

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри
Дмитро ТАТАРЧУК

«__» _____ 2024 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»**

на тему: «Лабораторний модуль введення та виведення з інтерфейсом USB»

Виконав:

студент IV курсу, групи ДП-02

Бардакова Вероніка Віталіївна _____

Керівник: доц.каф.МЕ, к.ф.-м.н.,

Заворотний Віктор Федорович _____

Консультант з нормоконтролю: доц.каф.МЕ, к.ф.-м.н., с.н.с.,

Свечніков Георгій Сергійович _____

Консультант з інформаційних питань: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.,

Діденко Юрій Вікторович _____

Рецензент: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.,

Казміренко Віктор Анатолійович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроніки

Кафедра мікроелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Освітньо-професійна програма «Мікро- та наноелектроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Бардаковій Вероніці Віталіївні

1. Тема роботи «Лабораторний модуль введення та виведення з інтерфейсом USB», керівник роботи Заворотний Віктор Федорович, доц.каф.МЕ, к.ф-м.н, затверджені наказом по університету від «__» _____ 2024 р. № _____

2. Термін подання студентом роботи

—

3. Вихідні дані на Пристрій для введення і виведення аналогових та цифрових сигналів, оцифровування та передачі даних по інтерфейсу USB

- Кількість аналогових/цифрових входів - 8
- Кількість аналогових/цифрових виходів - 8
- Напруга живлення пристрою 3-5 В
- Вхідна аналогова напруга 100мВ-3В
- Вхідний опір >10МОм
- Вихідна напруга 0-5В

4.Зміст роботи

1) Зробити короткий літературний огляд лабораторних модулів вводу/виводу інформації в персональний комп'ютер для подальшої обробки. Провести аналіз характеристик модулів вводу-виводу.

2) Ознайомитись з роботою інтерфейсу USB

3) Розглянути роботу системи на кристалі PSoC™ з вбудованими підсилювачами, АЦП, ЦАП та комунікаційними блоками USB, вибрати модель мікросхеми PSoC для даної задачі.

4) Розробити блок-схему модуля вводу аналогових сигналів з датчиків в мікропроцесорну систему на основі модулів PSoC.

5) Розробити алгоритм роботи мікропроцесорного керування оцифровування аналогових сигналів та передачі даних по інтерфейсу USB.

5. Дата видачі завдання 15.04.2024

Студент

Бардакова Вероніка

Керівник

Заворотний Віктор

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота присвячена розробці лабораторного модуля введення та виведення з інтерфейсом USB.

Метою розробки є створення недорогого пристрою вводу-виводу аналогової і цифрової інформації, котрий може задовільнити широкий спектр задач по лабораторним дослідженням, автоматизації експерименту, а саме: підсилення, фільтрації аналогових сигналів, оцифрування, виводу керуючих сигналів для управління процесами та архівації зібраних даних на персональному комп'ютері (ПК).

В ході роботи було використано достатньо джерел для поглибленого вивчення роботи модулів введення-виведення, інтерфейса USB. Було розглянуто роботу системи на кристалі PSoC™ з вбудованими аналоговими та цифровими програмованими модулями та модулем USB.

Загальний обсяг роботи – 57 сторінок, 20 рисунків, 2 таблиць, 11 бібліографічних найменувань.

ABSTRACT

The thesis is devoted to the development and research of a laboratory input and output module with a USB interface. The creation of an affordable input-output device for analog and digital information, which can satisfy a wide range of tasks in laboratory research and experiment automation, is an urgent task, the solution of which can satisfy the needs, first of all, of young researchers.

The goal of the development is to create an inexpensive input-output device for analog and digital information, which can satisfy a wide range of tasks in laboratory research, experiment automation, namely: amplification, filtering of analog signals, digitization, output of control signals for process control and archiving of collected data on a personal computer.

In the course of the work, sufficient sources were used for an in-depth study of the work of input-output modules, the USB interface. The operation of a PSoC™ system with integrated analog and digital programmable modules and a USB module was considered.

The total volume of the work – 61. of pages, 20 of figures, 2 of tables, 11 bibliographic entries.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – Аналого-цифровий перетворювач

ПЛК - Програмований логічний контролер

ЦАП - Цифро-аналоговий перетворювач

ОП - операційного підсилювача

USB - Universal Serial Bus, універсальна послідовна шина

SMP - Symmetric Multiprocessing, симетричне
мультипроцесування

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	8
1. Основні параметри, функції, структура введення/виведення.....	10
1.1 Особливості сучасних модулів введення/виведення	10
1.2 Структура модулів введення.....	11
1.3 Модулі введення струму і напруги.....	13
1.4 Структура типового модуля виведення аналогових сигналів	16
1.5 Реальні модулі для обробки аналогових сигналів	20
1.6 Цифрові інтерфейси введення вимірювальної інформації	21
1.7 Висновок до розділу 1	22
2. Властивості та функції інтерфейсу USB.....	23
2.1 Архітектура USB.....	23
2.2 Канали: підключення кінцевих точок до хосту.....	35
2.3 Види передач	37
2.4 Масові передачі.....	40
3. Програмовані системи на кристалі PSoC	42
3.1 Історія PSoC.....	42
3.2 Переваги технології та сфери застосування.....	47
4. Основні характеристики PSoC5 та середовище розробки.....	47
4.1 Мікроконтролери PSoC: Потужні можливості для проектування з низьким енергоспоживанням	47
4.2 Середовище розробки схеми та коду мікросхеми PSoC Creator	49
5. Проектування пристрою	51
5.1. Проектування апаратної та програмної частини пристрою введення-виведення з використанням мікросхеми PSoC від Cypress	51
5.2. Розробка схеми аналогової частини PSoC. Базові схеми пристрою ВВ.....	54
5.3. Розробка цифрової частини. Процедура ініціалізації та роботи модуля введення-виведення через USB на мікросхемі PSoC.	57
ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ.....	58
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	60

ВСТУП

Пристрій введення\виведення (ВВ) служить для вводу і виводу аналогових та цифрових сигналів на або з комп'ютера, або іншу систему збору, обробки та передачі даних. Такий пристрій має бути обладнаний відповідними інтерфейсами (для аналогових сигналів - з функціями підсилення, попередньої фільтрації, оцифровування, цифро-аналогового перетворення) і бути сумісним зі спеціальним ПЗ.

Контроль та управління складними інформаційно - вимірювальними та технологічними процесами забезпечується шляхом аналізу досить значної кількості параметрів цих процесів. На практиці ця кількість коливається від декількох одиниць до декількох сотень, в залежності від типу процесу.

Більшість процесів дозволяє зняти інформацію про їх параметри в автоматичному режимі за допомогою так званих первинних перетворювачів інформації.

Як правило, первинний перетворювач інформації у якості вхідного сигналу має фізичні величини, що характеризують процес, такі, наприклад, як температура, тиск, вологість, швидкість і таке інше. Вихідний сигнал формується у вигляді струму, напруги або частоти. Він додатково характеризується такими параметрами, як динамічний діапазон зміни сигналу та ширини смуги частотного спектру.

Сучасні високопродуктивні пристрої введення, виведення та цифрової обробки інформації конструктивно виконуються у вигляді модулів введення аналогової інформації для створення комплексів на базі комп'ютерів.

До складу таких модулів входять аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), автоматичні перемикачі діапазонів, буферні підсилювачі, цифрові фільтри, пристрої вибірки-зберігання, системи автоматичного підстроювання тощо. Всі сучасні АЦП мають у своєму складі також інтерфейсні елементи (буферні регістри, дешифратори адреса), що робить їх сумісними з мікропроцесорними системами.

Мета розробки – створення недорогого пристрою введення-виведення аналогової і цифрової інформації, котрий може задовільнити широкий спектр задач по лабораторним дослідженням, автоматизації експерименту, а саме: підсилення, фільтрації аналогових сигналів, оцифрування, виводу керуючих сигналів для управління процесами та архівації зібраних даних на персональному комп'ютері (ПК).

Автоматизація лабораторних досліджень стає все більш актуальною з кількох причин: збільшення продуктивності та ефективності (автоматизовані системи можуть виконувати завдання значно швидше та точніше), покращення якості даних (автоматизовані системи збору та аналізу даних можуть забезпечити більш високий рівень точності), зниження витрат, зростання доступності даних.

В цілому, автоматизація лабораторних досліджень має багато переваг, які роблять її все більш актуальною для лабораторій будь-якого розміру.

Необхідним елементом автоматизації є пристрій для вводу аналогових та цифрових сигналів для подальшої обробки в персональному комп'ютері і виводу керуючих сигналів із персонального комп'ютера для управління лабораторними дослідженнями.

Особливість лабораторних пошукових досліджень полягає в тому, що таким дослідженням притаманна різноманітність джерел сигналу (сенсорів), різноманітність планів експерименту, часто з нечітко визначеними вимогами чи схемою вимірювань, котрі в процесі досліджень можуть змінюватись.

Це накладає додаткові вимоги до пристрою, щоб перекрити широкий діапазон амплітуд та спектрів можливих сигналів та різноманіття вимірювальних схем, а саме вимоги до можливості змінювати параметри пристрою введення в широкому діапазоні (наприклад, тип АЦП, розрядність, частота відліків, коефіцієнти підсилення сигналів, попередня фільтрація сигналів), можливість

змінювати компоненти і схему вимірювань та контролю програмним способом, підвищені вимоги до точності та частоти вибірки сигналів. Ще суттєвою вимогою до пристрою має бути простота його використання сумісно з ПК (інтерфейс USB) і доступність для широкого кола дослідників.

1. Основні параметри, функції, структура введення/виведення

1.1 Особливості сучасних модулів введення/виведення

На ранніх етапах розвитку комп'ютерів задача вводу-виводу в/з комп'ютера вирішувалась, шляхом, встановленням спеціалізованої плати в стаціонарний комп'ютер. Це був найпростіший спосіб підключення периферійних пристроїв. У складніших ситуаціях, коли ліній під'єднання було багато і роз'єми не вміщалися безпосередньо на платі, використовували спеціальні кабелі розширення Breakout Cable (як це робиться і зараз) або навіть зовнішні блоки Breakout Box, коли під'єднань і їхніх типів було дуже багато.

Окрім прямого призначення, Breakout Box часто оснащувався додатковими функціями, наприклад, перетворення стандартів. Ці підходи існують і сьогодні з одним серйозним доповненням. Поява ноутбуків, які не мають слотів для встановлення спеціалізованих плат, спричинило потребу в зовнішніх пристроях введення-виведення. [1]

Працюючи на ноутбуці, потрібен зовнішній пристрій вводу-виводу, який під'єднується через USB або будь-який інший сумісний порт. Такі пристрої можна використовувати і зі стаціонарними комп'ютерами.

Зовнішні пристрої дають більше гнучкості, їх можна використовувати для роботи з різними системами та пристроями. Вибір конкретного типу пристрою визначається характером роботи, типом комп'ютера тощо. У системах на основі ноутбука може застосовуватися тільки зовнішній пристрій. Зовнішній блок введення-виведення знадобиться і в разі, коли є кілька стаціонарних комп'ютерів, завантажувати і вивантажувати матеріал у які потрібно хоч і не часто, але

регулярно. Тоді є сенс мати один зовнішній пристрій введення-виведення, який під'єднується за потреби до відповідного комп'ютера.

В свою чергу внутрішні плати не займають місця на столі, мають істотно меншу небезпеку втрати контакту в з'єднаннях, а також менше ризику просто забути пристрій під час частих змін локації.

При виборі конкретної моделі, важливо звернути увагу на сумісність портів підключення на пристрої та вашому комп'ютері - чи то USB, Thunderbolt, чи то PCIe. Якщо всі USB будуть зайняті зовнішніми дисками, то може краще використовувати внутрішню плату. І, звісно, пристрій має підтримувати ті сигнали, які приходять до комп'ютера.

1.2 Структура модулів введення

У промисловості є багато різних сенсорів, кожен з яких вимірює різні фізичні явища. Для кожного сенсора потрібен пристрій, який може зчитувати його дані. Щоб зменшити кількість різних пристроїв, використовують спеціальні перетворювачі, які перетворюють вимірювання сенсора у стандартні електричні сигнали.

Завдяки стандартам можна створити один універсальний пристрій, який підходить для різних сенсорів. Проте для деяких сенсорів, таких як термопари та термоперетворювачі опору, ці перетворювачі вбудовують прямо у модулі, що читають їхні сигнали. Тому, окрім універсальних модулів, також є спеціалізовані модулі для таких сенсорів.

Сучасні модулі введення аналогових сигналів ґрунтуються на АЦП (аналого-цифровий перетворювач), який може приймати декілька (зазвичай 8 або 16) сигналів. Для підключення джерел сигналу використовується аналоговий комутатор на МОП-транзисторах, що дозволяє вводити сигнали послідовно або одночасно (в залежності від модуля). [1]

Для кращого захисту від перешкод модулі використовують диференціальні входи, які можна програмно налаштувати як диференціальні або поодинокі.

Вхідні ланцюги потребують захисту від статичної електрики, перенапруги та зміни полярності. Захист забезпечують спеціальні мікросхеми з МОП-транзисторним ключем, який розмикається при перевищенні допустимої напруги.

Важливо, щоб опір відкритого ключа не впливав на результат вимірювання. Для цього ключ використовується або для передачі потенціалу (коли струм через ключ малий), або для передачі струму (коли інформація переноситься у формі струму, і падіння напруги на ключі не впливає на сигнал).

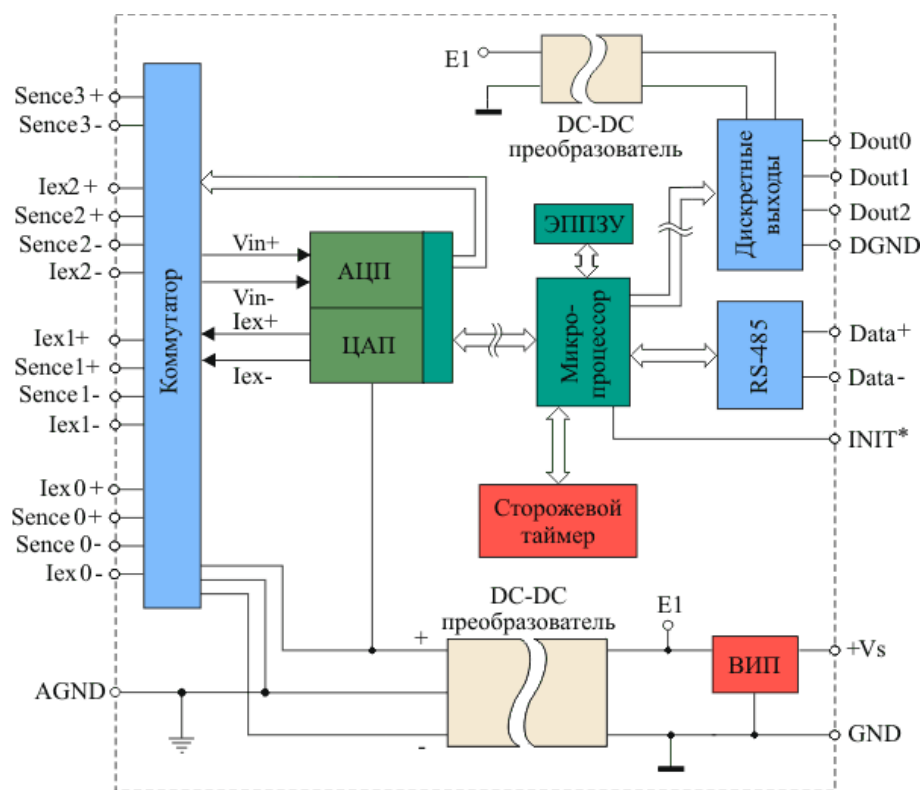


Рис 1.1 - Структура модуля для введення сигналів термоперетворювачів опору [1]

Комутація вхідних ключів модуля здійснюється програмою, що виконується мікроконтролером. Це дозволяє використовувати мікроконтролер,

який вже входить до складу деяких АЦП, що зменшує кількість каналів гальванічної розв'язки між аналоговими входами та портом RS-485.

Мікропроцесор модуля виконує такі функції:

- Реалізація протоколу обміну з ПЛК.
- Виконання команд ПЛК.
- Автоматичне калібрування.
- Діагностика обривів або коротких замикань в ланцюзі датчика.
- Перетворення форматів даних.
- Налаштування швидкості обміну з ПЛК.

У ЕППЗУ модуля зберігаються калібрувальні коефіцієнти, адреса модуля, програма та таблиці лінеаризації характеристик датчиків. Сторожовий таймер перезавантажує мікроконтролер у разі його зависання.

Модуль введення (Рис 1.1) має канали виведення дискретних сигналів, що дозволяє реалізувати на ньому ПІД-регулятор з ШІМ-управлінням виконавчим пристроєм.

Внутрішній стабілізатор напруги живить всі вузли модуля. Зовнішнє живлення може подаватися в широкому діапазоні напруг, зазвичай від 10 до 30 В. Це корисно в розподілених системах, де модулі можуть знаходитися на значній відстані один від одного, що призводить до падіння напруги на проводах живлення до 10...20 В.[1]

Ланцюги живлення модулів захищені від неправильної полярності та перевищення допустимої напруги живлення. Захист ґрунтується на діодах, стабілітронах, позисторах та плавких запобіжниках.

1.3 Модулі введення струму і напруги

Потенційні входи модулів введення (Рис 1.2) використовуються для вимірювання напруги. Ідеальний потенційний вхід має нескінченно великий опір та нульову ємність, щоб не впливати на динамічні та статичні характеристики вимірюваного ланцюга.

Однак в реальних умовах внутрішній опір джерела сигналу (R_{i1}) та опір відкритого ключа (R_{k1}) утворюють дільник напруги з вхідним опором R_1 на постійному струмі та ємністю C_1 в динамічному режимі (Рис. 1.2). Це призводить до того, що повний вхідний опір модуля введення вносить методичну мультиплікативну похибку до результатів вимірювання.

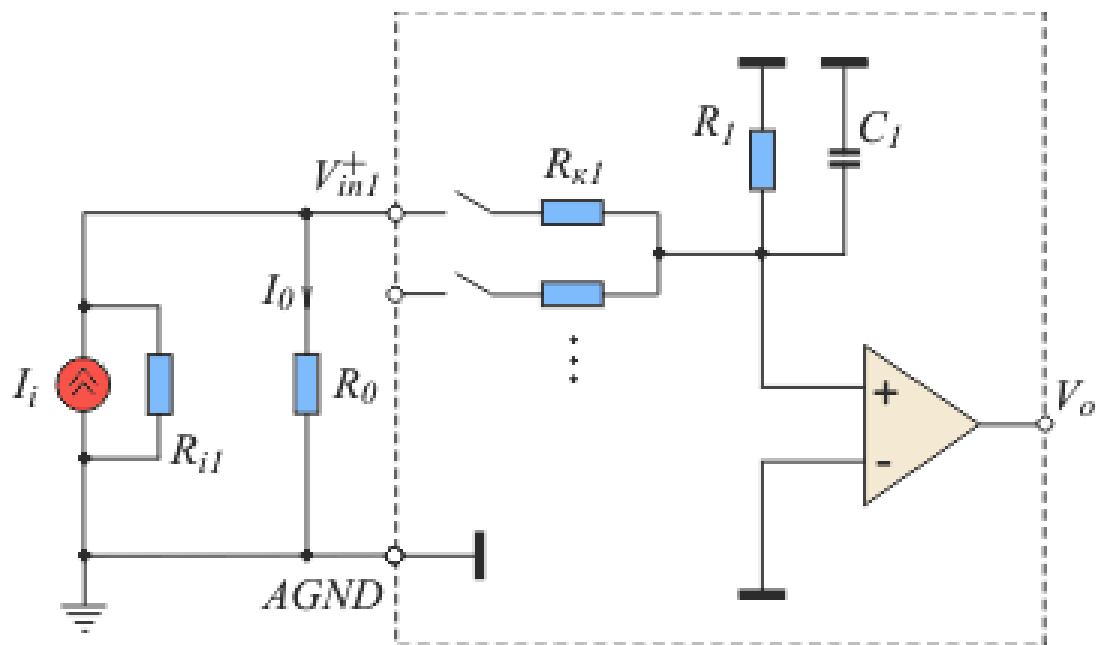


Рис - 1.2 Потенційні входи модулів введення (одиначний) [1]

Типові значення вхідних параметрів модуля введення становлять $R_{k1} \approx 200\text{Ом}$, $R_n \approx 20\text{МОм}$, $C_1 \approx 1\text{нФ}$. Щоб методична похибка не перевищувала 0,01%, опір джерела сигналу не повинен бути вище 2 кОм

Проте, оскільки вказана похибка не залежить від напруги джерела сигналу, її можна компенсувати в контролері або модулі введення.

Опори і ємність, показані на рис. 1.3 а, утворюють фільтр низької частоти першого порядку з постійною часу $T \approx (R_{i1} + R_{k1})C_1 \approx 1,2\text{мкс}$ при $R_{i1} \approx 2\text{кОм}$,

$C_1 \approx 1\text{нФ}$, $R_{k1} \approx 200\text{Ом}$ (вважаємо, що $R_1 \gg R_{i1} + R_{k1}$), який вносить також динамічну похибку до результатів вимірювання. Динамічна похибка залежить від форми вхідного сигналу.[2]

Для зменшення похибки вимірювання рекомендується збільшувати вхідні опори (R_1 та R_2) та зменшувати ємності (C_1 та C_2).

Однак в схемі з диференціальним включенням збільшення R_1 , R_2 та зменшення C_1 , C_2 призводить до зростання ємнісного наведення та синфазної перешкоди. Синфазна перешкода може бути настільки сильною, що призведе до виходу напруги на входах операційного підсилювача за межі його динамічного діапазону. Тому при роботі з диференціальними входами важливо дотримуватися правила виконання сигнального заземлення.[2]

Струмові входи модулів введення призначені для вимірювання величини струму, наприклад, стандартного сигналу ($4 \div 20$ мА). Перетворення струму в напругу виконується за допомогою резистора (125, 250 або 500Ом), максимальне падіння напруги (2,5; 5 або 10В). Для подальшого введення в контролер отриманої напруги використовується модуль з диференціальним або одиночним входом. Вимірювальні резистори можуть бути встановлені зовні модуля введення (на його вхідних клеммах) так і всередині нього.

Якщо використовуються прецизійні вимірювальні резистори, то для отримання точних даних достатньо відкалібрувати модуль лише в режимі введення напруги.

При застосуванні резисторів з низькою точністю їх похибку можна компенсувати, виконавши калібрування модуля разом з вимірювальним резистором в режимі вимірювання струму.

Важливо зазначити, що таке калібрування потребує окремого налаштування для кожного каналу. Якщо модуль не підтримує індивідуальне калібрування каналів, формулу для внесення поправок та її коефіцієнти можна зберегти на сервері або у флеш-пам'яті ПЛК.

При використанні діапазону струмів $0 \dots 20$ мА струм перетвориться в напругу за формулою $V_0 = R_0 I_i$, для діапазону $4 \dots 20$ мА - за формулою

$V_0 = \frac{20 \text{ мА}}{16 \text{ мА}} R_0 (I_i - 4 \text{ мА})$ (рис. 1.3). При цьому току 4 мА відповідає вихідний сигнал, рівний нулю. Зсув рівня нуля на 4 мА необхідно для забезпечення можливості діагностування обриву в ланцюзі сенсора.[2]

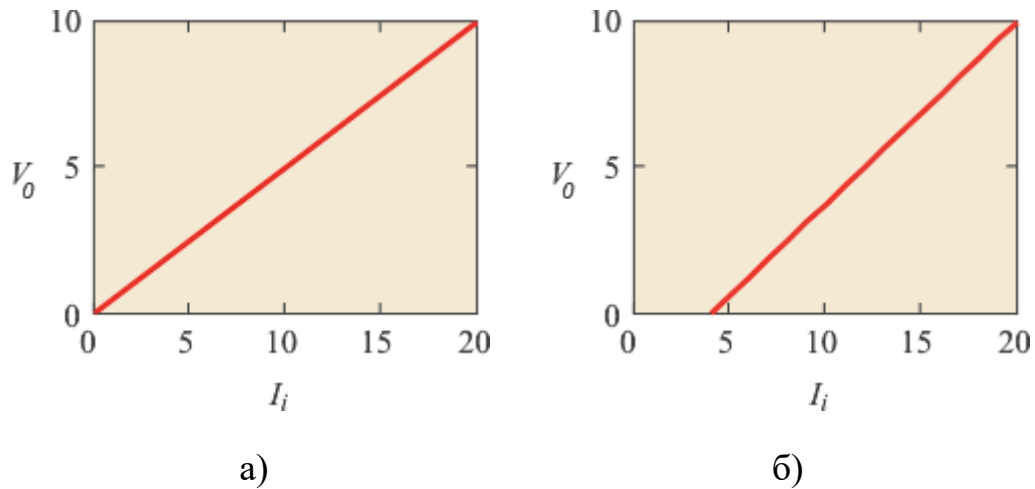


Рис 1.3 - Перетворення струму в вихідний сигнал для діапазону 0 ... 20 мА (а) і 4 ... 20 мА (б) [2]

Вивід аналогових сигналів

Модулі аналогового виводу слугують для перетворення цифрової інформації з комп'ютера або контролера в аналоговий формат. На виході модулів аналогового виводу можна отримати сигнали у вигляді стандартних значень струму ($0 \div 20 \text{ мА}$ і $4 \div 20 \text{ мА}$) або напруги ($0,5 \text{ В}$, $\pm 10 \text{ В}$). Основне призначення модулів аналогового виводу - керування виконавчими пристроями, що мають аналогові входи управління. Однак їх також можна використовувати в вимірювальних системах, для проведення електрофізичних досліджень або в складі випробувальних стендів.[2]

1.4 Структура типового модуля виведення аналогових сигналів

Модулі аналогового виводу отримують інформацію з керуючого контролера або комп'ютера зазвичай через інтерфейс RS-485. Деякі модулі можуть використовувати інші послідовні або паралельні інтерфейси.

Важливою характеристикою модулів аналогового виводу є гальванічна ізоляція аналогової вихідної частини модуля від цифрової частини, що включає мікропроцесор. Це захищає контролер або комп'ютер від пошкоджень.

Модуль управляється командами, що посиляються за допомогою стандартного протоколу, наприклад Modbus RTU або DCON.

Для правильного застосування модулів аналогового виведення важливо розуміти схему вихідного каскаду.

Вивід напруг здійснюється за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) і операційного підсилювача (ОП). Завдяки глибокому зворотному зв'язку вихідний опір ОП на постійному струмі становить соті частки ома, що дозволяє з високою точністю вважати його ідеальним джерелом напруги. Для захисту модуля від перевантаження по виходу використовуються ОП із захистом.

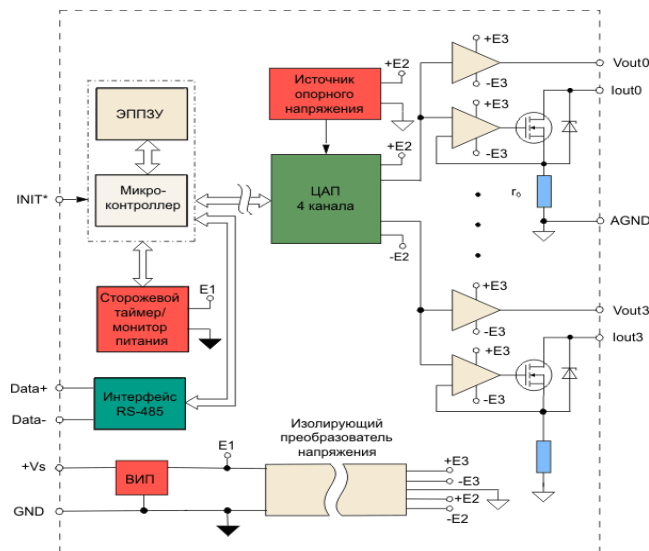


Рис 1.4 - Структурна схема модуля виведення аналогових сигналів.[2]

Внаслідок частотної залежності коефіцієнта посилення модуль вихідного опору каскаду на ОП $r_{\text{вих}}(f)$ залежить від частоти:

$$r_{\text{вих}}(f) = \frac{r_0 f_0}{K_0 f} \quad (1)$$

де f - частота, на якій знаходиться вихідний опір; r_0 - це вихідний опір ОП без зворотного зв'язку; f_1 - частота одиничного посилення ОП, яка рівна 1 МГц; K_0 - коефіцієнт підсилення ОП на постійному струмі. Наведений вираз справедливий з похибкою близько 10% при $f_0 < f < 10 f_1$, де $f_0 \approx f_1 K_0$ - гранична частота ОП без зворотного зв'язку за рівнем 0,702. Наприклад, при значеннях $r_0 = 100 \text{ Ом}$, $f_1 = 1 \text{ МГц}$; $K_0 = 10^5$ отримаємо $r_{\text{вих}} = 10 \text{ Ом}$ на постійному струмі, але $r_{\text{вих}} = 1 \text{ Ом}$ на частоті 1 КГц і $0,1 \text{ Ом}$ на частоті 10 КГц.[2]

Важливо враховувати частотну залежність вихідного опору модуля при розрахунку рівня наведених перешкод та методичної похибки, що викликана впливом опору навантаження на величину вихідної напруги.

Опір навантаження впливає на величину вихідної напруги модуля. Цей вплив можна зменшити за рахунок застосування операційних підсилювачів з високим коефіцієнтом посилення та схем з глибоким зворотним зв'язком.

Для виведення аналогового сигналу в формі струму використовуються джерела струму на основі ОП зі зворотним зв'язком. Їх принцип дії ґрунтується на тому, що ОП з негативним зворотним зв'язком має нульову напругу між його входами завдяки високому коефіцієнту посилення. Це дозволяє використовувати ОП для точного керування струмом, що протікає через навантаження.[2]

Тому вся вхідна напруга виявляється прикладеною до опору r_0 (рис.1.5, верхній за схемою каскад) і вихідний струм дорівнює вхідній напрузі, поділеній на r_0 . Для того, щоб струм, що протікає через r_0 , точно дорівнював вихідному струму, в якості транзистора на рис. 1.5 використовують біполярний транзистор з ізольованим затвором або пару з біполярного і МОП-транзистора.[2]

Вихідний опір джерела струму $r_{\text{вих}}(f)$ можна знайти, використовуючи найпростішу модель МОП-транзистора, що враховує його вихідний опір:

$$r_{\text{вих}}(f) = (R_d + r_0)K(f)S r_0 \approx R_d S r_0 \left(\frac{f_1}{K_0 f} \right) \quad (2),$$

де $R_d S$ - диференціальний вихідний опір і крутизна МОП-транзистора; інші параметри мають таке ж значення і порядок типових величин, що і в формулі (2).

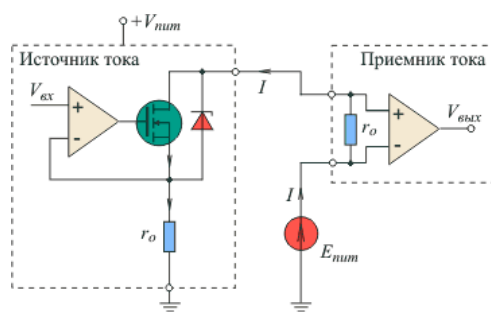
Для типових значень цих параметрів і при $R_d = 100$ кОм отримаємо $r_{вих} = 5 * 10^{11}$ Ом, тобто Вихідний опір фактично визначається опором витоків друкарської плати. [2]

Однак на частоті $f = 10$ кГц, $r_{вих} = 50$ МОм і далі падає з ростом частоти. Джерело струму з високою точністю на всіх частотах можна вважати "ідеальним" і його вихідний опір можна не враховувати при використанні типового навантаження 250 Ом в стандартній "струмовій петлі" 4-20 мА.

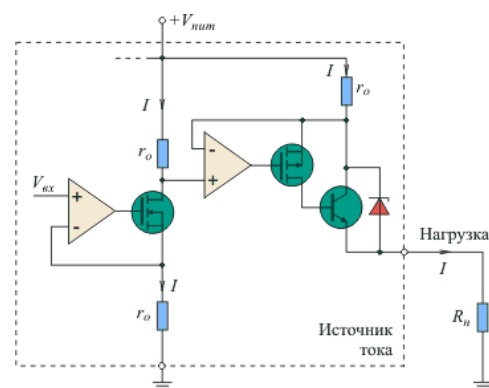
Для живлення транзистора в джерелах струму потрібне додаткове джерело живлення, яке зазвичай розташовується поза модулем виводу. Стабілітрон захищає від зовнішніх напруг неправильної полярності та перевищення напруги над допустимим значенням для МОП-транзистора.

Недоліком цих каскадів є неможливість змінити напрямок струму на протилежний. Більш складні двополярні схеми в модулях виводу для промислової автоматики не застосовуються. Похибка модуля виводу складається з похибки дискретності ЦАП, стабільності джерела опорного напруги, внутрішнього шуму модуля та ненульового вихідного опору.

Типова похибка модуля становить 0,1% від верхньої межі діапазону (± 10 В для потенційного виходу і 0 ... 20 мА для токового). Розрядність - 12 біт, дискретність зміни вихідної величини - 5 мВ для напруги і 5 мкА для струму (0,05% від ширини діапазону). Управління модулем здійснюється стандартними командами Modbus RTU або командами в ASCII кодах по протоколу DCON.[2]



а)



б)

Рис 1.5 - Вихідні каскади для струму, що втікає (а) і витікає (б). Схема (а) вимагає додаткове джерело живлення [2]

1.5 Реальні модулі для обробки аналогових сигналів

Розглянемо кілька модулів які були представлені провідними компаніями Octagon, Texas Instruments і Analog Device, які пропонують великий вибір процесорних модулів для обробки сигналів в режимі реального часу.

Модулі введення аналогових сигналів:

- ADS 12х400:
 - 12-бітний АЦП
 - Частота дискретизації до 500 кГц
 - 16-канальний мультиплексор
 - 12-бітний ЦАП
 - Шина ISA та інтерфейс DSP
- ADS 12х3М:
 - 12-бітний АЦП
 - Частота дискретизації до 3 МГц без втрати якості при мультиплексуванні до 16 каналів
 - 8-канальний ПВЗ для одночасної фіксації вхідних сигналів
 - Два 16-бітних ЦАП з часом встановлення 33 нс
 - Шина ISA зі швидкістю до (900...1000) Кслів/с
 - Інтерфейс DSP зі швидкістю до 3000 Кслів/с
- ADS 18х48:
 - 18-бітний АЦП
 - 4 незалежних канали
 - Смуга частот до 24 кГц
 - Два 16-бітних ЦАП з частотою дискретизації 384 кГц

- Шина ISA та інтерфейс DSP [3]

Модулі введення/виведення аналогових сигналів:

- ADS 12x40M:
 - Двоканальний
 - 12-бітний (8 біт) АЦП
 - Частота дискретизації 40 (50) МГц в кожному каналі
 - Швидкість передачі даних до 96 Мбайт/с
 - Шина PCI [3]

Вибір модуля залежить від конкретних потреб вашої програми. Деякі з факторів, які слід врахувати:

- Кількість каналів: Скільки аналогових сигналів вам потрібно вводити або виводити?
- Частота дискретизації: Яка максимальна частота сигналу, яку вам потрібно обробити?
- Розрядність: Яка потрібна вам точність?
- Інтерфейс: Який інтерфейс вам потрібен (ISA, PCI, DSP)?
- Додаткові функції: Деякі модулі мають додаткові функції, такі як ЦАП, ПВЗ або фільтри. [3]

1.6 Цифрові інтерфейси введення вимірювальної інформації

Цифрові інтерфейси поділяються на паралельні та послідовні.

Паралельні інтерфейси:

- Передають всі біти слова одночасно по декількох лініях.
- Приклади: Centronics (LPT-порт), PCI, AGP.

Послідовні інтерфейси:

- Передають біти послідовно по одній лінії.
- Приклади: RS-232C (COM-порт), FireWire, USB.

Основні характеристики інтерфейсів:

- Пропускна здатність (швидкість передачі даних).
- Максимальна довжина кабелю.
- Режими передачі даних (дуплексний, полудуплексний, симплексний).
- Топологія підключення.
- Підтримка обладнанням.

Пропускна здатність:

- Залежить від способу передачі, електричних параметрів, кількості ліній та режимів передачі.

Максимальна довжина кабелю:

- Обмежується частотними характеристиками кабелю та стійкістю до завад.
- Захист від перехресних завад: виті пари дротів для кожної лінії.

Режими передачі даних:

- Дуплексний: одночасна передача в обох напрямках (симетричний або асиметричний).
- Полудуплексний: передача в обох напрямках по черзі.[3]

1.7 Висновок до розділу 1

Підсумовуючи огляд можна зробити висновок: більшість модулів введення-виведення мають жорстко визначені характеристики, розраховані на конкретні застосування.

Універсальні лабораторні пристрої введення-виведення, які присутні на ринку, мають широкий спектр застосувань, але достатньо дорогі. Для лабораторних експериментальних досліджень часто буває наперед невідомо з яким діапазоном характеристик сигналів треба буде працювати. В цьому випадку доцільно було б мати в своєму розпорядженні пристрій з гнучкими характеристиками, які можна змінювати по ходу лабораторних досліджень, при цьому бажано, щоб рівень цін таких пристроїв був доступним для широкого кола молодих дослідників.

2. Властивості та функції інтерфейсу USB

2.1 Архітектура USB

Раніше в міконтролерних системах інтерфейсу використовували RS-232, який забезпечував послідовний мультиплексний режим зв'язку. Нині стандарт послідовної передачі RS-232 вважається морально застарілим. На багатьох сучасних персональних комп'ютерах він навіть не передбачений. На зміну йому прийшов інтерфейс USB (universal serial bus або універсальна послідовна шина). Цей інтерфейс широко застосовується для зв'язку зовнішніх периферійних пристроїв з персональним комп'ютером. Він може бути корисним, коли необхідно під'єднати прилад, побудований на базі мікропроцесора або мікроконтролера як зовнішній пристрій до персонального комп'ютера.[4]

USB являє собою шину, тобто до одного фізичного каналу можна підключати кілька пристроїв. Для під'єднання периферійних пристроїв до шини USB використовується чотирипровідний кабель. Водночас два дроти "USB-" і "USB+" (звита пара) в диференціальному ввімкненні використовуються для приймання і передавання даних, а два дроти "+5 В" і "Загальний" - для живлення периферійного пристрою. Завдяки вбудованим лініям живлення інтерфейс USB

дає змогу під'єднувати периферійні пристрої без власного джерела живлення. Максимальна сила струму, споживаного пристроєм по лініях живлення шини USB, не повинна перевищувати 500 мА. Існує кілька версій стандарту шини USB, що відрізняються режимами роботи і пропускнуою спроможністю, але схемотехнічне під'єднання пристроїв до цієї шини однакове для всіх версій, окрім останньої версії 3.0.

Шина USB строго орієнтована, має поняття "головний пристрій" (хост, він же USB контролер), і "периферійні пристрої". Шина має деревоподібну топологію, тобто периферійним пристроєм може бути розгалужувач (хаб), до якого зі свого боку можуть підключатися інші периферійні пристрої. Розгалужувач завжди активний і являє собою складний електронний пристрій.

До одного контролера шини USB можна під'єднати до 127 пристроїв за топологією "зірка", зокрема й розгалужувачі. На одній шині USB може бути до 5 рівнів каскадно ввімкнених розгалужувачів.

USB підтримує "гаряче" підключення периферійних пристроїв у режимі Plug&Play. Це означає, що периферійний пристрій, який під'єднують до контролера шини USB, має бути розпізнаний персональним комп'ютером, і має автоматично запуснитися програма опрацювання цього під'єднання. Водночас розв'язується історична проблема браку ресурсів на внутрішніх системних шинах персонального комп'ютера - контролер USB займає тільки одне переривання незалежно від кількості під'єднаних до шини USB пристроїв. Для цього кожен периферійний пристрій повинен мати унікальний код, який зчитується контролером USB (хостом) під час під'єднання цього пристрою.[4]

Хост-контролер — це апаратний чіпсет із рівнем програмного драйвера, який відповідає за такі завдання:

- Виявлення підключення та видалення USB-пристроїв
- Керування потоком даних між хостом і пристроями
- Забезпечення та керування живленням підключених пристроїв

- Відстеження активності на шині

Принаймні один хост-контролер присутній у хості, і можливо мати більше одного хост-контролера. Кожен контролер дозволяє підключати до 127 пристроїв за допомогою зовнішніх USB-хабів (це обмеження засноване на протоколі USB, який обмежує адресу пристрою 7 бітами). Кореневий концентратор — це внутрішній концентратор, який підключається до хост-контролерів і діє як перший рівень інтерфейсу USB у системі. Зараз на вашому комп'ютері є кілька портів USB. Ці порти є частиною кореневого концентратора вашого ПК. Для простоти подивіться на кореневий концентратор і контролер хоста з абстрактного вигляду «чорного ящика», який ми називаємо хостом.

Механізм передачі даних є асинхронним і блоковим. Блок переданих даних називається USB-фреймом або USB-кадром і передається за фіксований часовий інтервал. Оперування командами і блоками даних реалізується за допомогою логічної абстракції, званої каналом. Канал є логічною зв'язкою між хостом і кінцевою точкою зовнішнього пристрою.

Для передавання команд (і даних, що входять до складу команд) використовується канал за замовчуванням, а для передавання даних відкриваються або потокові канали, або канали повідомлень.

Потік доставляє інформацію від одного кінця каналу до іншого, він завжди є односпрямованим. Один і той самий номер кінцевої точки використовується для двох каналів - введення і виведення. Потік може реалізовувати такі типи обміну: суцільний, ізохронний і переривання. [5]

Доставка завжди йде в порядку "першим увійшов - першим вийшов" ; з точки зору USB, дані потоку є неструктурованими. Повідомлення мають формат, який визначений специфікацією USB. Хост посилає свій запит до кінцевої точки, після якого передають (приймають) пакет повідомлення, за яким іде пакет з інформацією стану кінцевої точки.

Наступне повідомлення нормально не може бути надіслано до опрацювання попереднього, але під час опрацювання помилок можливе

скидання необслужених повідомлень. Двосторонній обмін повідомленнями адресується до однієї і тієї ж кінцевої точки. Для доставки повідомлень використовується тільки обмін типу "управління".[4]

З цими каналами пов'язані характеристики, що відповідають кінцевій точці. Канали організовуються під час конфігурування пристроїв USB. Для кожного ввімкненого пристрою існує канал повідомлень (Control Pipe 0), по якому передається інформація конфігурації, управління і стану.

Будь-який обмін по шині USB ініціюється хост-контролером. Він організовує обміни з пристроями згідно зі своїм планом розподілу ресурсів. Контролер циклічно (з періодом $1,0 \pm 0,0005$ мс) формує кадри (frames), у які вкладаються всі заплановані передачі. Кожен кадр починається з надсилання пакета-маркера SOF (Start Of Frame, початок кадру), який є синхронізувальним сигналом для всіх пристроїв, включно з хабами. Наприкінці кожного кадру виділяється інтервал часу EOF (End Of Frame, кінець кадру), на час якого хаби забороняють передачу в напрямку до контролера. Якщо хаб виявить, що з якогось порту в цей час ведеться передача даних, цей порт відключається. У режимі високошвидкісної передачі пакети SOF передаються на початку кожного мікрокадру (період $125 \pm 0,0625$ мкс).[5]

Хост планує завантаження кадрів так, щоб у них завжди знаходилося місце для найпріоритетніших передач, а вільне місце кадрів заповнюється низькопріоритетними передачами великих обсягів даних. Специфікація USB дозволяє займати під періодичні транзакції (ізохронні та переривання) до 90% пропускної здатності шини.

Кожен кадр має свій номер. Хост-контролер оперує 32-бітовим лічильником, але в маркері SOF передає тільки молодші 11 біт. Номер кадру циклічно збільшується під час EOF. Для ізохронної передачі важлива синхронізація пристроїв і контролера.

Є три варіанти синхронізації:

- синхронізація внутрішнього генератора пристрою з маркерами SOF;

- підстроювання частоти кадрів під частоту пристрою;
- узгодження швидкості передавання (приймання) пристрою з частотою кадрів.

У кожному кадрі може бути виконано кілька транзакцій, їхня допустима кількість залежить від швидкості, довжини поля даних кожної з них, а також від затримок, що вносяться кабелями, хабами і пристроями. Усі транзакції кадрів мають бути завершені до моменту часу EOF. Частота генерації кадрів може трохи варіюватися за допомогою спеціального регістра хост-контролера, що дає змогу підлаштовувати частоту для ізохронних передач. Підстроювання частоти кадрів контролера можливе під частоту внутрішньої синхронізації тільки одного пристрою.

Інформація каналом передається у вигляді пакетів (Packet). Кожен пакет починається з поля синхронізації SYNC (SYNChronization), за яким іде ідентифікатор пакета PID (Packet IDentifier). Поле Check являє собою побітову інверсію PID.

Структура даних пакета залежить від групи, до якої він належить.

1. Клієнтське ПЗ посилає IPR-запити рівню USB D.
2. Драйвер USB D розбиває запити на транзакції за такими правилами:
 - виконання запиту вважається закінченим, коли успішно завершено всі транзакції, що його складають;
 - усі подробиці відпрацювання транзакцій (як-от очікування готовності, повтор транзакції в разі помилки, неготовність приймача тощо) до клієнтського ПЗ не доводяться;
 - ПЗ може тільки запустити запит і очікувати або виконання запиту, або виходу за тайм-аутом;
 - пристрій може сигналізувати про серйозні помилки, що призводить до аварійного завершення запиту, про що повідомляється джерелу запиту.
3. Драйвер контролера хоста приймає від системного драйвера шини перелік транзакцій і виконує такі дії:

- планує виконання отриманих транзакцій, додаючи їх до списку транзакцій;
- витягує зі списку чергову транзакцію і передає її рівню хост-контролера інтерфейсу шини USB;

4. хост-контролер інтерфейсу шини USB формує кадри;

5. Кадри передаються послідовною передачею біт за методом NRZI [6]

Таким чином, можна сформулювати таку спрощену схему:

- 1) кожен кадр складається з найбільш пріоритетних посилок, склад яких формує драйвер хоста;
- 2) кожна передача складається з однієї або декількох транзакцій;
- 3) кожна транзакція складається з пакетів;
- 4) кожен пакет складається з ідентифікатора пакета, даних (якщо вони є) і контрольної суми.

Елементи в ланці зв'язку між периферійним USB-пристроєм і ПК

Периферійний USB-пристрій потребує наступного:

- Мікросхема контролера з інтерфейсом USB (USB Controller).
- Код у периферійному пристрої для здійснення зв'язку через USB (функції USB API – Application Program Interface).
- Будь-яке апаратне забезпечення (Application Hardware) та код (Application Firmware), необхідні периферійному пристрою для виконання інших завдань функції (обробка даних, читання входів, запис на виходи).

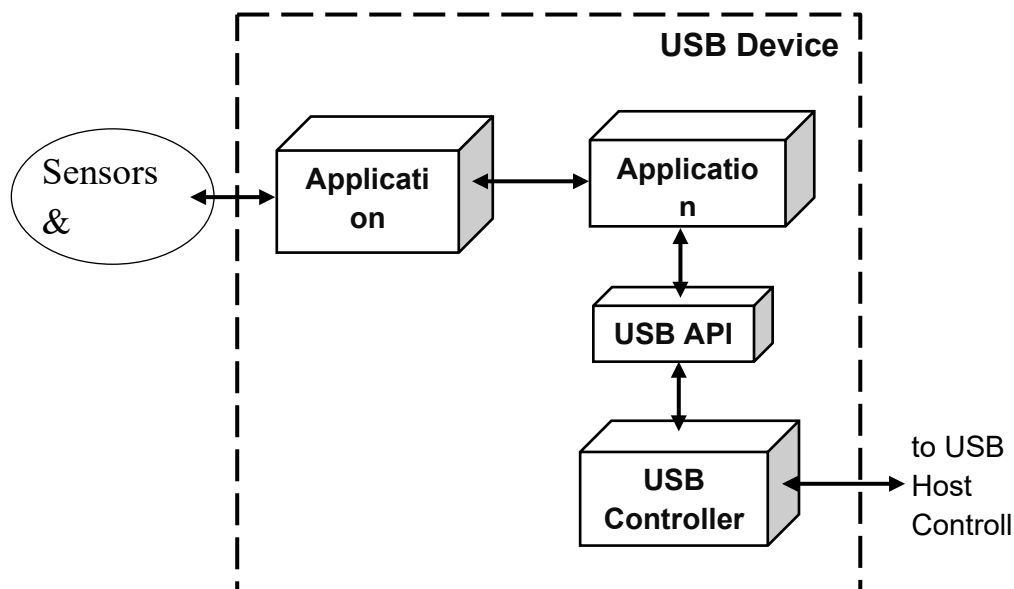


Рис 2.1 - Складові периферійного пристрою USB[7]

ПК з іншого боку має мати наступне:

- Хост, який підтримує USB.
- Програмне забезпечення драйвера пристрою на хості, щоб програми могли спілкуватися з периферійним пристроєм.
- Якщо периферійний пристрій не є стандартним типом, який підтримується операційною системою,
- Прикладне програмне забезпечення (користувацький застосунок -applicatin), щоб дозволити користувачам отримати доступ до периферійного пристрою. (Для стандартних типів периферійних пристроїв, таких як миша, клавіатура чи дисковод, вам не потрібне спеціальне програмне забезпечення, хоча ви можете написати тестову програму).[7]

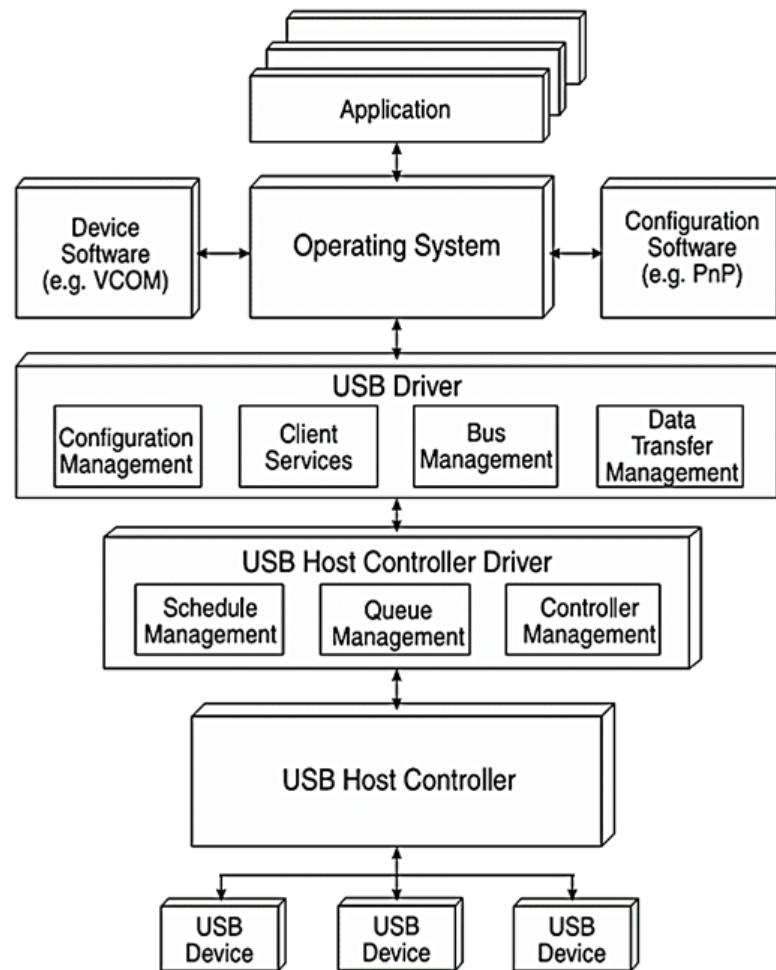


Рис 2.2 - Рівні програмного забезпечення які задіяні в комунікації з приладом USB[7]

Ще один спосіб поглянути на інтерфейс USB – це розділити його на різні рівні, як показано на Рис.3. Рівень інтерфейсу шини забезпечує фізичне з'єднання, електричну сигналізацію та пакетне з'єднання. Це рівень, який обробляється апаратним забезпеченням пристрою. Це досягається за допомогою фізичного інтерфейсу, зовнішнього по відношенню до пристрою.

Рівень пристрою — це система програмного забезпечення USB для виконання таких операцій USB, як надсилання та отримання інформації. Це досягається за допомогою механізму послідовного інтерфейсу, який також є внутрішнім пристроєм.[7]

Нарешті, функціональний рівень — це програмна сторона справи. Це частина USB-пристрою, яка щось виконує з отриманою інформацією або збирає дані для передачі на хост. Рис.8 показує цю абстракцію.

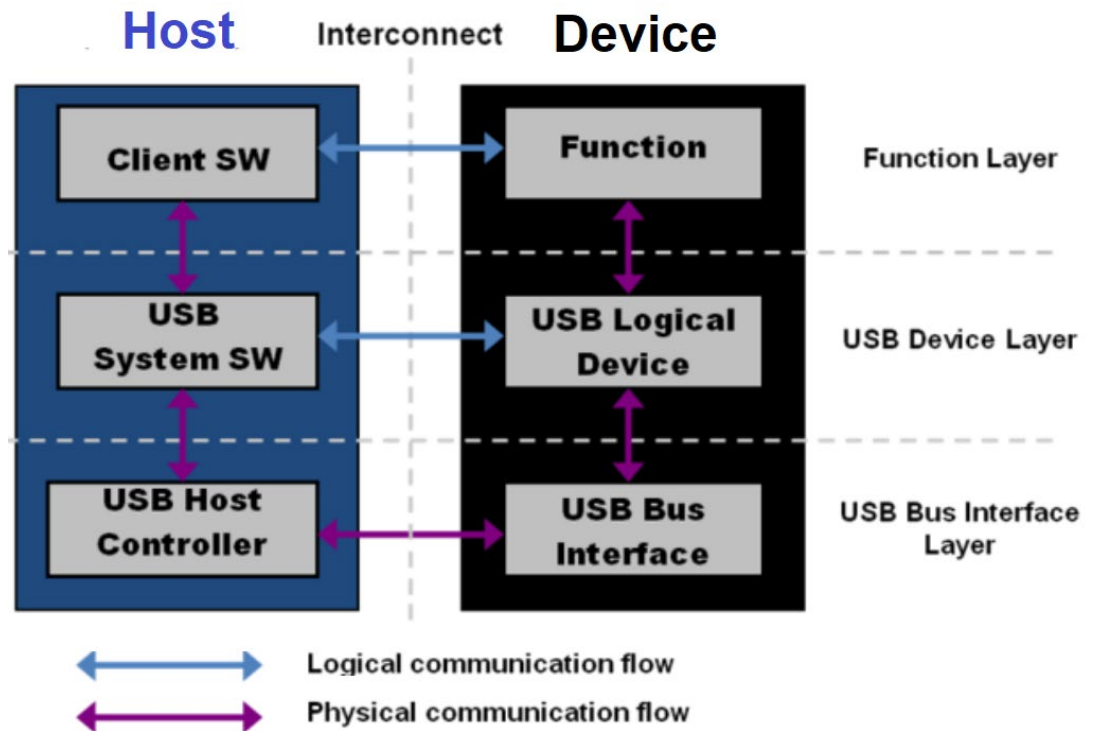


Рис 2.3 - Абстракція інтерфейсу USB[7]

Фізичний інтерфейс

На зовнішньому рівні фізичний інтерфейс USB складається з двох компонентів: кабелів і роз'ємів. Ці роз'єми з'єднують пристрої з хостом. Кабель USB складається з кількох компонентів, захищених ізоляційною оболонкою. Під оболонкою знаходиться зовнішній екран, який містить мідну оплітку. Усередині зовнішнього екрана є кілька проводів: мідний дріт екрану, дріт живлення V_{BUS} (червоний) і дріт заземлення (чорний). Внутрішній екран, виготовлений з алюмінію, містить кручену пару проводів даних, як показано на Рис.9 є сигнальні дроти: дріт D+ (зелений) і дріт D- (білий).

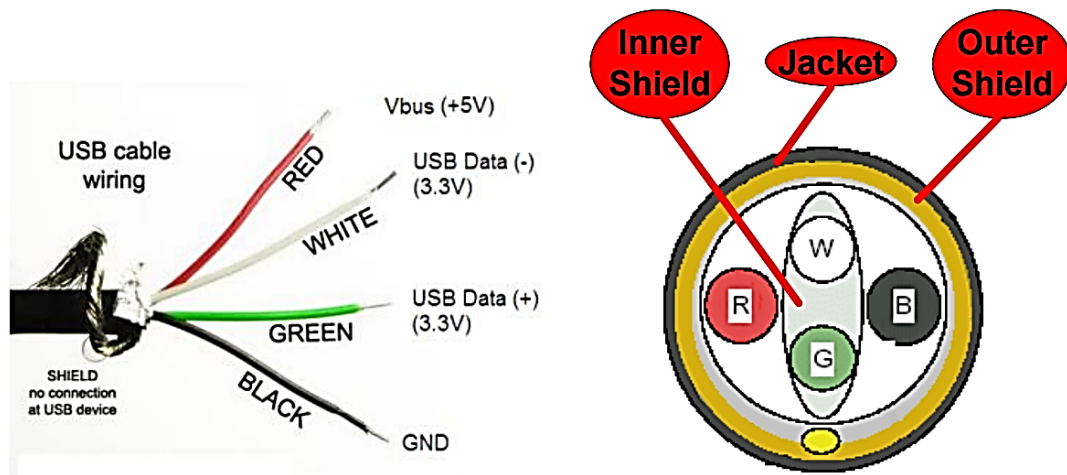


Рис 2.4 - Кабель USB[7]

Провід V_{BUS} забезпечує постійне живлення 4,40–5,25 В для всіх підключених пристроїв. У той час як USB подає до пристроїв напругу до 5,25 В, лінії даних (D+ і D-) працюють при напрузі 3,3 В. Інтерфейс USB використовує диференціальну передачу, інвертовану без повернення до нуля (NRZI), закодовану з бітовою вставкою через виту пару.[7]



Рис 2.5 - Проводи передачі даних на основі крученої пари.[7]

Кінцеві точки пристрою: джерело та приймач даних

Весь трафік по шині рухається до або від кінцевої точки пристрою. Кінцева точка - це буфер, який зберігає кілька байтів. Зазвичай кінцевою точкою є блок пам'яті даних або регістр у мікросхемі контролера. Дані, що зберігаються в кінцевій точці, можуть бути отриманими даними або даними, які очікують передавання. Хост також має буфери, які зберігають отримані дані та дані, які очікують передавання, але хост не має кінцевих точок. Натомість хост служить початком і кінцем зв'язку з кінцевими точками пристрою.

Специфікація USB визначає кінцеву точку пристрою як «однозначно

адресовану частину USB-пристрою, яка є джерелом або приймачем інформації в потоці зв'язку між хостом і пристроєм».

Це визначення передбачає, що кінцева точка переносить дані лише в одному напрямку. Однак контрольна кінцева точка — це окремий випадок, який є двонаправленим. Доступ до кожної кінцевої точки здійснюється за допомогою адреси пристрою (призначеної хостом) і номера кінцевої точки (призначеного пристроєм). Коли інформація надсилається на пристрій, адреса пристрою та номер кінцевої точки ідентифікуються за допомогою пакета маркерів (розглянемо далі в розділі «Протокол зв'язку»).

Хост ініціює цей пакет маркерів перед транзакцією даних. Коли USB-пристрій уперше під'єднується до хосту, починається процес еенумерації USB. Еенумерація — це процес обміну інформацією між пристроєм і хостом, який включає вивчення інформації про пристрій. Крім того, Еенумерація включає призначення адреси пристрою, читання дескрипторів (які є структурами даних, які надають інформацію про пристрій), а також призначення та завантаження драйвера пристрою. Весь цей процес може відбуватися за лічені секунди. Додаткову інформацію див. у розділі «Еенумерація та конфігурація USB».

Адреса кінцевої точки складається з номера кінцевої точки та напрямку. Номер — це значення від 0 до 15. Напрямок визначається з точки зору хоста: кінцева точка IN надає дані для надсилання на хост, а кінцева точка OUT зберігає дані, отримані від хоста. [7]

Кінцева точка, налаштована для передачі керування, має передавати дані в обох напрямках, тому кінцева точка керування насправді складається з пари адрес кінцевих точок IN і OUT, які мають спільний номер кінцевої точки.

Кожен пристрій має мати кінцеву точку 0, налаштовану як контрольну кінцеву точку. Рідко виникає потреба в додаткових кінцевих точках керування. Однак деякі чіпи контролерів їх підтримують.

Інші типи передачі надсилають дані лише в одному напрямку, хоча інформація про стан і керування може надходити у протилежному напрямку.

Єдиний номер кінцевої точки може підтримувати адреси як IN, так і OUT

кінцевої точки.

Наприклад, пристрій може мати адресу кінцевої точки Endpoint 1 IN для надсилання даних на хост і адресу кінцевої точки Endpoint 1 OUT для отримання даних від хоста.

Окрім кінцевої точки 0, повношвидкісний або високошвидкісний пристрій може мати до 30 додаткових адрес кінцевої точки (від 1 до 15, кожна з яких підтримує передачу як IN, так і OUT). Низькошвидкісний пристрій обмежено двома додатковими кінцевими адресами у будь-якій комбінації напрямків (наприклад, кінцева точка 1 IN і кінцева точка 1 OUT або кінцева точка 1 IN і кінцева точка 2 IN). Кожна транзакція на шині починається з пакета, який містить номер кінцевої точки та код, який вказує напрямок потоку даних і те, чи ініціює транзакція контрольну передачу чи ні.

Таблиця 1 - Коды IN, OUT і Setup:

Тип транзакції	Джерело даних.	Типи переказів, що використовує цей тип транзакції	Зміст
IN	пристрій	всі	дані або статус інформації
OUT	хост	всі	дані або статус інформації
Setup (налаштування)	хост	керування	запит

Як і у випадку з напрямками кінцевої точки, угода про іменування транзакцій IN і OUT залежить від точки зору хоста. У транзакції IN дані передаються від пристрою до хосту.

У транзакції OUT дані передаються від хоста до пристрою. Транзакція налаштування схожа на транзакцію OUT, оскільки дані переміщуються від хоста до пристрою, але транзакція налаштування є особливим випадком, оскільки вона ініціює передачу керування.

Пристроєм потрібно ідентифікувати транзакції налаштування, оскільки це єдиний тип транзакцій, які пристрої завжди повинні приймати, і тому, що пристрій має ідентифікувати та відповідати на запит, що міститься в отриманих даних.

Будь-який тип переказу може використовувати транзакції IN або OUT. Кожна транзакція містить адресу пристрою та адресу кінцевої точки. Коли пристрій отримує пакет OUT або Setup, що містить адресу пристрою, кінцева точка зберігає дані, які слідує за пакетом OUT або Setup, і апаратне забезпечення зазвичай запускає переривання.

Потім програма обслуговування переривань у пристрої може обробити отримані дані та виконати будь-які інші необхідні дії.

Коли пристрій отримує IN-пакет, що містить адресу пристрою, якщо пристрій має дані, готові для надсилання на хост, апаратне забезпечення надсилає дані з указаної кінцевої точки на шину та зазвичай ініціює переривання. Потім програма обслуговування переривань у пристрої може зробити все необхідне, щоб підготуватися до наступної транзакції IN.

2.2 Канали: підключення кінцевих точок до хосту

Зв'язок USB-пристроїв здійснюється через канали. Ці канали є шляхом підключення від хост-контролера до адресного буфера, який називається кінцевою точкою. Кінцева точка зберігає дані, отримані від хоста, і зберігає дані, які очікують на передачу на хост.

USB-пристрій може мати кілька кінцевих точок, і кожна кінцева точка пов'язана з нею. Це показано на малюнку 6.

Перш ніж відбудеться передача, хост і пристрій повинні встановити канал. Канал USB — це зв'язок між кінцевою точкою пристрою та програмним забезпеченням контролера хоста. Хост встановлює канали під час енумерації. У системі USB існує два типи каналів: канали керування та канали даних.

Якщо пристрій вилучено з шини, хост видаляє непотрібні канали. Хост також може запросити нові канали або видалити непотрібні канали в інший час, запросивши альтернативну конфігурацію або інтерфейс для пристрою. Кожен пристрій має канал керування за замовчуванням, який використовує кінцеву точку 0.

Інформація про конфігурацію, отримана хостом, включає дескриптор кінцевої точки для кожної кінцевої точки, яку пристрій хоче використовувати. Кожен дескриптор кінцевої точки — це блок інформації, який повідомляє хосту, що йому потрібно знати про кінцеву точку, щоб з нею спілкуватися. Інформація включає адресу кінцевої точки, тип передачі, який потрібно використовувати, максимальний розмір пакетів даних і, за необхідності, бажаний інтервал передачі. (Рис.2.6)

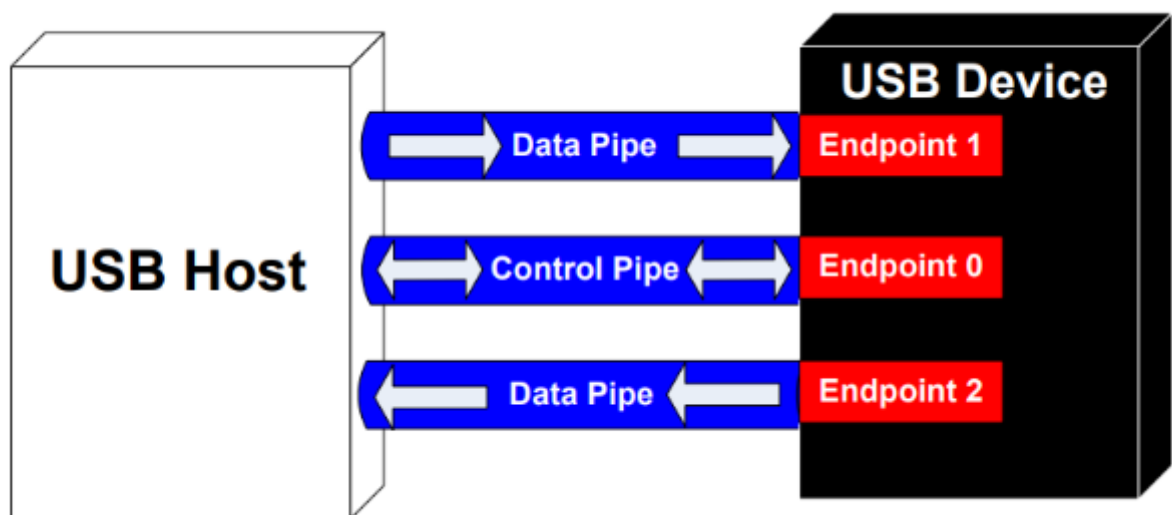


Рис 2.6 - Модель каналів USB[7]

2.3 Види передач

USB призначений для роботи з багатьма типами периферійних пристроїв із різними вимогами до швидкості передачі, часу відгуку та виправлення помилок.

Специфікація USB визначає чотири різні типи передачі даних. Використовуваний канал залежить від типу передачі даних.

Передача керування. Використовується для надсилання команд на пристрій, створення запитів і налаштування пристрою. Ця передача використовує контрольний канал.

Передача по перериванню. Використовується для надсилання невеликих обсягів пакетних даних, які потребують гарантованої мінімальної затримки. Ця передача використовує канал даних.

Масові передачі. Використовується для передачі великих даних, які використовують всю доступну смугу пропускання USB без гарантії швидкості передачі або затримки. Ця передача використовує канал даних.

Ізохронні передачі. Використовуються для даних, які потребують гарантованої швидкості доставки даних.

Ізохронні передачі здатні забезпечити такий гарантований час доставки через їх гарантовану затримку, гарантовану пропускну здатність шини та відсутність виправлення помилок. Без виправлення помилок передача не припиняється, поки пакети, що містять помилки, надсилаються повторно. Ця передача використовує канал даних.

Кожен із чотирьох типів передачі даних задовольняє різні потреби, і пристрій може підтримувати типи передачі, які найкраще підходять для його призначення. Таблиця.1 підсумовує особливості та використання кожного типу передачі.

Кожен пристрій має контрольний канал, і саме через цей канал виконуються контрольні передачі для надсилання та отримання повідомлень від

пристрою. Додатково пристрій може мати канали даних для передачі даних через переривання, групову або ізохронну передачу.

Контрольний канал є єдиним двонаправленим каналом в системі USB. Усі канали даних є односпрямованими.

Контрольні передачі є єдиним типом, який має функції, визначені специфікацією USB. Передача контролю дозволяє хосту читати інформацію про пристрій, установлювати адресу пристрою, а також вибирати конфігурації та інші параметри.

Контрольні передачі також можуть надсилати запити від постачальника, які надсилають і отримують дані для будь-яких цілей. Усі USB-пристрої повинні підтримувати контрольні передачі

Таблиця 2 – Типи передачі даних

Тип передачі	Керування	масовим	перериванням	Ізохронний
Типове використання	Ідентифікація та конфігурація	Принтер, сканер, накопичувач	Миша, клавіатура	Потокове аудіо, відео
Вимагається?	так	ні	ні	ні
Дозволена низька швидкість?	так	ні	так	ні
Байт даних/мілісекунда на передачу, максимально можливий на канал (висока швидкість).*	15 872 (тридцять одна 64-байтова транзакція/мікро кадр)	53 248 (тринадцять 512-байтових транзакцій/мікро кадр)	24 576 (три 1024-байтові транзакції/мікро кадр)	24 576 (три 1024-байтні транзакції/мікро кадр)
Байт даних/мілісекунда на передачу, максимально можливий на канал (повна швидкість).*	832 (тринадцять 64-байтових транзакцій/кадр)	1216 (дев'ятнадцять 64-байтових транзакцій/кадр)	64 (одна 64-байтова транзакція/кадр)	1023 (один 1023-байтова транзакція/кадр)

Байт даних/мілісекунда на передачу, максимально можливий на канал (низька швидкість).*	24 (три 8-байтових транзакції)	заборонено	0,8 (8 байт на 10 мілісекунд)	заборонено
Напрямок потоку даних	IN і OUT	IN або OUT	IN або OUT (USB 1.0 підтримує лише IN)	IN або OUT
Зарезервована смуга пропускання для всіх передач типу (у відсотках)	10 на низькій/повній швидкості, 20 на високій швидкості (мінімум)	немає	90 на низькій/повній швидкості, 80 на високій швидкості (ізохронний режим і переривання разом, максимум)	90 на низькій/повній швидкості, 80 на високій швидкості (ізохронний режим і переривання разом, максимум)
Виправити помилку?	так	так	так	ні
Повідомлення чи потокові дані?	потік	повідомлень	потік	потік
Гарантована швидкість доставки?	ні	ні	ні	так
Гарантована затримка	ні	ні	так	так

2.4 Масові передачі

Масові передачі призначені для ситуацій, коли швидкість передачі не є критичною, наприклад, надсилання файлу на принтер, отримання даних зі сканера або доступ до файлів на диску. Для цих програм хороша швидка передача, але дані можуть зачекати, якщо необхідно. Якщо шина дуже зайнята, масові передачі затримуються, але якщо шина простоює, масові передачі відбуваються дуже швидко. Лише повношвидкісні та високошвидкісні пристрої можуть виконувати групові передачі.

Пристрої зазвичай не вимагають підтримувати масові передачі, але їх може вимагати певний клас пристроїв. Передавання за перериваннями призначено для пристроїв, які повинні приймати дані хоста або періодично потребують уваги. Окрім контрольних передач, переривання є єдиним способом, за допомогою якого низькошвидкісні пристрої можуть передавати дані.

Клавіатури та мишки використовують переривання для надсилання даних про натискання клавіш і переміщення миші. Переривання може використовувати будь-яку швидкість. Пристрої не зобов'язані підтримувати переривання, але вони можуть знадобитися для певного класу пристроїв. Ізохронні передачі мають гарантований час доставки, але без виправлення помилок. Дані, які можуть використовувати ізохронні передачі, включають аудіо або відео грили в реальному часі.

Ізохронний – це єдиний тип передачі, в якому не підтримується автоматична повторна передача даних, отриманих з помилками, тому випадкові помилки мають бути прийнятними. Тільки повно- та високошвидкісні пристрої можуть робити ізохронні передачі. Пристрої не зобов'язані підтримувати ізохронні передачі, але для певного класу пристроїв вони можуть вимагатися.

Потік і канали повідомлень

На додаток до класифікації каналів за типом передачі, яку вона несе, USB Специфікація визначає канали як потік або повідомлення, залежно від того, чи

інформація рухається в одному чи в обох напрямках. Передачі Контролю використовують двонаправлені канали повідомлень; всі інші типи передачі використовують односпрямований потік каналу.

Контрольні передачі використовують канали повідомлень

У каналі повідомлень кожна передача починається з транзакції налаштування, що містить запит. Щоб завершити передачу, хост і пристрій можуть обмінюватися даними та інформацією про стан, або пристрій може просто надсилати інформацію про стан. Кожна Передача контролю має принаймні одну транзакцію, яка надсилає інформацію в кожній напрямком. Якщо пристрій підтримує отриманий запит, пристрій виконує запитану дію. Якщо пристрій не підтримує запит, пристрій відповідає кодом, який вказує, що запит не підтримується.

Усі інші передачі використовують потокові канали

У потоковому каналі дані не мають структури, визначеної специфікацією USB. Приймаючий хост або пристрій просто приймає все, що надходить. Прошивка пристрою або програмне забезпечення хоста може потім обробляти дані будь-яким способом, який підходить для програми.

Звичайно, навіть із поточковими даними пристрої, що надсилають і приймають, повинні узгодити певний формат. Наприклад, хост-додаток може визначити код, який вимагає від пристрою надіслати серію байтів, що вказують на зчитування температури та час зчитування.

Хоча хост може використовувати контрольні передачі з визначеним постачальником запитом `Get_Temperature`, передавання переривань може бути кращим через їхню гарантовану пропускну здатність.

Ініціювання передачі

Коли драйвер пристрою в хості хоче зв'язатися з пристроєм, драйвер ініціює передачу. Специфікація USB визначає передачу як процес створення та виконання

запиту зв'язку. Передача може бути дуже короткою, надсилаючи лише байт даних програми, або дуже довгою, надсилаючи вміст великого файлу.

Програма Windows може відкрити зв'язок із пристроєм за допомогою дескриптора (handle), отриманого за допомогою стандартних функцій API. Щоб розпочати передачу, програма може використовувати дескриптор у виклику функції API, щоб запитати передачу від драйвера пристрою. Програма може запитати «надіслати вміст файлу data.txt на пристрій» або «отримати вміст звіту про введення із пристрою1». Коли програма запитує передачу, операційна система передає запит відповідному драйверу пристрою, який, у свою чергу, передає запит іншим драйверам системного рівня та головному контролеру. Потім хост-контролер ініціює передачу на шині.

Для пристроїв стандартних класів мова програмування може надати альтернативні способи доступу до пристрою. Наприклад, .NET Framework включає класи Directory і File для доступу до файлів на дисках. Драйвер, що надається постачальником, також може визначати власні функції API. Наприклад, пристрої, які використовують контролери від FTDI Chip, можуть використовувати драйвер D2XX FTDI, який надає низку функцій для налаштування параметрів зв'язку та обміну даними.

У деяких випадках драйвер налаштований на запит на періодичні передачі, а програми можуть зчитувати отримані дані або надавати дані для надсилання цих передач. Під час енумерації операційна система ініціює передачі. Інші передачі потребують програми для запиту надсилання або отримання даних.

Висновок: USB інтерфейс є найбільш універсальним, зручним у користуванні і найбільш розповсюдженим для вводу і виводу інформації в персональний комп'ютер, але не дуже простим у розробці.

3. Програмовані системи на кристалі PSoC

3.1 Історія PSoC

Під програмованою системою на кристалі в загальному випадку розуміють

мікросхему з інтегрованим процесором, пам'яттю, логікою і периферією, водночас остаточну апаратну конфігурацію користувач програмує під конкретне завдання.

Клас PSoC можна поділити на підкласи однорідних і блокових систем.

В однорідних PSoC одні й ті самі ділянки кристала під час програмування можуть бути використані для реалізації різних функцій. Однорідні PSoC мають велику гнучкість і універсальність застосування порівняно з блоковими.

У блокових PSoC використовуються апаратні і hard-ядра, тобто області кристала, виділені під строго певні функції і виконані за технологією ASIC. Реалізація hard-ядер знижує універсальність, але зменшує площу кристала і значно підвищує щільність системи в цілому.

З появою програмованих систем на кристалі (PSoC) фірми Cypress розробники отримали потужний інструмент для проектування; система на кристалі за ціною восьми бітного мікроконтролера. Такі стандартні елементи мікроконтролерів, як АЦП, ЦАП, таймери, лічильники, ШІМ, UART легко реалізуються в PSoC.[11]

Мікросхеми PSoC1 Cypress вперше з'явилися 2001 року. Фактично це був прорив у розвитку мікроконтролерів, що значно спростив процес розробки електронних систем.

PSoC1 мав невеликий набір стандартної периферії та блок конфігурованих елементів, який виділяє ці мікроконтролери з пристроїв тієї ж цінової категорії.

Конфігуровані елементи (блоки) розділені на дві групи:

- аналогові, призначені для побудови ЦАП, АЦП, компараторів, активних фільтрів тощо;

- цифрові, призначені для побудови лічильників, ШІМ, послідовних каналів передавання, послідовного інтерфейсу з периферією (SPI), універсальних асинхронних прийомопередавачів (UART).

До "стандартної периферії" входять такі блоки:

1. 8-розрядний помножувач, здатний виконувати як множення, так і множення з накопиченням (MAC);

2. система управління тактовими сигналами, які використовуються як для тактування ядра і стандартної периферії, так і для конфігурованих блоків;
3. контролер I2 C, Master/Slave з тактовою частотою до 400 кГц;
4. Decimator - інтегратор (першого або другого порядку).
5. програмно керована система моніторингу живлення POR/LVD;
6. генератор опорної напруги для роботи аналогових блоків і компараторів POR/LVD;
7. Switch Mode Pump (SMP) - керований генератор, який у разі під'єднання зовнішньої індуктивності, ємності та діода дає змогу зробити підвищувальний перетворювач напруги.[11]

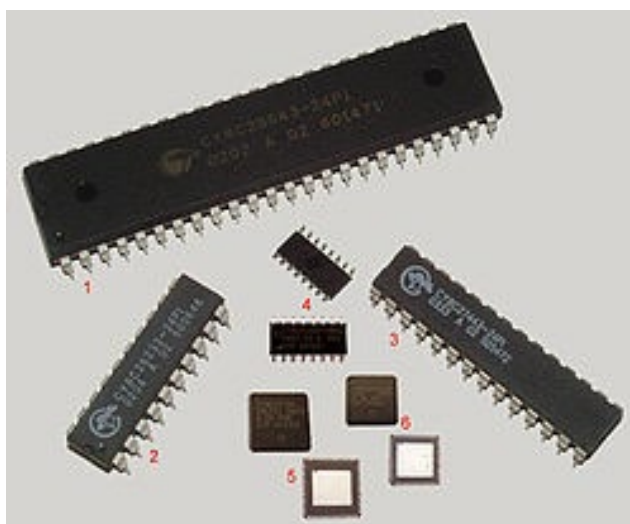


Рис 3.1 - Мікроконтролери PSoC 1[9]

Перші мікросхеми були побудовані на базі восьмирозрядного ядра M8C гарвардської архітектури з тактовою частотою 24МГц і продуктивністю 4MIPS.

Система команд була досить проста в освоєнні і характеризується високою щільністю коду. Вбудовані RC генератори на 24 МГц і 32КГц дають змогу застосункам, не критичним до високої стабільності частоти, обійтися без зовнішнього кварца.

Об'єм ПЗП 2-64Кбайта. ПЗП реалізовано на основі перепрограмованої флеш пам'яті, що допускає до 100000 циклів запису/стирання. Організація флеш-

ПЗП у вигляді масиву із секторів розміром 64 байт дає додаткову можливість для емуляції EEPROM всередині PSoC. Але найцікавіша і найкорисніша якість мікроконтролерів PSoC полягає у внутрішній аналоговій і цифровій периферії.

Найпоширеніша мікросхема PSoC CY8C27443, на прикладі якої вище було показано можливість створення електронного компаса, містить 12 аналогових і 8 цифрових блоків.

Кожен цифровий блок побудований на основі восьмирозрядного регістра і, на початковому етапі проектування, являє собою функціонально невизначений ресурс.

Користувач у програмному середовищі PSoC Designer може довизначити топологію схеми цифрового блока, змусивши його працювати як восьмибітний лічильник/таймер/шім

Використавши кілька цифрових блоків, з'єднаних між собою, можна одержувати модулі більш високої розрядності (наприклад, ті самі лічильники, шими або таймери розрядністю 8, 16, 24 або 32 біти).

Процес конфігурації системи спрощується завдяки використанню бібліотеки модулів користувача, які являють собою заздалегідь сконфігуровані та протестовані PSoC блоки.

Користувач здійснює процес побудови системи на високому рівні шляхом вибору готових модулів з бібліотеки.

Аналогова частина PSoC побудована на базі аналогових блоків трьох видів: аналоговий блок з операційним підсилювачем і програмованою матрицею резисторів у ланцюзі зворотного зв'язку та два типи аналогових блоків на основі операційного підсилювача та перемикаємих конденсаторів.

Річ у тім, що за деяких допущень резистор можна замінити конденсатором і двома комутованими ключами. І резисторну, і конденсаторну топологію паралельно використовують усередині PSoC, оскільки для різних завдань та чи інша схема більш-менш прийнятна. Так, наприклад, на основі резисторних аналогових блоків будуються програмовані підсилювачі та аналогові компаратори. На основі конденсаторних аналогових блоків всередині PSoC можна реалізувати

смуговий або низькочастотні фільтри. Комбінуючи між собою цифрові та аналогові блоки, можна отримати ЦАПи та АЦП розрядністю від 6 до 14 біт.[11]

Ще раз хочеться підкреслити, що весь процес конфігурації виконувався на високому рівні за допомогою графічного інтерфейсу і бібліотеки модулів інтегрованого середовища PSoC Designer. Користувачеві не доведеться замислюватися яку, резисторну або конденсаторну архітектуру вибрати. У PSoC Designer цей процес автоматизовано.

Для зв'язку із зовнішніми пристроями мікросхеми PSoC підтримують інтерфейси RS232, I2C, SPI, UART. Є вбудований драйвер РКІ контролера Hitachi HD44780 і внутрішній датчик температури.

Без калібрування показання датчика температури дуже грубі і дають змогу робити тільки наближену оцінку температури без зовнішнього терморезистора.

Останніми роками Cypress веде інтенсивну роботу над створенням PSoC мікросхем з USB інтерфейсом і PSoC мікросхем з інтегрованими силовими транзисторами (напруга до 36В і струм до 1А на кожному силовому виході).

Зараз PSoC 4, 5, 6 - це 32-розрядні ARM мікроконтролери з ядром M8C, з конфігурованою цифровою периферією і конфігурованими аналоговими елементами. Назва розшифровується як "програмована система на кристалі" (Programmable SoC).

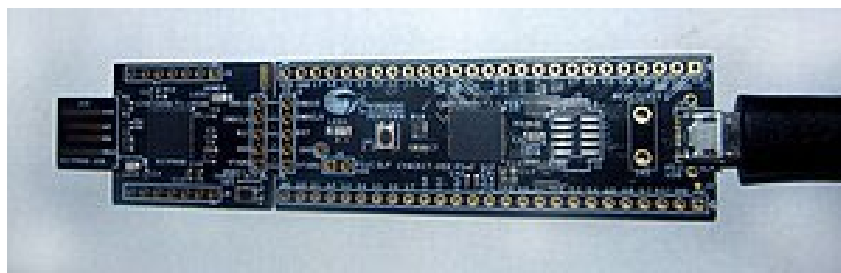


Рис 3.2 - PSoC 5LP Prototyping Kit [10]

Фірма Cypress була викуплена компанією Infineon і продукти PSoC вивадаються зараз під цим брендом.

3.2 Переваги технології та сфери застосування

Перевагою PSoC є досить велика гнучкість у поєднанні з відносною дешевизною, а також досить широка сфера застосування. PSoC може застосовуватися в таких галузях, як:

- вимірювальна апаратура
- побутова електроніка
- бездротові технології
- засоби зв'язку
- обчислювальна апаратура

4. Основні характеристики PSoC5 та середовище розробки

4.1 Мікроконтролери PSoC: Потужні можливості для проектування з низьким енергоспоживанням

Мікросхеми PSoC фірми Cypress являють собою 32-бітний мікроконтролер, що містить мікропроцесорне ARM ядро й масиви цифрових і аналогових блоків, що дозволяє реалізовувати необхідні користувачеві периферійні функції, як цілком стандартні, наприклад ШИМ, АЦП або UART, SPI, USB, так і такі незвичайні для мікроконтролерів, як, наприклад, аналогові фільтри й інструментальні підсилювачі. Завдяки тому, що PSoC дозволяють скоротити кількість використовуваних зовнішніх компонентів, це істотно спрощує процес розробки, здешевлює пристрій й одночасно підвищує його гнучкість за рахунок можливості перепрограмування в системі або реконфігурування внутрішньої структури прямо в процесі роботи.

В розробці пристрою ВВ ми будемо використовувати мікроконтролери CY8C58LP – це пристрої із наднизьким енергоспоживанням, програмованих систем на кристалі (PSoC), які є частиною масштабованої 32-розрядної платформи PSoC 5LP.

Сімейство CY8C58LP надає настроювані блоки аналогових (від 8 до 20 біт дельта-сигма АЦП, до двох 12-розрядних АЦП SAR, чотири 8-розрядних ЦАП, чотири компаратори, чотири операційні підсилювачі, чотири програмованих аналогових блоки для створення програмованого посилення підсилювача (PGA), трансімпедансний підсилювач (TIA), міксер, схема вибірки та зберігання, 1,024 В $\pm 0,1\%$ внутрішньої опорної напруги), цифрових і з'єднувальних схем навколо підсистеми ЦП.

Поєднання центрального процесора (32-розрядний процесор Arm Cortex-M3, 32 входи переривань) з гнучкою аналоговою підсистемою, цифровою підсистемою, маршрутизацією та вводом/виводом забезпечує високий рівень інтеграції в різноманітних застосуваннях. Спрощена блок-схема архітектури мікроконтролерів CY8C58LP показана на Рис.4.2

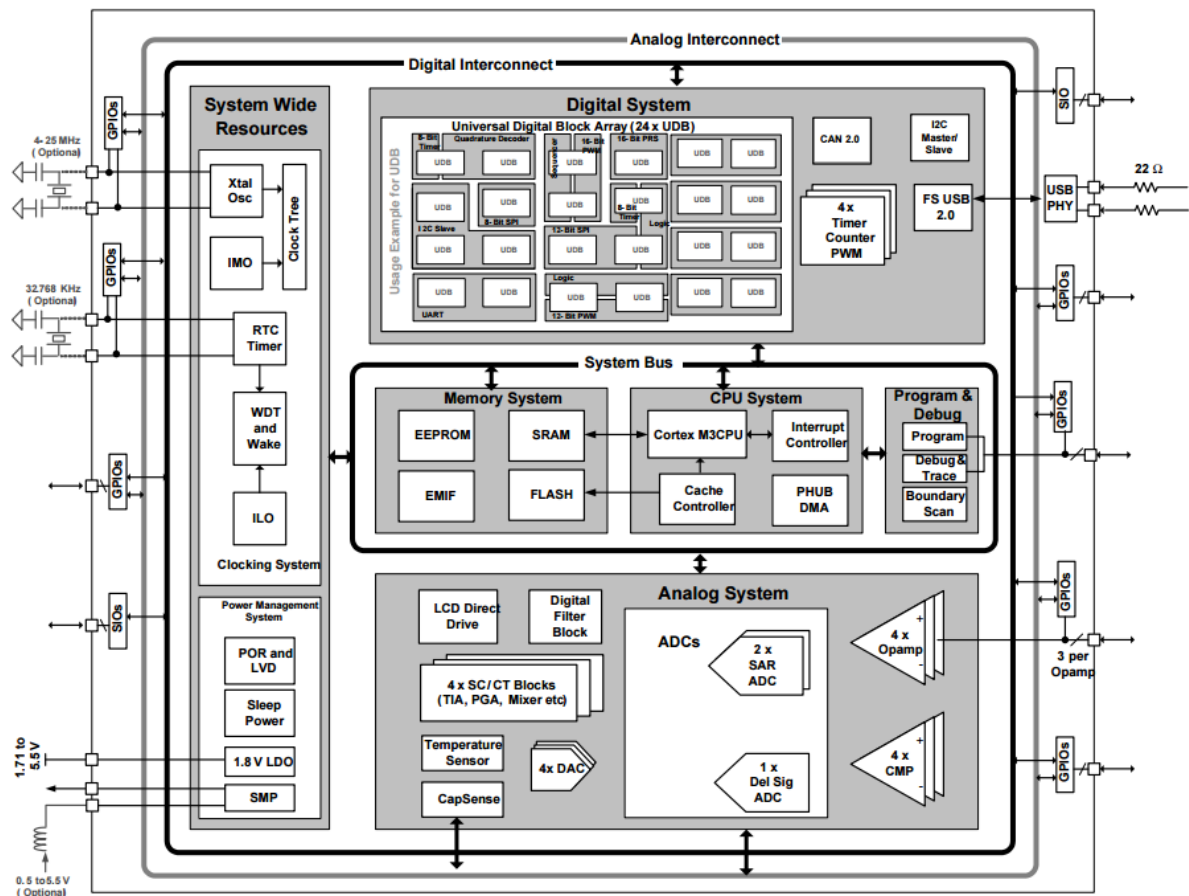


Рис 4.1 - Спрощена блок-схема мікроконтролерів CY8C58LP [8]

4.2 Середовище розробки схеми та коду мікросхеми PSoC Creator

Для розробки принципової схеми пристрою та вбудованої програми керування роботою пристрою ми будемо використовувати середовище розробки PSoC Creator.

PSoC Creator — це безкоштовне інтегроване середовище проектування (IDE) на базі Windows. Воно забезпечує одночасне проектування апаратного та мікропрограмного забезпечення систем на основі PSoC 3, PSoC 4 і PSoC 5LP. За допомогою PSoC Creator можна створювати проекти, використовуючи класичні знайомі схеми, які підтримуються понад 100 попередньо перевіреними, готовими до використання компонентами PSoC та переглядати таблиці даних цих компонентів.

За допомогою PSoC Creator можна:

1. Перетягувати піктограми компонентів, щоб створити проект апаратної частини системи в основній робочій області проектування
2. Створювати мікропрограму керування апаратною частиною PSoC та компілювати її в машинний код мікропроцесора PSoC
3. Налаштовувати компоненти за допомогою інструментів конфігурації
4. Використовувати бібліотеку з понад 100 компонентів
5. Переглядати таблиці даних компонентів

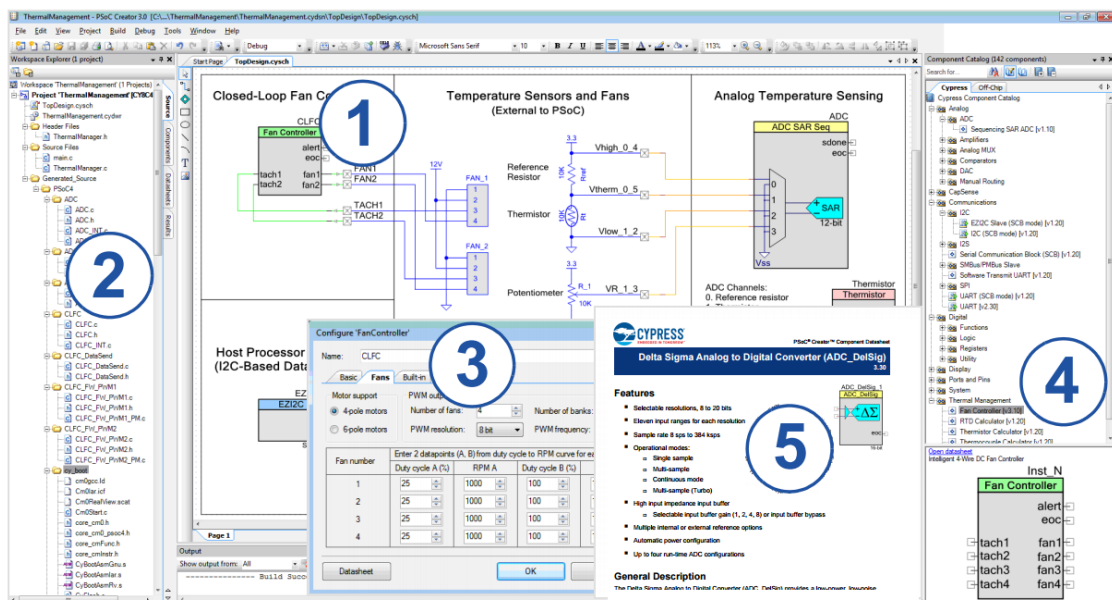


Рис 4.2 - Приклад проекту з кількома джерелами сигналів в PSoC Creator [8]

- 1 - Дизайн апаратної частини системи
- 2 - Провідник файлів проекту (Workspace Explorer)
- 3 - Інструменти конфігурації компонентів
- 4 - Каталог компонентів - аналогових (підсилювачі, АЦП, ЦАП, компаратори, мультиплексори і т.д.), цифрових (логічних, регістрів, лічильників, таймерів, ШІМ, цифрових компараторів, дільників частоти, фільтрів і т.д.), комунікаційних (UART, SPI, I2C, USB і т.д.)
- 5 - Опис та параметри компонентів (DataSheet компонентів)

Бібліотека попередньо розроблених аналогових і цифрових периферійних пристроїв в середовищі проектування з перетягуванням допомагає легко розробляти програми.

В середовищі широко використовуються бібліотеки функцій API, щоб швидко налаштувати свої проекти. Тут є засоби налагодження та перевірки створюваної системи за допомогою інтегрованого налагодження, яке включає в себе емуляцію в схемі і стандартні функції відладки програмного забезпечення.

Складові середовища розробки. PSoC Creator містить кілька підсистем:

- Редактор рівня мікросхем
- Редактор коду
- Менеджер збирання
- Менеджер проекту
- Відладчик

Інтерфейс розділений на кілька активних вікон, які відрізняються залежно від підсистеми в якій ви знаходитесь в даний момент. Під час переміщення між підсистемами різні опції на панелі інструментів і меню доступні або недоступні в залежності від функціональності вашого конкретного пристрою PSoC.

5. Проектування пристрою

5.1. Проектування апаратної та програмної частини пристрою введення-виведення з використанням мікросхеми PSoC від Cypress

Задача проектування полягає в створенні представлень про:

- архітектуру апаратної частини пристрою,
- постійне програмне забезпечення, запрограмоване в постійну пам'ять мікроконтролера (firmware);
- програмне забезпечення ПК (software) і його модульну структуру;

- алгоритмічної структури ПЗ і структури даних;
- вхідного і вихідного інтерфейсу (вхідних/вихідних форм даних).

Апаратна частина пристрою введення-виведення має включати модулі аналогового та цифрового введення-виведення, комутаційний модуль USB, мікропроцесорне ядро і постійну пам'ять для зберігання алгоритму керування цими модулями та обміном даними між пристроєм та ПК, а також ПК з інтерфейсом користувача та зовнішнім накопичувачем для зберігання даних та алгоритмів роботи пристрою та обробки даних.

Як ми згадували в попередньому розділі, такі апаратні модулі включає мікросхема PSoC - програмована система на кристалі. При цьому наявність безкоштовного графічного середовища розробки (IDE PSoC Creator) дозволяє реконфігувати структуру апаратної частини, змінювати параметри модулів програмно, в тому числі і в режимі реального часу, завдяки досить продуктивному ARM процесору Гарвардської архітектури на кристалі і вбудованій пам'яті програм та пам'яті даних. А можливість реалізації визначених функцій тільки на одній мікросхемі PSoC дозволить задовільнити вимоги до помірної ціни виробу.

Структура апаратної частини пристрою введення-виведення на якій планується реалізувати функції пристрою представлена на Рис 5.1.

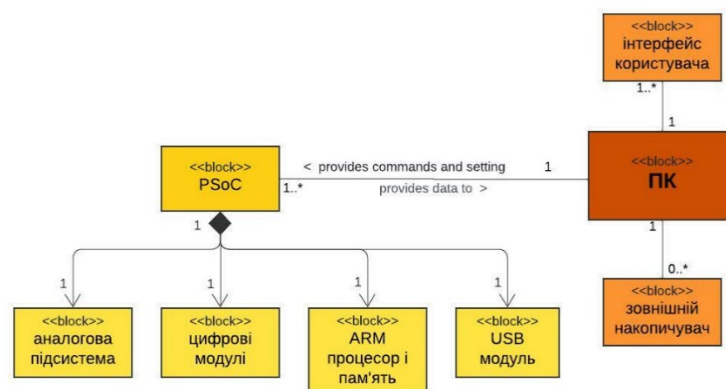


Рис 5.1 - Структура пристрою введення-виведення включає систему на кристалі - мікросхему PSoC5 (котра містить ряд модулів) і персональний комп'ютер (ПК) з інтерфейсом користувача і зовнішнім накопичувачем для зберігання даних.

Далі опишемо роботу всієї системи, а саме які дії вона має виконувати щоб реалізувати основні функції системи та перехід від однієї дії до іншої.

Основні дії системи під час роботи пристрою та розподіл операцій між пристроєм введення-виведення і ПК показано на діаграмі діяльності (Рис.). Розподіл операцій і об'єми даних та періодичність обміну даними між пристроєм введення-виведення і ПК можуть змінюватись в залежності від задач, які виконуються системою.

Ці основні дії системи виконуються апаратною частиною мікросхеми PSoC чи ПК, або їх програмними компонентами (вбудованою програмою - firmware, або як її ще називають, прошивкою мікросхеми PSoC та користувацьким застосунком – software, на ПК). Потік керування (порядок виконання) на діаграмі діяльності пристрою (Рис 5.2) переходить від однієї операції до іншої.

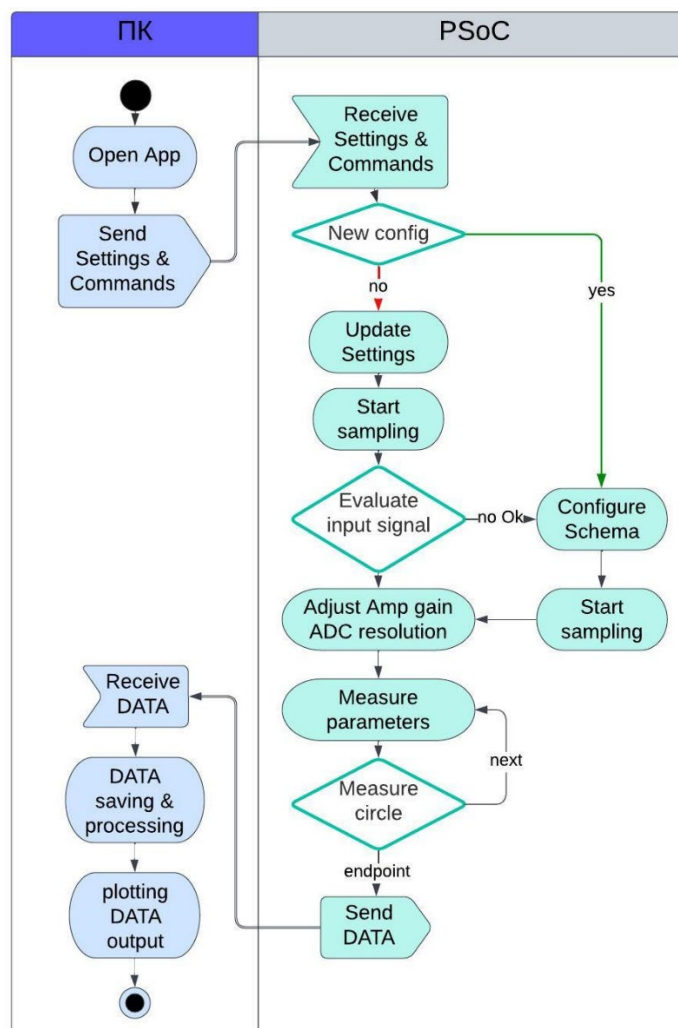


Рис 5.2 - Основна послідовність дій при роботі пристрою

5.2. Розробка схеми аналогової частини PSoC. Базові схеми пристрою ВВ

В даній роботі розглядається прості тестові конфігурації пристрою введення-виведення, наприклад схема, котра включає 8 диференційних каналів для введення аналогових сигналів та один канал для виводу аналогового сигналу, яким живиться тестова схема формування сигналів на 8 вхідних каналів.

На рис 5.3 наведена ця базова схема з двома швидкодіючими АЦП послідовного наближення ADC_SAR_0, ADC_SAR_1 (SAR - successive-approximation) та двома чотириканальними аналоговими мультиплексорами AMUX_1, AMUX_1 і модуль USBFS для комунікації з ПК за стантартом повношвидкісного USB. Крім того на схемі також присутній і модуль виводу строуму iDAC8 (для цілей тестування). Пунктиром показана зовнішня схема для тестування роботи 8-канального АЦП (на 10 резисторах).

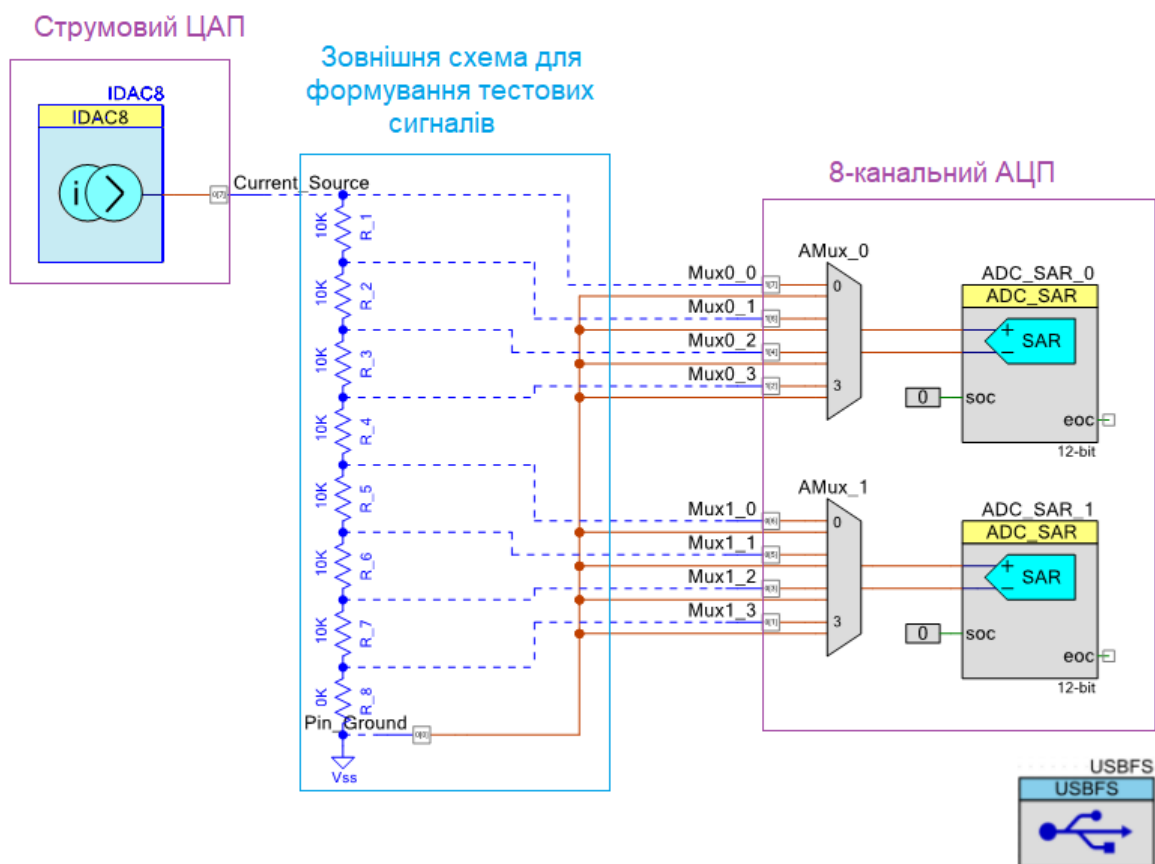


Рис 5.3 - Базова схема для оцифровування до 8 диференційних каналів введення аналогових сигналів.

Інша базова конфігурація для слабких сигналів, в котрій попередньо сигнали підсилюються з потрібним коефіцієнтом підсилення та сигма дельта АЦП високої розрядності (до 20 біт) наведена на Рис 5.4.

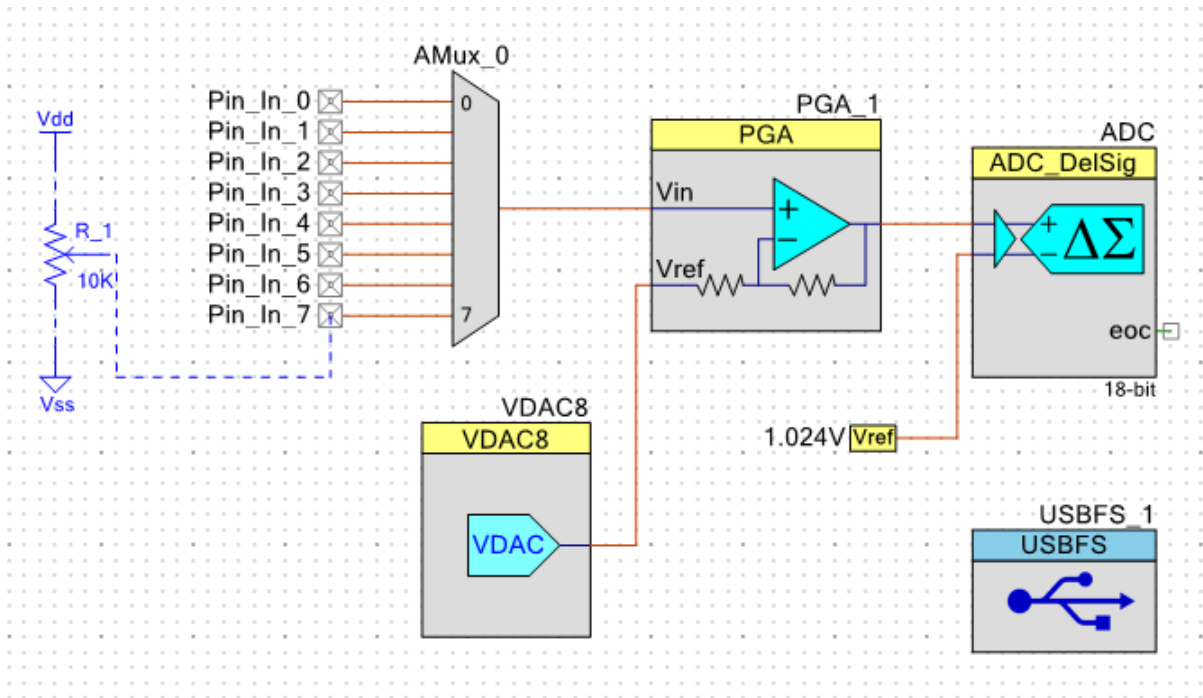


Рис 5.4 - Базова схема для оцифровування до 8 каналів введення слабких аналогових сигналів з попереднім (програмованим) підсиленням та сигма дельта АЦП високої роздільної здатності.

Користувач може зконфігурувати свою схему відповідно до своїх потреб з наявних в CY8C58LP апаратних ресурсів (можна збільшити кількість каналів, додавши мультиплексори, змінити тип підсилювача, тип АЦП, додати блок цифрової обробки сигналів і т.п. в залежності від параметрів і кількості вхідних сигналів).

Апаратна частина пристрою введення-виведення має включати модулі аналогового та цифрового введення-виведення, комутаційний модуль USB, мікропроцесорне ядро і постійну пам'ять для зберігання алгоритму керування цими модулями та обміном даними між пристроєм та ПК, а також ПК з інтерфейсом користувача та зовнішнім накопичувачем для зберігання даних та алгоритмів роботи пристрою та обробки даних.

Як ми згадували в попередньому розділі, такі апаратні модулі включає мікросхема PSoC - програмована система на кристалі.

При цьому наявність безкоштовного графічного середовища розробки (IDE PSoC Creator) дозволяє реконфігувати структуру апаратної частини, змінювати параметри модулів програмно, в тому числі і в режимі реального часу, завдяки досить продуктивному ARM процесору Гарвардської архітектури на кристалі і вбудованій пам'яті програм та пам'яті даних. А можливість реалізації визначених функцій тільки на одній мікросхемі PSoC дозволить задовільнити вимоги до помірної ціни виробу.

При ініціалізації програмного забезпечення користувача на ПК (Open App) відбувається процедура енумерації пристрою, підключеного до USB, описана в розділі 2. Після цього користувач може розпочати роботу модуля введення-виведення, - змінити установки (параметри) апаратних модулів PSoC, змінити конфігурацію вимірювальної схеми (або залишити існуючу конфігурацію і установки), передавши команди і установки (Send Commands and Settings) через USB на PSoC. Приймавши повідомлення від ПК USB ініціює переривання, по якому запускається процедура обробки повідомлення. Якщо повідомлення містить команду зміни конфігурації, то викликається відповідна функція (Config Schema). Якщо такої команди немає, то виконується оновлення установок модулів (Update Settings) і запускаються процедури опитування аналогових та цифрових входів (Start Sampling) і вивід на виходи даних, отриманих в повідомленні.

При вводі аналогових сигналів можлива попередня оцінка амплітуди (Evaluate input signal) і, якщо вона не відповідає визначеному рівню то відбувається налаштування входних підсилювачів і АЦП (Adjust Amp gain ADC resolution), після чого відбуваються цикли опитувань та вимірювань входних сигналів та виводу вихідних. По завершенні алгоритму опитувань, накопичені дані передаються на ПК (Send DATA) для зберігання, обробки і аналізу користувачем.

5.3. Розробка цифрової частини. Процедура ініціалізації та роботи модуля введення-виведення через USB на мікросхемі PSoC.

Розробка цифрової частини полягала в розробці вбудованого (Firmware) програмного забезпечення PSoC в середовищі розробки PSoC Creator, котре забезпечує роботу пристрою згідно з алгоритму наведеному в попередньому розділі (Рис.5.2). При підключенні пристрою до USB відбувається процедура енумерації (операційною системою) пристрою, описана в розділі 2. При ініціалізації програмного забезпечення користувача (Software) на ПК (Open App) відбувається передача базових налаштувань пристрою.

Після цього користувач може розпочати роботу модуля введення-виведення, - змінити установки (параметри) апаратних модулів PSoC, змінити конфігурацію вимірювальної схеми (або залишити існуючу конфігурацію і установки), передавши команди і установки (Send Commands and Settings) через USB на PSoC.

Прийнявши повідомлення від ПК USB ініціює переривання, по якому запускається процедура обробки повідомлення. Якщо повідомлення містить команду зміни конфігурації, то викликається відповідна функція (Config Schema). Якщо такої команди немає, то виконується оновлення установок модулів (Update Settings) і запускаються процедури опитування аналогових та цифрових входів (Start Sampling) і вивід на виходи даних, отриманих в повідомленні.

При вводі аналогових сигналів можлива попередня оцінка амплітуди (Evaluate input signal) і, якщо вона не відповідає визначеному рівню то відбувається налаштування входних підсилювачів і АЦП (Adjust Amp gain ADC resolution), після чого відбуваються цикли опитувань та вимірювань входних сигналів та виводу вихідних. По завершенні алгоритму опитувань, накопичені дані передаються на ПК (Send DATA) для зберігання, обробки і аналізу користувачем.

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

В ході виконання дипломної роботи було розглянуто модуль введення-виведення з інтерфейсом USB для подальшого створення такого недорогого пристрою введення-виведення аналогової і цифрової інформації.

Даний пристрій зможе задовільнити широкий спектр задач по лабораторним дослідженням, автоматизації експерименту, а саме: підсилення, фільтрації аналогових сигналів, оцифрування, виводу керуючих сигналів для управління процесами та архівації зібраних даних на персональному комп'ютері (ПК).

В ході цієї роботи було розроблено лабораторний модуль вводу-виводу аналогових і цифрових сигналів з інтерфейсом USB для зв'язку з персональним комп'ютером. Пристрій реалізований на одному чіпі програмованої системи на кристалі PSoC. Особливість пристрою полягає в тому, що в ньому перекривається широкий спектр задач, які можуть виникати в лабораторних дослідженнях - від оцифровування слабких сигналів з роздільною здатністю до 20 розрядів на інтегруючому сигма-дельта АЦП до сигналів з широким спектром до 20 МГц на SAR АЦП. Після аналізу основних параметрів та функцій, ми розглянули структуру типового модуля виведення аналогових сигналів та особливості сучасних модулів введення-виведення.

Крім того є можливість збільшити кількість джерел аналогових сигналів за рахунок аналогових мультиплексорів, попереднього підсилення сигналів з програмованим коефіцієнтом підсилення 1-100, попередньої фільтрації сигналів. Наявність 32 розрядного ARM процесора дозволяє робити попередню цифрову обробку сигналів та керувати процесом апаратної обробки сигналів, наприклад змінювати коефіцієнт підсилення, частоту зрізу аналогових фільтрів, тип АЦП, його розрядність і частоту вибірки. В тому числі реконфігурацію схеми та її

араметрів можна робити і в процесі роботи модуля, що надає можливість розробляти адаптивні алгоритми управління модуля в залежності від параметрів сигналів.

Оскільки USB призначений для роботи з багатьма типами периферійних пристроїв із різними вимогами до швидкості передачі, часу відгуку та виправлення помилок, особливу увагу було приділено основним чотиром типам передачі даних (передача керування, передача по перериванню, масові передачі, ізохронні передачі)

Оскільки з появою програмованих систем на кристалі (PSoC) фірми Cypress розробники отримали потужний інструмент для проектування, ми розглянули роботу системи на кристалі PSoC з вбудованими підсилювачами, АЦП, ЦАП, архітектуру мікросхем PSoC Cypress їх технічні характеристики, та системи на кристалі PSoC з комунікаційними блоками USB, що видається дуже перспективним, оскільки ця платформа надає значні можливості для реалізації різноманітних проектів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1) Введення аналогових сигналів. 2019. URL:
<https://studfile.net/preview/7786751/page:56/> (дата звернення: 20.05.2024).
- 2) Введення аналогових сигналів. 2019. URL:
<https://studfile.net/preview/7786751/page:57/> (дата звернення: 20.05.2024).
- 3) Конспект лекцій з навчальної дисципліни «ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ УПРАВЛІННІ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ» URL:https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/46309/mod_resource/content/1.pdf(дата звернення: 20.05.2024).
- 4) Бортник Г.Г., Кичак В.М., Стальченко О.В. Засоби оргтехніки. URL:
https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/firen/9bortnyk_zasoby_orgtehniky/44.html
(дата звернення: 20.05.2024).
- 5) Універсальний послідовний інтерфейс USB URL:<https://gadgets-room.ru/usb-interface-how-to-arrange-and-types-universal-serial-usb-interface/>(дата звернення: 20.05.2024).
- 6) Компютеризовані системи поліграфічного обладнання URL:
<http://repository.hneu.edu.ua/bitstream/1.pdf>(дата звернення: 20.05.2024).
- 7) USB 101: An Introduction to Universal Serial Bus 2.0 (arizona.edu) URL:
http://kofa.mmtto.arizona.edu/stm32/blue_pill/usb/an57294. (дата звернення: 20.05.2024).
- 8) CY8C58LP_Family_Datasheet. URL:
Infineon-SoC_5LP_CY8C58LP_Family_Datasheet_Programmable_System-on-Chip_(PSoC_-)DataSheet-v15_00-EN.pdf (дата звернення: 20.05.2024).
- 9) PSoC CY8C25x/CY8C26/CY8C27
URL:https://sellaismk.shop/product_details/34612924.html(дата звернення: 20.05.2024).

10) *Family_Datasheet.CY8CKIT059* URL:
<https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/cy8ckit-059/> (дата
звернення: 20.05.2024).

11) Infineon Technologies PSoC

URL: <https://eu.mouser.com/new/infineon/cypress-psoc> (дата звернення:
20.05.2024)