаровий аналого-цифровий перетворювач

• Flash A / D конвертер

• Послідовне наближення аналого-цифрового перетворювача

Двошаровий аналого-цифровий перетворювач Рис 2.1

У цьому типі АЦП перетворювач порівнює напруга, використовуючи схему інтегратора, яка утворена комбінацією резистор, конденсатор і операційний підсилювач. По заданому значенню V_{ref} цей інтегратор генерує пилкоподібний сигнал на своєму виході від нуля до значення V_{ref}. Коли сигнал інтегратора запускається, відповідно лічильник починає відлік від 0 до 2^{n-1}, де n - кількість біт АЦП. Коли вхідна напруга Vin дорівнює напрузі форми хвилі, тоді схема управління фіксує значення лічильника, яке є цифровим значенням відповідного значення аналогового входу. Цей двоканальний АЦП є відносно недорогим і повільним пристроєм.

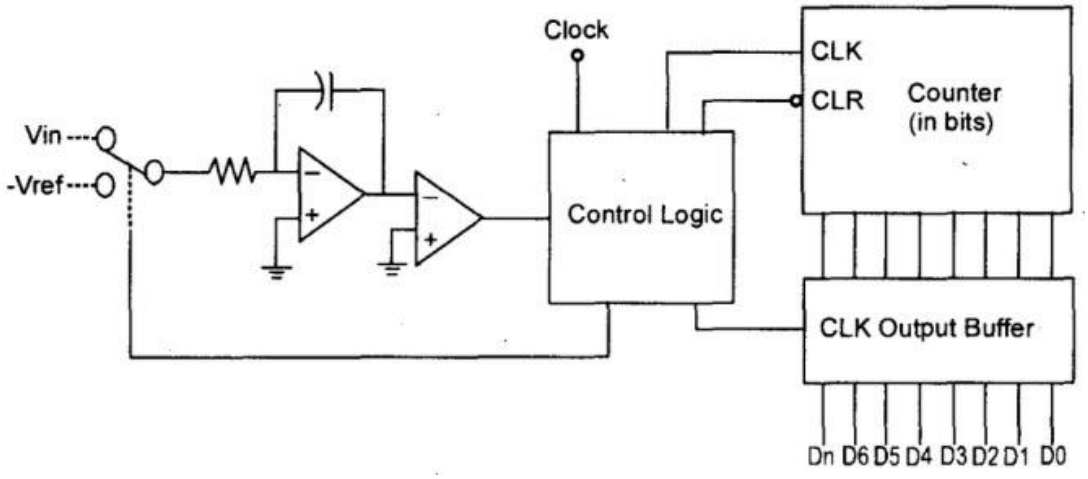


Рис. 2.1. Двошаровий аналого-цифровий перетворювач

АЦП є важливим компонентом, коли справа доходить до роботи з цифровими системами, які зв'язуються з сигналами в реальному часі. У зв'язку з тим, що ІТ швидко розвивається і застосовується в повсякденному житті, ці цифрові системи повинні зчитувати сигнали реального часу / часу, щоб точно надавати життєво важливу інформацію.

У реальному світі аналогові сигнали - це сигнали, які мають безперервну послідовність з безперервними значеннями (в деяких випадках вона може бути кінцевою). Ці типи сигналів можуть виходити від звуку, світла, температури і руху [23]. Цифрові сигнали представлені послідовністю дискретних значень, де сигнал розбивається на послідовності, які залежать від часового ряду або частоти дискретизації.

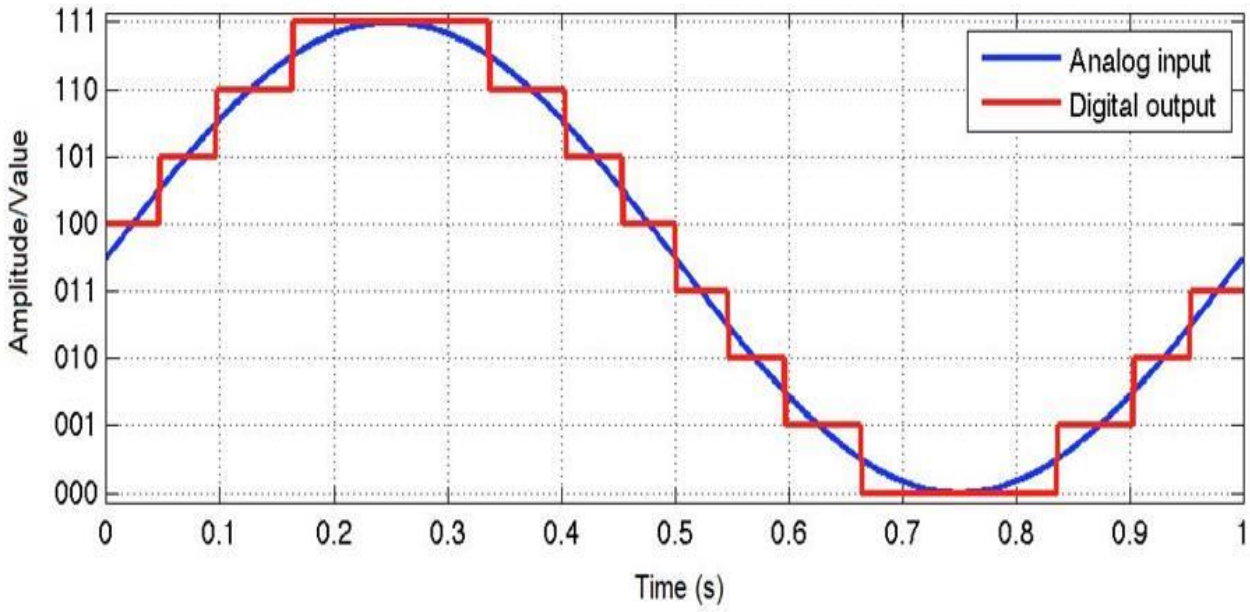


Рис 2.2 приклад аналогового та цифрового сигналу

Безперервний (аналоговий) сигнал, що перетворюється в цифровий сигнал. Мікроконтролери не можуть зчитувати значення, якщо це не цифрові дані. Це пов'язано з тим, що мікроконтролери можуть бачити тільки «рівні» напруги, які залежать від дозволу АЦП і напруги системи.

АЦП слідують послідовності при перетворенні аналогових сигналів в цифрові [24]. Спочатку вони роблять вибірку сигналу, потім визначають його кількісно, щоб визначити дозвіл сигналу, і, нарешті, встановлюють двійкові значення і відправляють його в систему для зчитування цифрового сигналу. Два важливих аспекти АЦП - це частота дискретизації і дозвіл.

$$\frac{\text{Частота дискретизації}}{\text{Частота}} \qquad (2.1)$$

Частота дискретизації АЦП, може бути прив'язана до швидкості АЦП. Частота дискретизації вимірюється з використанням «вибірок в секунду», де одиниці виміру. Це просто означає, скільки вибірок або точок даних потрібно за секунду. Чим більше вибірок бере АЦП, тим вище частоти, з якими він може працювати[26].

Одне важливе рівняння для частоти дискретизації:

$$fs = \frac{1}{T} \qquad (2.2)$$

де,

fs = частота дискретизації / частота

T = період вибірки або час, необхідний для повторної вибірки

Наприклад, на Рис 2.3 здається, що частота дискретизації дуже повільна, але сигнал все одно вийшов схожим на вихідний аналоговий сигнал. Це пов'язано з тим, що частота вихідного сигналу становить 1 Гц, а це означає, що частота була досить хорошою для відновлення аналогічного сигналу.

Якщо частота дискретизації низька, а частота сигналу висока, АЦП не зможе відновити вихідний аналоговий сигнал, що призведе до того, що система прочитає невірні дані

Рис 2.3 Приклад того, як відбувається накладення. У цьому прикладі ви можете побачити, де відбувається вибірка в аналоговому вхідному сигналі. Вихід цифрового сигналу зовсім неблизький до вихідного сигналу, так як частота дискретизації недостатньо висока, щоб не відставати від аналогового сигналу. Це викликає алиасинг, і тепер цифровий системі буде не вистачати повної картинки аналогового сигналу. Одне з практичних правил при з'ясуванні того, чи відбудеться псевдонім, - це використання теореми Найквіста. Згідно з теоремою частота дискретизації, частота повинна бути як мінімум удвічі більше, ніж максимальна частота сигналу, щоб відтворити початковий аналоговий сигнал

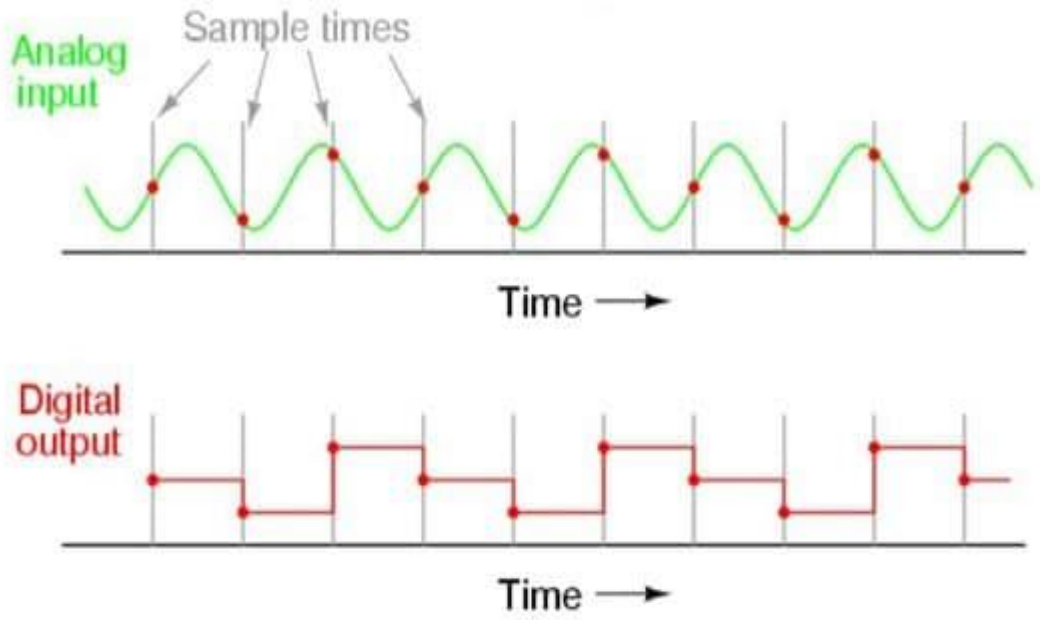


Рис 2.3 накладення сигналу

Наприклад, якщо сигнал, який ви вводите в цифрову систему, має максимальну частоту 100 кГц, то частота дискретизації на вашому АЦП повинна бути дорівнює або більше $\frac{200\ кс}{с}$. Це дозволить успішно відновити вихідний сигнал[27].

Також добре відзначити, що є випадки, коли зовнішній шум може призвести до несподіваної високій частоті в аналоговому сигналі, що може порушити сигнал, тому що частота дискретизації не може обробити додану частоту шуму. Завжди корисно додати фільтр згладжування (фільтр нижніх частот) до того, як почнеться АЦП і вибірка, оскільки це може запобігти появі несподіваних високих частот в системі.

Роздільна здатність АЦП може бути прив'язане до точності АЦП. Роздільну здатність АЦП можна визначити по його довжині в бітах. Швидкий приклад того, як він допомагає цифрового сигналу виводити більш точний сигнал, показаний на Рис 2.5. Тут ви можете бачити, що 1-біт має тільки два «рівня». У міру збільшення довжини в бітах рівні збільшуються, що робить сигнал ближче представляє вихідний аналоговий сигнал[28].

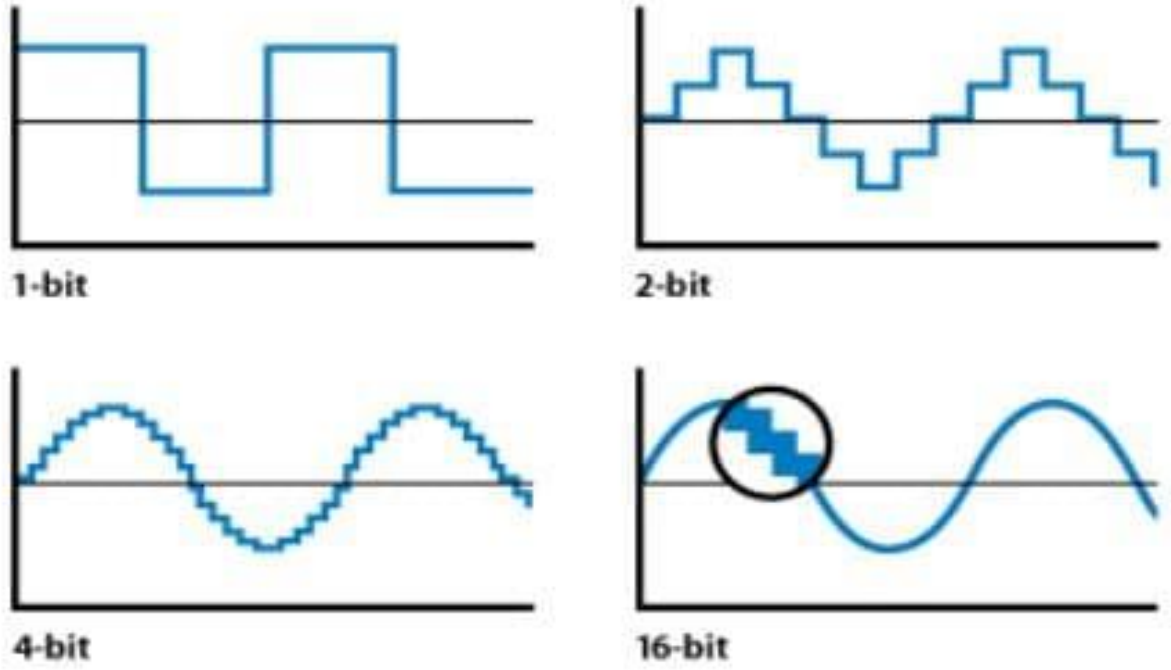


Рис 2.4 Вплив роздільної здатності на точність вихідного сигналу

Швидкість перетворення флеш-АЦП є сумою затримок компаратора і логічної затримки (логічна затримка зазвичай дуже мала). Флеш-АЦП дуже швидкі, але споживають величезну кількість ресурсів. Крім того, через необхідної кількості компараторів вони, як правило, є потужними кабелями, споживаючи значний струм. АЦП з 10-розрядної спалахом може споживати половину струму.

Різновидом флеш-конвертера є напів-спалах, яка використовує внутрішній цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) і віднімання, щоб зменшити кількість внутрішніх компараторів. Полуфотовие перетворювачі повільніше, ніж справжні флеш-перетворювачі, але швидше, ніж інші типи АЦП. Ми розглянемо їх в категорії Flash Converter.

Перетворювач послідовних наближень використовує компаратор і логіку рахунки для конвертування валюти. Перший крок у перетворенні, щоб побачити, якщо вхідний сигнал більше, ніж на половину опорного напруги. Якщо це так, встановлюється старший значущий біт на виході. Це значення потім віднімається з вхідного, і результат перевіряється на одну чверть опорного напруги.

Цей процес триває до тих пір, поки всі вихідні біти НЕ будуть встановлені або скинуті. АЦП послідовного наближення займає стільки тактів, скільки є вихідних бітів для конвертування.

Робота АЦП проста, коли перетворюється сигнал постійного струму. Але якщо вхідний сигнал змінюється більш ніж на один молодший значущий біт (LSB) протягом часу перетворення, АЦП видасть неправильний (або, принаймні, неточний) результат. Один із способів зменшити ці помилки - помістити фільтр нижніх частот перед АЦП. Параметри фільтра вибираються так, щоб вхід АЦП не змінився більш ніж на один молодший біт в циклі перетворення. Інший спосіб обробки змінюваних входів - додати схему вибірки і утримання перед АЦП [29].

В ідеальному світі конденсатор утримання не матиме витоків, а буферний підсилювач матиме нескінченний вхідний імпеданс, тому вихідний сигнал буде залишатися стабільним завжди. У реальному світі, проте, що утримує конденсатор протече, а вхідний імпеданс буферного підсилювача буде кінцевим, тому вихідний рівень буде повільно зміщуватися до землі в міру розрядки конденсатора.

Здатність схеми підтримувати вихід в режимі утримання залежить від якості утримує конденсатора, характеристик буферного підсилювача (в першу чергу вхідного опору) і якості перемикача (справжні електронні перемикачі). є деяка витік при відкритті). Величина дрейфу, демонстрована вихідним сигналом в режимі утримання, називається швидкістю зниження і вказується в мілівольтах в секунду, мілівольтах в мікросекунду або мікровольтах в мікросекунду.

Реальна ланцюг також має кінцеве вхідний опір [30], тому що електронний перемикач не ідеальний. Це означає, що в режимі вибірки утримує конденсатор заряджається через деякий опір. Це обмежує швидкість, з якою може отримати вхід. Час, протягом якого має залишатися в режимі вибірки, щоб отримати повномасштабний введення, називається часом збору і вказується в наносекундах або мікросекундах.

2.2 Математична модель швидкого перетворення Фур’є для цифрової обробки сигналів

Правильна вибірка даних постійно змінюється кількості, що описує виникнення природного процесу, призводить до більш простого еквівалентного подання. Це представлення складається з послідовності дискретних даних, яка більше підходить для математичної обробки та дозволяє зберігати важливу інформацію, що надається вихідним сигналом. Дискретні значення послідовності, отриманої шляхом вибірки, відрізняються одна від одної кінцевими величинами. В ідеальному випадку оригінальне зображення має бути ідеально реконструйоване шляхом зворотної процедури. Правила, яких слід дотримуватися для задоволення цієї основної умови, дуже прості, але вимагають розкладання сигналу на відповідний набір елементарних компонентів. Це може бути здійснено, застосувавши до послідовності алгоритм, який називається Дискретна перетворення Фур'є (DFT). Прямий результат перетворення складається з спектра сигналу, який можна проаналізувати багатьма способами. Математика, щоб змусити алгоритм FT працювати, врешті-решт, якомога швидше (FFT - швидка трансформація Фур’є), можливо, представляє менший інтерес для хіміків, і тут не лікуватимуться. Скоріше, мета - звернутися до читача про те, що FT дозволяє отримати.

Після того, як ми вирішимо зчитувати температуру термометром з заданими постійними інтервалами Δt, кожну хвилину, кожну годину чи кожен день, ми відбираємо вибірку Θ у незалежний змінний час. З наступного буде зрозуміло, наскільки важливою є операція вибірки[31].

Критерії правильного відбору проб є обов'язковими. Правильна вибірка означає підбір будь-яких суттєвих змін спостережуваної кількості: ми заповнюємо матрицю, що складається з двох стовпців (наприклад, часу, t і температури, Θ) і стільки ж рядків, скільки зроблено показань. Жодна змістовна зміна Θ з часом не втрачається лише в тому випадку, якщо вибірка проведена правильно.

З іншого боку, неправильна вибірка передбачає упущення інформації про те, що ми спостерігаємо стосовно події, що відбувається. Наприклад, ми можемо вибрати збір проб повітря на перехресті, щоб визначити вміст NO x за рахунок викидів автомобілів. Нехай відбір проб відбувається вручну щогодини, інтервал часу обумовлюється відсутністю датчика газу.

Наочний приклад того, як правильне відбір проб критичного питання може бути проілюстровано послідовностями малюнків.

У житті практичний приклад неправильного відбору зразків знаходимо у старомодних західних фільмах, де записані окремі фотографії (окремі зразки) фільму робляться з постійними часовими інтервалами, Δt, довші, ніж потрібно щоб уникнути зникнення: може статися так, що спиці на колесах вагона, здається, цікаво обертаються в протилежному сенсі стосовно до передбачуваного, виходячи з напрямку самого вагона. Аналогічний ефект можна спостерігати на відео пропелерів літака або лопатей вентилятора [32].

Умова, при якій послідовність знімків, зроблених з постійними інтервалами вибірки Δt, придатна для належного представлення процесу, виражається так званим критерієм Ніквістської виноски з точки зору Δt, TP та відповідними частотами v_{sampl} та v відповідно.

$$v = \frac{1}{Tp} \tag{2.3}$$

Аналогічно, співвідношення між інтервалом вибірки, Δt і відповідною частотою вибірки, ν вибірки, задається:

$$v_{sampl} = \frac{1}{\Delta t} \tag{2.4}$$

Критерій Найквіста виражає умову правильної вибірки, яка може бути записана в різних формах, що виражає однакові умови:

$$\Delta t < \frac{Tp}{2} \tag{2.5}$$

Підсумовування та інтегрування: T P, в секундах (іх), період - це час, необхідний функції синуса або косинуса для прийняття рівних значень у

наступних циклах, тобто час між двома однаковими положеннями голки. Період відбору проб Δt виражається в s і відповідає часу, що минув між двома наступними зразками, тобто у прикладі фільму, між двома наступними зображеннями. Частоти, ν і ν sampl, виражаються в s − 1 (також називається Герц, Гц). ν відповідає кількості максимумів синусоїди або косинусової функції за 1 с; у наведеному прикладі це відповідає круговій частоті, що є кількістю обертів голки за одиниці часу. Частота вибірки, ν sampl, відповідає тут кількості вибірок, тобто зображень, за с[33].

На Рис. 2.5 наведені приклади синусоїдальних функцій з різною частотою

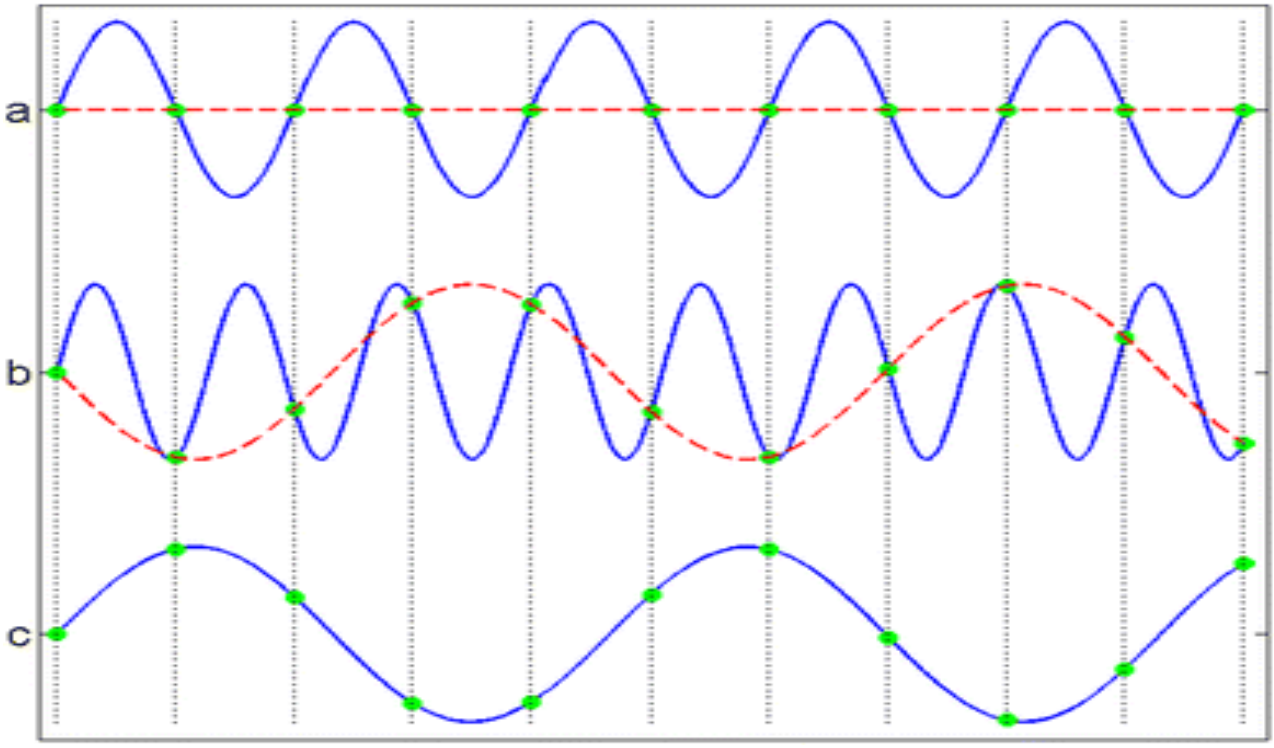


Рис 2.5 синусоїдальні функцій з різною частотою

Один і той же період вибірки для простих синусоїдів (сині лінії), що мають різні значення частоти. Відбір проб при

$$\Delta e = \frac{1}{2v}(a);\ \Delta t > \frac{1}{2v}(b);\ \Delta t < \frac{1}{2v}(c) \qquad (2.6)$$

Згладжування відбувається в (а) та в (б) (див. Червоний штриховий слід)

У складному періодичному сигналі більше окремих синусів і косинусів на різних частотах повинні бути підведені один до одного для обліку всього процесу.У відповідному описі нічого не втрачається, лише коли Δt нижчий за половину найкоротшого періоду, що відповідає найвищій частоті окремих сигналів. Синусоїдальні та косинусові функції називаються компонентами, які загалом описують загальну періодичну подію. Рівняння стають відповідно:

$$\Delta t < \frac{Tp_{min}}{2} \tag{2.7}$$

$$\Delta t < \frac{1}{2v_{max}} \tag{2.8}$$

де Tp_{min} і v_{max} посилаються на індивідуальний сигнал з найкоротшим періодом, що відповідає найбільшій частоті.

Зазначимо, що критерій Найквіста часто виражається безпосередньо з посиланням на сигнал, що складається з різних компонентів, у формі рівняння. (2.8). Звідси випливає, що визначення корисної нижньої межі частоти вибірки ν sampl є:

$$v_{sampl} > 2v_{max} \tag{2.9}$$

Вибірка аналогового сигналу реєстратора необхідна для отримання дискретних даних, тобто чисел, придатних для роботи з комп’ютером: комп'ютер - це цифровий пристрій Зноска 5, який маніпулює цифровими даними. Для правильного перетворення аналого-цифрового (АЦП) належна вибірка безперервного сигналу: комп’ютери повинні подаватися з векторами або послідовностями даних. Як приклад, на Рис. 2.6 показано, як суцільний сигнал, що становить хроматограму фактично відібрано, зберігається та відображається як послідовність дискретних даних.

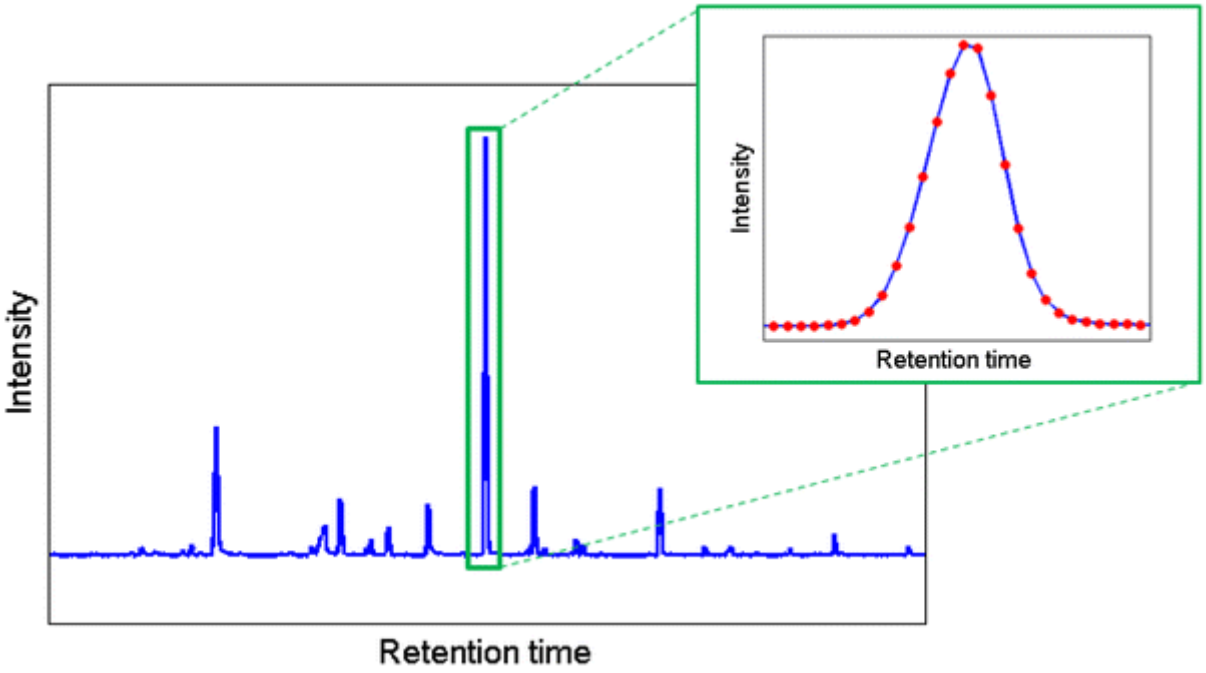


Рис 2.6 Суцільний сигнал як послідовність дискретних даних

Масштабування показує, як хроматографічний пік, зібраний аналоговим рекордером, може бути перетворений у послідовність дискретних даних (виділена червоним кольором). Вони можуть бути відображені як такі або інтерпольовані відповідним алгоритмом, щоб повернутись до безперервного сліду

Нагадуючи, що вихідний безперервний сигнал повинен бути реконструйований з послідовностей дискретних точок, отриманих шляхом вибірки, слід відкрити деякі практичні способи роботи. Намагаючись на хорошу реконструкцію безперервного сигналу за допомогою інтерполяції точок, що складають вибіркову послідовність, настійно доцільно дотримуватись загального правила, тобто підбирати 10 балів за кожен цикл найвищої частоти, присутній у сигналі. Це практичне правило, яке також називається «Теорема вибірки реального світу», передбачає запропоновану частоту вибірки, значно вищу, ніж мінімальне значення, визначене критерієм Найквіста. Дотримуючись цього вибору, кускова процедура інтерполяції, що складається з серії квадратичних або навіть лінійних рівнянь, поверне вихідний сигнал з досить хорошою точністю.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТА ЇЇ ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

3.1 Принцип побудови програмно-апаратного комплексу

Для конфігурації аналогового приймача який впроваджений в плату stm32F429ZI була обрано середовище CubeMX Рис 3.1 яка допомагає якісно і швидко налаштувати всі необхідні функції і задіяти всі необхідні ресурси мікроконтролера

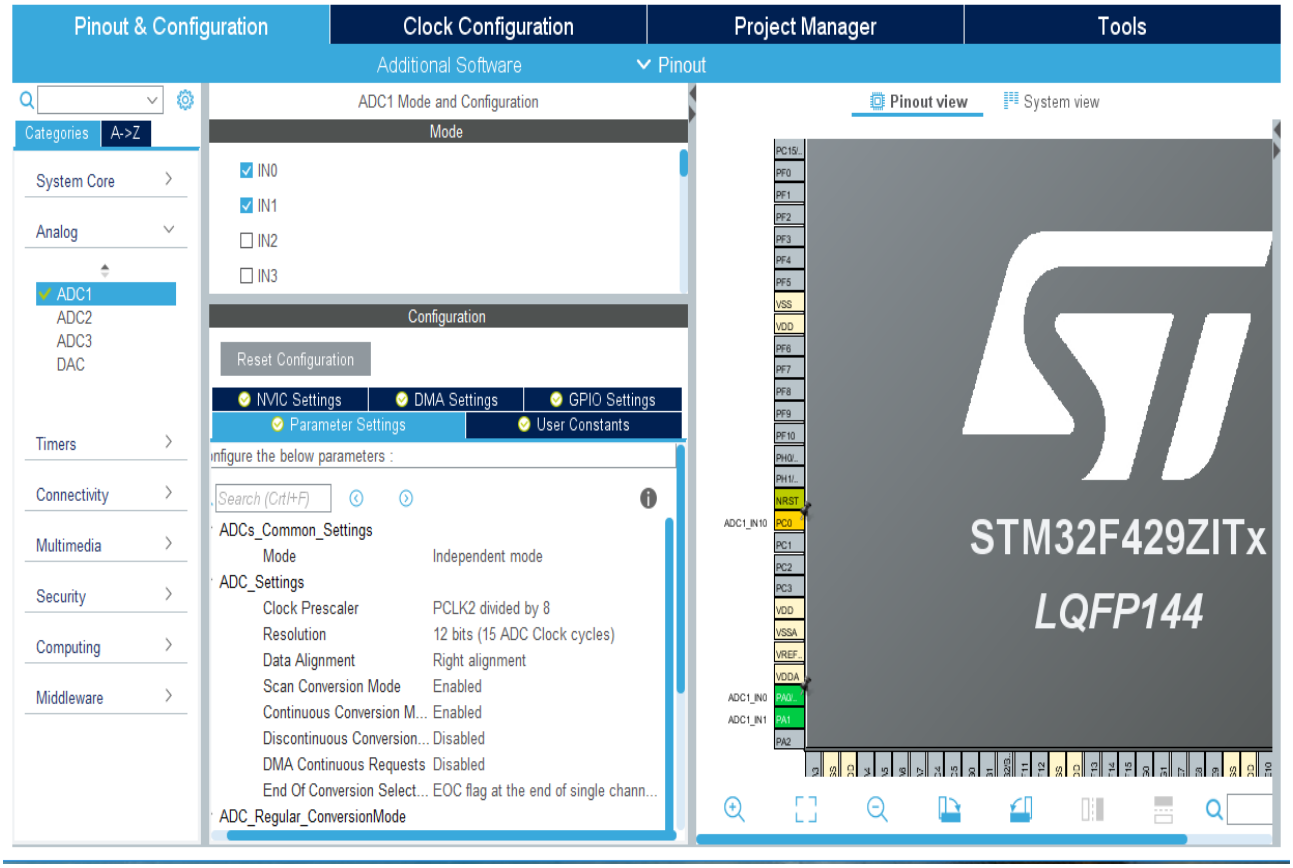


Рис 3.1 інтерфейс програми CubeMX

Нами були обрані і проініціалізовані як АЦП дві ноги які можу приймати аналоговий сигнал PA0 і PA1

Щоб кожен раз не запускати АЦП, були активовані режим циклічного читання каналів вирівнювання даних по лівому або правому краю. Оскільки АЦП 12-розрядний, а регістри 16-розрядні, то передбачена можливість вирівнювання результату вимірювання по лівому або по правому краю цих регістрів.

Так само для швидкості обробки результатів, так як у нас багатоканальний аналого-цифровий перетворювач ми були змушені підключити DMA

Оскільки ми хочемо скористатися декількома показаннями АЦП, щоб заповнити буфер без втручання процесора, тоді нам потрібно буде покластися на DMA. Один з найпростіших способів побачити DMA в дії - це використовувати його спільно з UART. Отже, ми створимо досить великий буфер, заповнений довільним текстом, і ми скажемо DMA, щоб надсилати ці дані, по одному байту, на периферію UART. Потім UART надсилатиме дані в нашу програму.

Для цього спочатку налаштуємо UART для виведення даних. Ми створимо наше повідомлення у вигляді довгого рядка в пам'яті, а потім налаштуємо нашу DMA для того, щоб читати це повідомлення, один байт по одному, на передавач UART. Алгоритм буде наступним: результат роботи АЦП буде копіюватися в масив за допомогою DMA. Після заповнення масиву буде відбуватися переривання від DMA і викликати колбек, в колбек робота з АЦП буде зупинятися, виводитися результат в UART і запускатися знову.

Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює аналоговий сигнал у цифрову форму, показану на Рис 3.2. Вбудована система використовує АЦП для збору інформації про зовнішній світ (система збору даних.) Вхідний сигнал є аналоговою напругою, а вихід - двійковим числом. Точність АЦП - це кількість відмінних входів АЦП (наприклад, 4096 альтернатив, 12 біт). Діапазон АЦП - це максимальний і мінімальний вхід АЦП (від 0 до + 3,3 В). Роздільна здатність АЦП - це найменша помітна зміна входу (наприклад, 3,3 В / 4095, що становить приблизно 0,81 мВ). Роздільна здатність - це зміна входу, яка призводить до зміни цифрового виходу на цифрове значення.

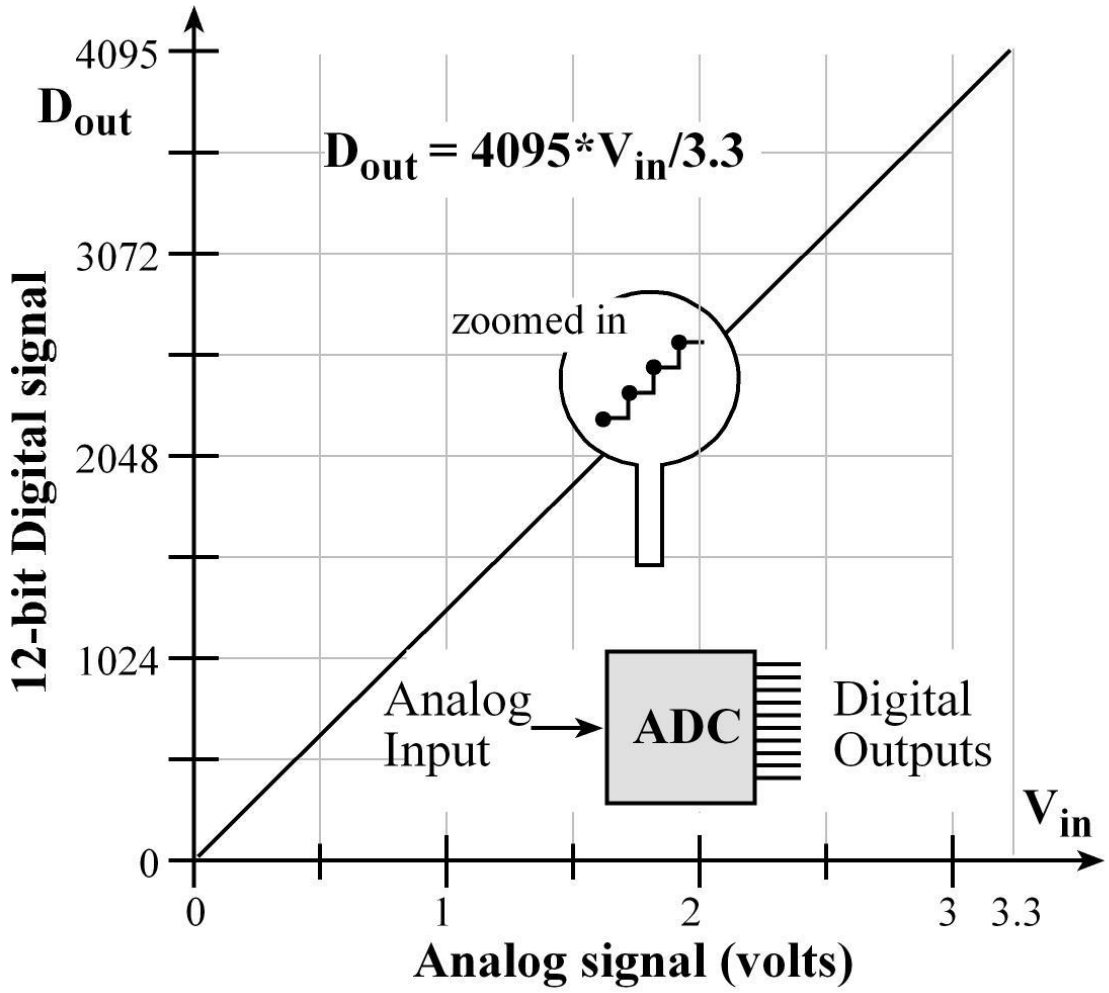


Рис 3.2 Перетворення аналогового сигналу у цифровий

Сполучення розробленого пристрою з комп'ютерною технікою відбувається за допомогою використання USB шини. Для цих цілей у пристрій введена мікросхема, що дозволяє реалізувати технологію віртуального COM-порту. Рис 3.2 При підключенні нашого пристрою до порту USB в операційній системі з'являється віртуальний послідовний порт, через який відбувається обмін інформацією між вимірювачем температури і високорівневим програмним забезпеченням.

Найпоширенішим методом перетворення АЦП є техніка послідовного наближення, як показано на малюнку. АЦП 12-бітного послідовного наближення згортається 12 разів. На кожен годинник визначається ще Найпоширенішим один біт, починаючи з найбільш значущого біта. На кожен годинник апаратне забезпечення послідовного наближення видає нові дані V_{dac}, встановлюючи біт для тесту на 1. Якщо V_{dac}, тепер вищий за невідомий вхід, v_{in}, то біт, що

перевіряється, очищається. Якщо V_{dac}, менший за v_{in}, то біт, який перевіряється, залишається 1. У цьому описі біт є цілим числом без підпису, яке визначає біт, який перевіряється. Для 12-бітового АЦП біт іде 2048, 1024, 512, 256, ..., 1. D_{out}- цифровий вихід ADC, а Z - двійковий вхід, що відповідає дійсності, якщо V_{dac}більший за v_{in}.

Для живлення всієї системи ми підключаємо USB 2.0 до мікросхеми через вхід VCC і подаємо напругу 5.0 V. Передаємо 2 сигнала для обміну даними між хостом (комп'ютером) і додатковим пристроєм. Ці сигнали DP і DM – це диференційна пара. Сигнал передається за нею у протифазі. Це дозволяє на приймальному кінці боротися з перешкодами.

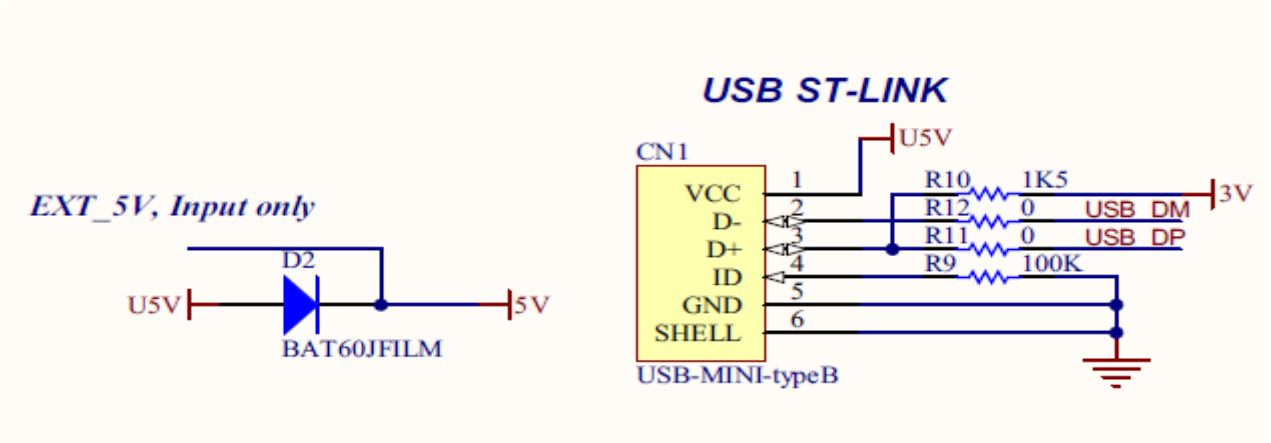


Рис 3.3 Сполучення мікросхеми FT232RL з USB портом

На ніжки PA1 і PA2 подаються аналогові сигнали, які у наслідку обробляються. Повну схему можна побачити на Рис 3.3

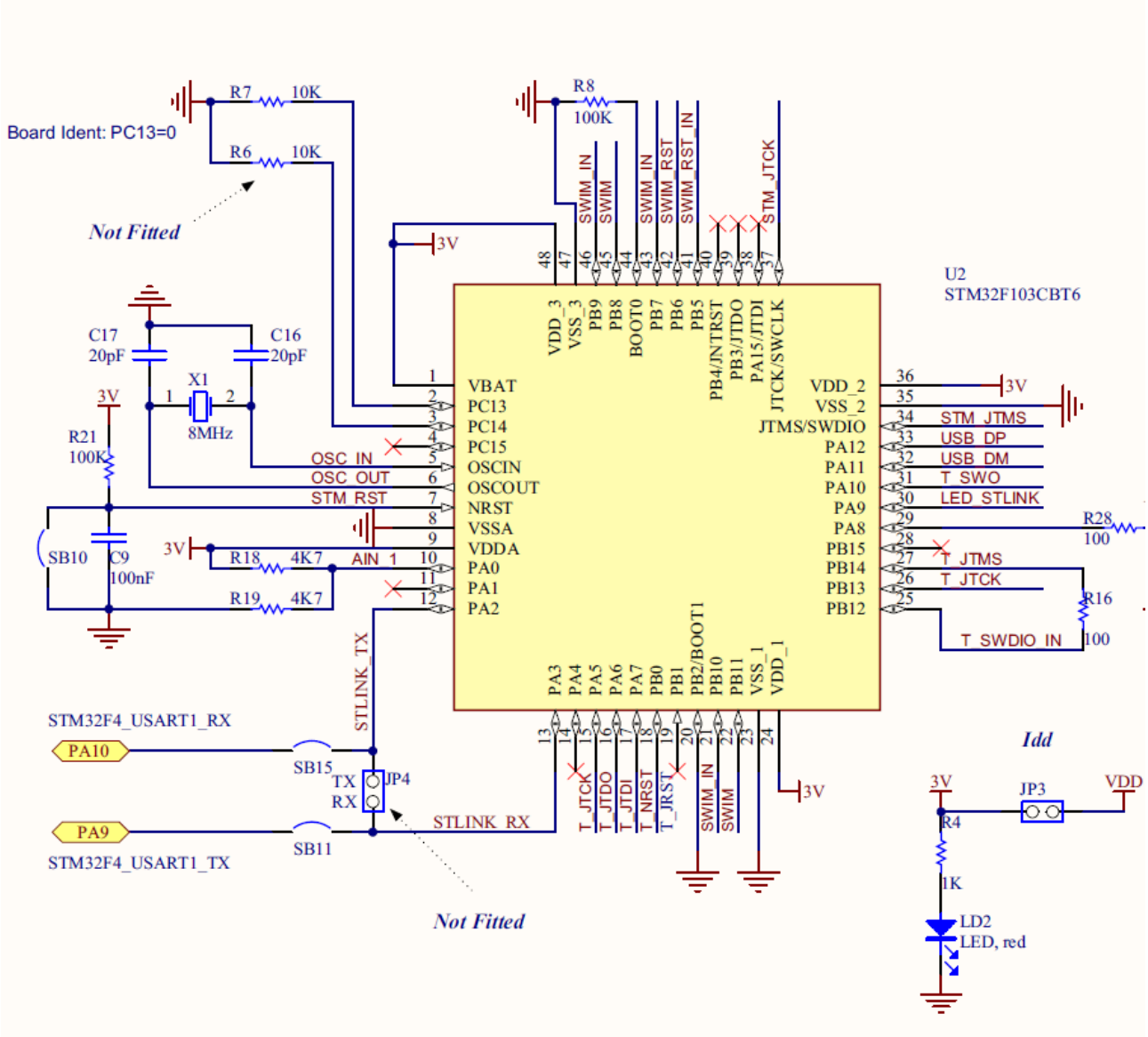


Рис 3.4 Повна схема

Блок живлення забезпечується або приймаючим ПК через USB-кабель, або зовнішнім Блок живлення 5 В Діоди D1 і D2 захищають 5 В і 3 В контактів від зовнішніх джерел живлення:

• 5В і 3 В можна використовувати як джерело живлення, якщо є інша плата додатків підключений до штифтів P1 і P2. У цьому випадку 5 В і 3 В штифти подають джерело живлення 5 В або 3 В і живлення витрата повинна бути нижче 100 мА.

• 5 В і 3 В можуть також використовуватися в якості джерела живлення, наприклад коли є роз'єми USB не підключено до ПК.У цьому випадку плата Discovery STM32F429 має живитись від блоку живлення або допоміжним обладнанням.

3.2 Розробка додаткового програмного забезпечення для обробки та демонстрації даних

Для швидкої і якісної розробки була вибрана мова C # і IDE Visual Studio

Для прийому сигналу з МК був використаний клас SerialPort який має широкий спектр можливостей по налаштування режимів прийому КОМ-порту Програма багатопоточна, що в свою чергу дозволяє безперешкодно використовувати графіку і змінять об'єкти відтворення даних в інтерфейсі. Так само для розробки програми був обраний метод Програмування на базі подій що в свою чергу дозволяє не втрачати час на очікування отримання інформації і спростити менеджмент ресурсів ПК. Інтерфейс програми можна побачити на Рис. 3.4.

Головними параметрами налаштування [35] є:

- Port name - це список, що випадає, в якому відображаються всі порти які задіяні в даний момент
- Baud rate - швидкість передачі даних
- Data bits - встановлює скільки біт даних буде представлено на один байт
- Patity - є методом виявлення помилок при передачі. Коли парність використовується з послідовним портом, з кожним символом даних надсилається додатковий біт даних, розташований так, що число 1 біт у кожному символі, включаючи біт парності, завжди непарне або завжди парне. Якщо байт отримано з неправильним числом 1s, він повинен бути пошкоджений. Однак парна перевірка парності може пройти парну кількість помилок.

- Stop Bits - Стоп-біти, що надсилаються в кінці кожного символу, дозволяють апарату приймаючого сигналу виявляти кінець символу та ресинхронізувати з потоком символів. Електронні пристрої зазвичай використовують один стоп-біт.

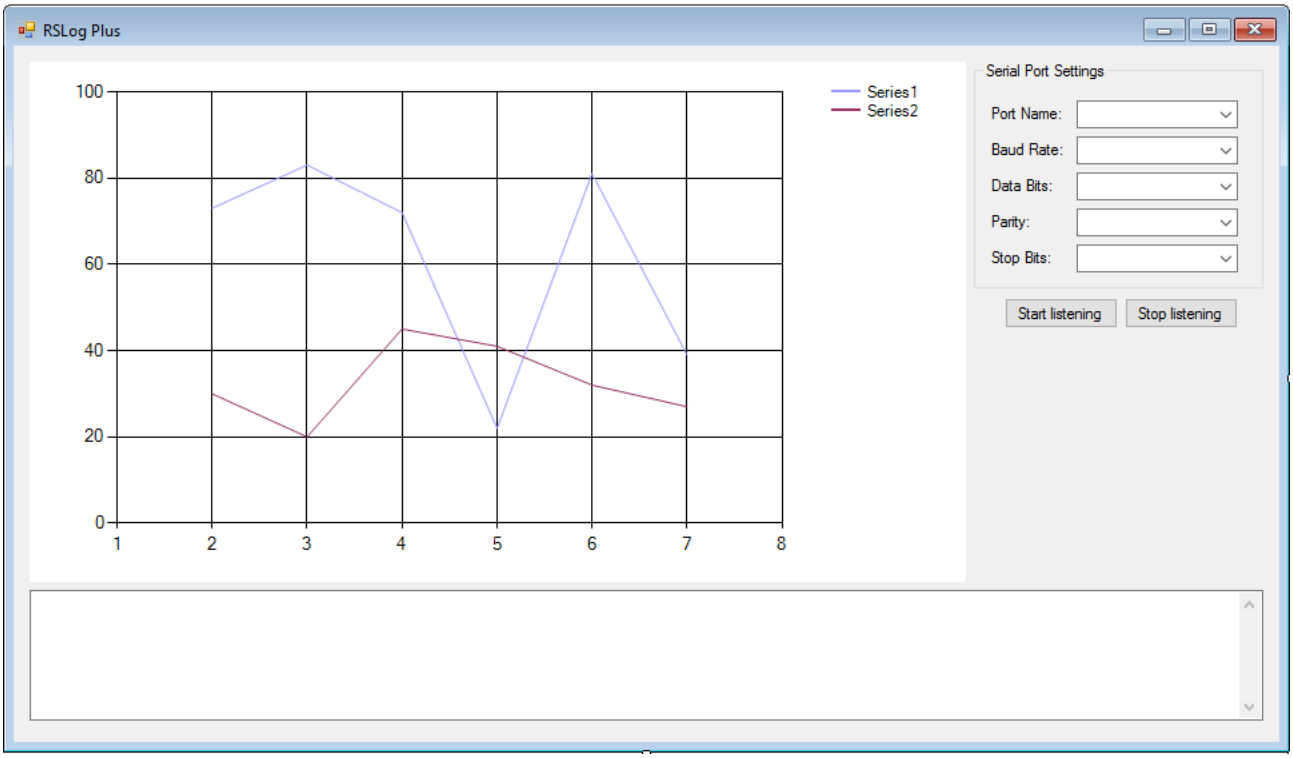


Рис 3.5 Розроблене програмне забезпечення для обробки даних

Для обробки інформації та її відтворення були додані два класи:

Для відтворення був доданий клас Chart який має широкий спектр налаштувань зовнішнього вигляду і дуже гнучкий в способах побудови графіка.

Область графіка постійно перемальовується, що у свою чергу дозволяє збирати та зберігати статистичні данні для подальшої обробки.

На даному малюнку зображені два вигнали, котрі обробляються та передаються по UART до пк.

Для виведення даних і статистики був доданий textbox.

На Рис 3.5 показана комунікація STM32F429ZI як АЦП і обробка даних з висновком в інтерфейс користувача на ПК

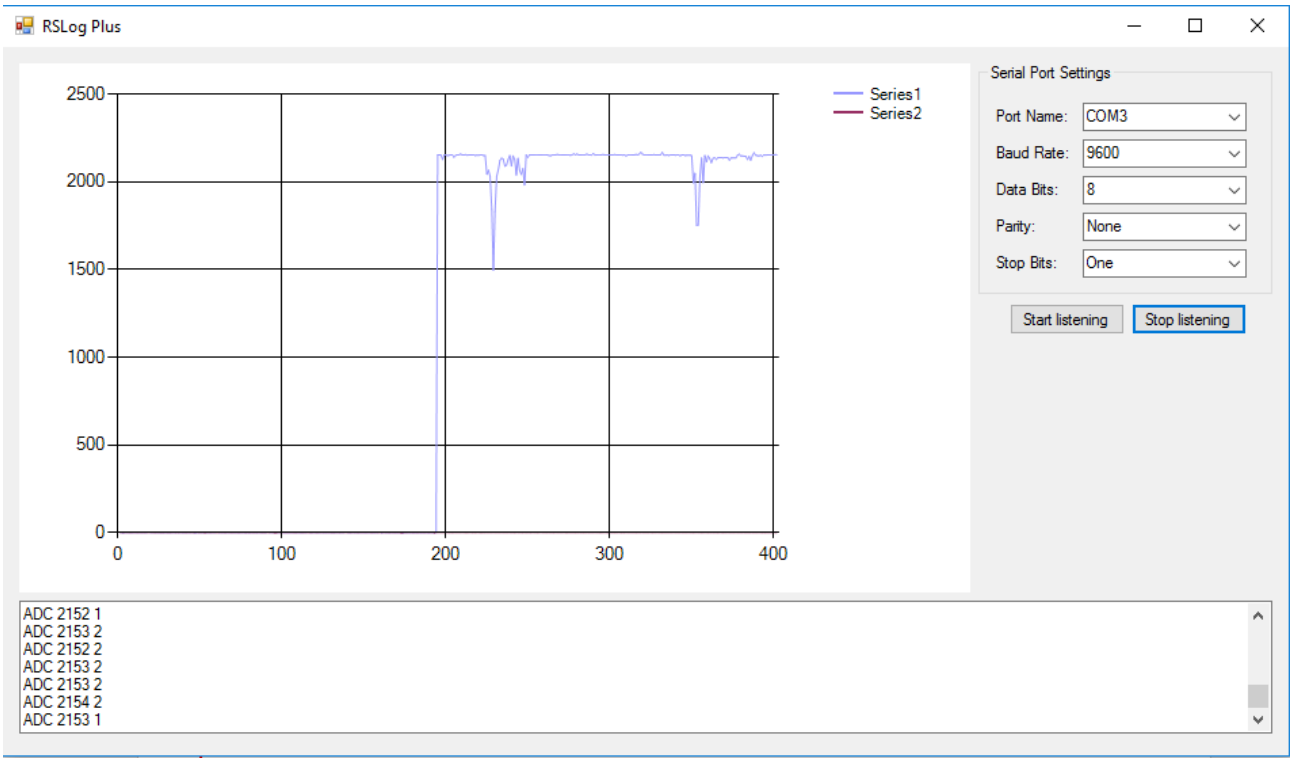


Рис 3.6 Приклад роботи розробленої високорівневої програми та АЦП

ВИСНОВКИ

- В ході виконання дипломної роботи розроблений програмно-апаратний комплекс для багатоканального оцифровування аналогових сигналів
- Програмне забезпечення мікроконтролера та програма на стороні персонального комп’ютера дозволють масштабувати вимірювальну систему, задіюючи від одного до восьми каналів АЦП.
- Розроблений АЦП має гнучкі налаштування для кожного із каналів: оператор має можливість скофігорувати у реальному часі період оцифровування, динамічний діапазон вхідних сигналів.
- Завдяки застосування алгоритмів швидкого перетворення Фур’є на кожному із каналів оператору доступні різноманітні цифрові фільтри для обробки оцифрованого синалу (фільтр низьких та високих частот, полосовий та режекторний фільтри)
- Система пройшла успішну практичну апробацію

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Ali Mazidi, Rolin Mckinlay, Janice Gillispie Mazidi: Microcontroller & Embeddeed Systems

[2] Burkhard Kainka: Microcontroller Basics, Tech Publications 2006

[3] Arun Netravali: Digital Pictures Representation and Compression (Applications of Communications Theory)

[4] Marcel J.M: Analog-to-Digital Conversion, July 24, 2010, Pelgrom

[5] Behzad Razavi: Principles of Data Conversion System Design 1995

[6] Rudy J. van de Plassche: CMOS Integrated Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters 1994

[7] Gabor C. Temes, Richard Schreier, and Shanthi Pavan: Understanding Delta-Sigma Data Converters 2005

[8] T. L. Singal: Analog and digital communication, 2012

[9] H. Ahmed: Analogue and digital electronics for engineers, 1984

[10] Jim Williams: Analog Circuit Design: A Tutorial Guide to Applications and Solutions 2011

[11] Кестер У: Аналого-цифровое преобразование, 2007, Техносфера

[12] Бахтиаров Г. Д., Малинин В. В., Школин В. П: Аналого-цифровые преобразователи. Проектирование электронной аппаратуры на интегральных микросхемах, 1980

[13] Глинкин Е.И., Глинкин М.Е.: Технология аналого-цифровых преобразователей, 2008

[14] Федорков Б. Г., Телец В. А: Микросхемы ЦАП и АЦП. Функционирование, параметры, применение, 1990

[15] Гнатек Ю. Р.: Справочник по цифроаналоговым и аналогоцифровым преобразователям, 1982

[16] Арбузов С.М., Соловьева Е.Б., Солонина А.И., Улахович Д.А.: Арбузов С.М., Соловьева Е.Б., Солонина А.И., Улахович Д.А., 2005

[17] Нуссбаумер *Г:* Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток, Радио и связь, 1985.

[18] Heideman M., Johnson D., Burrus C.: Gauss and the history of the fast fourier transform, October 1984, p. 14-21

[19] Блейхут Р: Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов, 1989

[20] Bracewell R: The Fourier Transform and Its Applications, 1986, 474 с. ISBN

[21] .А.В. Гарманов. Подключение измерительных приборов. Решение вопросов электросовместимости и помехозащиты на примере продукции Л-КАРД.// М., L-Card, 2003 г.2.А.В.

[22] Гарманов. Требования к источникам сигналов АЦП с входным динамическим коммутатором каналов в многоканальном режиме// М., L-Card, 2005 г.3.

[23] Синфазный помехоподавляющий фильтр LTR-CMF. Руководство пользователя.

[24].“Терминология”–Раздел сайта ООО“Л Кард”.

[25] Kester W. Add Noise Dither to Blow Out ADCs' Dynamic Range. Electronic Design, Analog Applications Supplement, November 22, 1999.

[26] Jung W. Wideband Noise Generator. Ideas for Design, Electronic Design, October 1, 1996.

[27] Analog to Digital Conversion, Data Acquisition and Control [Електронний ресурс]. URL: http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Volume1/E-Book/C14_ADCdataAcquisition.htm

[28] Юрий Магда: Программирование и отладка C/C++ приложений для микроконтроллеров ARM, 2017, ДМК Пресс

[29] Reference manual [Електронний ресурс] URL: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html#resource

[30] В.Б. Топильский. 2006. Схемотехника измерительных устройств. Лаборатория Базовых Знаний, 2006

[31] TPS73233 Техническая документация [Електронний ресурс] URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps732.pdf.

[32] MLX90614 Техническая документация [Електронний ресурс] http://kazus.ru/datasheets/pdf-data/5408616/ETC/MLX90614.html.

[33] К. Тавернье. PIC – микроконтроллеры. Практика применения/ Пер. с франц. – М. ДМК Пресс, 2003. – 272с.

[34] Ю.А. Шпак. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров. Пресс

[35] NET API browser [Електронний ресурс] URL: https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/api/