

Лекція

**з дисципліни: «Комп'ютерна схемотехніка та архітектура
комп'ютерів»**

на тему: «Системи вводу/виводу»

ПЛАН ЛЕКЦІЇ

1. Загальна характеристика.
2. Введення-виведення у вбудованих системах.
 - 2.1. Цифровий ввід-вивід загального призначення
 - 2.2. Послідовний ввід-вивід
 - 2.3. Аналоговий ввід-вивід
3. Інтерфейси вводу-виводу ПК

ЛІТЕРАТУРА

1. Девід М. Харріс і Сара Л. Харріс. Цифрова схемотехніка та архітектура комп'ютера / пер. з англ. 2-е вид. - Morgan Kaufman, 2013. - 1621 с.
2. Мельник А.О. Персональні суперкомп'ютери: архітектура, проектування, застосування: монографія / А.О. Мельник, В.А. Мельник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 516 с.
3. Матвієнко М. П. Архітектура комп'ютера. Навчальний посібник. / Матвієнко М. П., Розен В. П., Закладний О. М.— К: Видавництво Ліра-К, 2016. — 264 с.

1. Загальна характеристика

Системи введення-виведення (Input / Output, I / O) використовуються для підключення комп'ютера до зовнішніх пристроїв, які називаються периферійними. У персональному комп'ютері периферійні пристрої включають в себе клавіатури, монітори, принтери і бездротові мережі. У вбудованих системах - нагрівальний елемент тостера, синтезатор мови ляльки, паливний інжектор двигуна, двигуни позиціонування сонячних панелей супутника і так далі. Процесор отримує доступ до пристроїв введення-виведення, використовуючи шини адреси і даних так само, як при отриманні доступу до пам'яті.

Вбудовані системи - це комп'ютери спеціального призначення, які керують деяким фізичним пристроєм. Зазвичай вони складаються з мікроконтролера (МК) або цифрового сигнального процесора, підключеного до одного або декількох фізичних пристроїв введення-виведення.

Частина адресного простору відводиться під пристрої введення-виведення замість пам'яті. Наприклад, адреси від 0xFFFF0000 до 0xFFFFFFFF. Ці адреси розташовані в зарезервованій частини карти пам'яті. Кожному пристрою введення-виведення присвоюється один або кілька адрес в цьому діапазоні. При збереженні за заданою адресою дані надсилаються в пристрої. При завантаженні - дані отримуються від пристрою. Цей метод зв'язку з пристроями введення-виведення називається введенням-виведенням, відображенням в пам'ять (MMIO, memory-mapped I / O).

Деякі архітектури, зокрема, x86, використовують для зв'язку з пристроями введення-виведення спеціалізовані команди замість введення-виведення, що відображаються в пам'ять. Ці команди представлені в наступному вигляді, де device1 і device2 є унікальними ідентифікаторами периферійного пристрою:

```
lwio $t0, device1  
swio $t0, device2
```

Цей тип зв'язку з пристроями введення-виведення називається програмованим введенням-виведенням.

В системі з MMIO процедури завантаження або збереження можуть отримувати доступ або до пам'яті, або пристрою введення-виведення. На Рис. 1 зображені апаратні засоби, необхідні для підтримки двох пристроїв введення-виведення, відображених в пам'ять. Дешифратор адреси визначає, який пристрій зв'язується з процесором. Він використовує сигнали Address і MemWrite, щоб генерувати сигнали для решти апаратних засобів. Мультиплексор ReadData виконує вибір між пам'яттю і різними пристроями введення-виведення. Регістри з дозволом запису містять в собі значення, що записуються в пристрої введення-виведення.

Програмне забезпечення, яке взаємодіє з пристроєм вводу-виводу, називається драйвером пристрою. Написання драйвера вимагає детального знання про апаратну частину цього пристрою. Інші програми викликають функції драйвера для отримання доступу до пристрою без необхідності розуміння низькорівневого апаратного забезпечення.

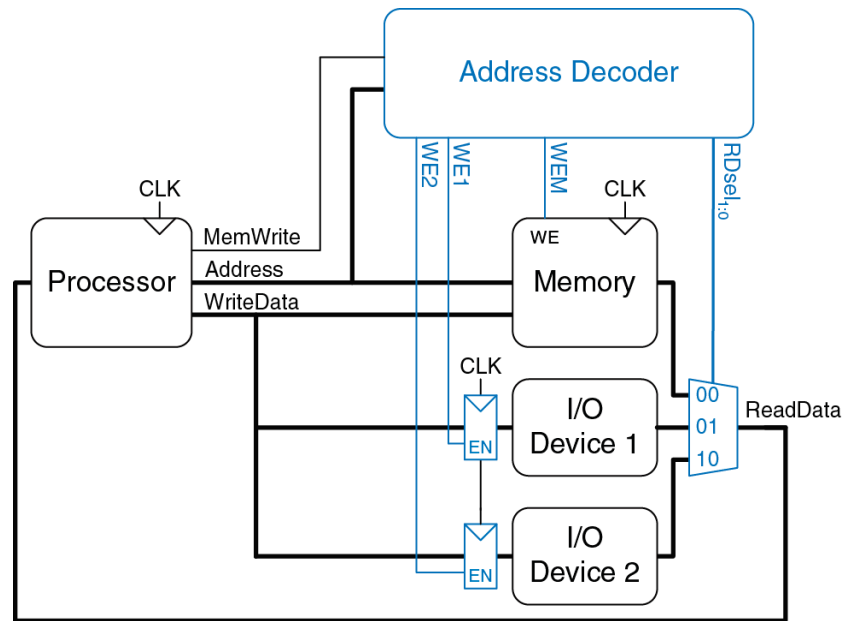


Рис. 1 Відображення пристроїв введення-виведення в пам'ять

Адреси, пов'язані з пристроями введення-виведення, часто називаються *регістрами введення-виведення*, тому що ці адреси відповідають регістрам пристрою (рис.1).

2. Введення-виведення у вбудованих системах

Вбудовані системи використовують процесор для управління взаємодіями з фізичним середовищем. Зазвичай вони збудовані навколо мікроконтролерів (МК), які поєднують в собі мікропроцесор з набором простих у використанні периферійних пристроїв, таких як цифрові і аналогові піни введення-виведення загального призначення, послідовні порти, таймери і т.д. Здебільшого МК недорогі і спроектовані так, щоб мінімізувати вартість і розміри систем шляхом інтеграції більшості необхідних компонентів в один чіп. Мікроконтролери класифікуються за розміром даних, з якими вони оперують. 8-бітові мікроконтролери - найменші і найдешевші, в той час як 32-бітові мікроконтролери надають більше пам'яті і мають велику продуктивність.

Мікроконтролер PIC32MX675F512H

Системи введення-виведення мікроконтролерів досить схожі у різних виробників, тому принципи, проілюстровані на прикладі PIC32, легко можуть бути застосовані до інших мікроконтролерів.

На Рис. 2 представлена блок-схема серії мікроконтролерів (МК) PIC32. У центрі системи знаходиться 32-розрядний процесор MIPS. Процесор підключається через 32-розрядні шини до флеш-пам'яті, що містить програму, і до СОЗП, що містить дані. PIC32MX675F512H має 512 КБ флеш-пам'яті і 64 КБ оперативної пам'яті. Існують інші різновиди з флеш-пам'яттю від 16 до 512 КБ і оперативною пам'яттю від 4 до 128 КБ. Високопродуктивні інтерфейси, такі як USB і Ethernet, також безпосередньо спілкуються з ОЗП через матрицю шин

даних. Периферія більш низької продуктивності, що включає послідовні порти, таймери і аналого-цифрові перетворювачі, ділить між собою окрему периферійну шину. Чіп містить коло генерації тактової частоти і детектор напруги для визначення, коли чіп вмикається або коли він близький до втрати живлення.

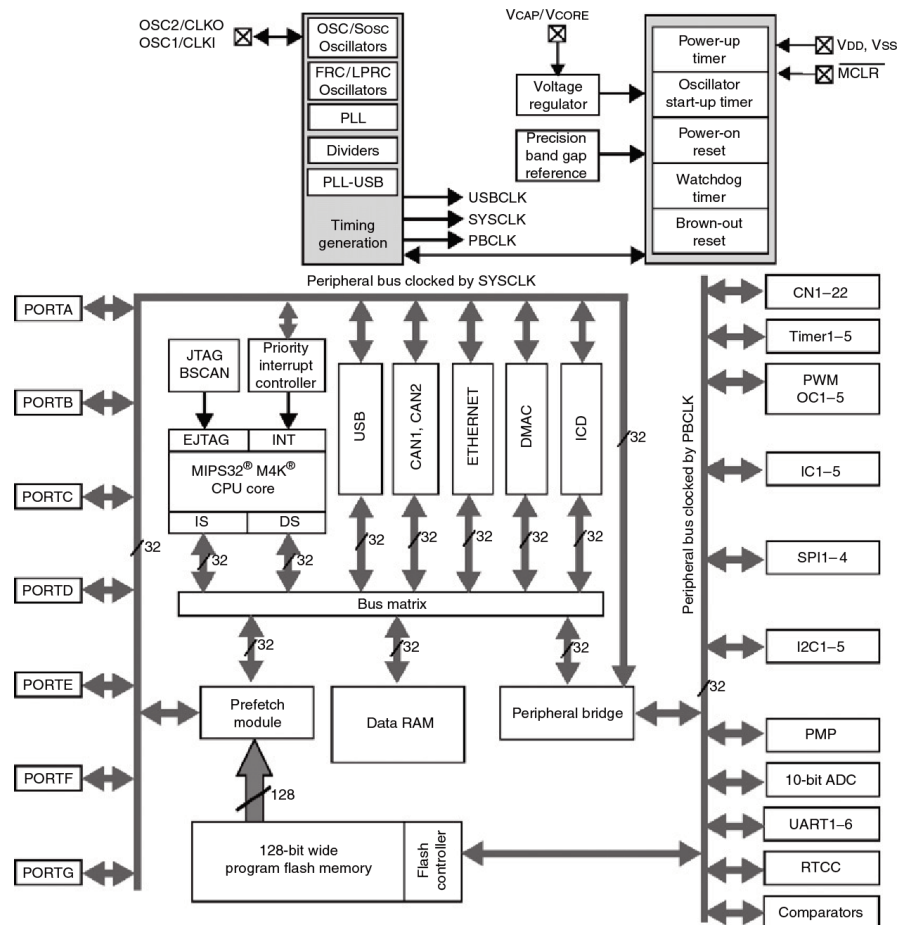


Рис. 2 Блок-схема мікроконтролера PIC32

2.1. Цифровий ввід-вивід загального призначення

Піни введення-виведення загального призначення (GPIO) використовуються для читання або запису цифрових сигналів. Наприклад, на Рис. 3 показано вісім світлодіодів (LED) і чотири перемикачі, підключених до 12-бітного GPIO-порту.

На схемі показані назви і номер піна кожного з 12 виводів порту; звідси програміст дізнається функції кожного піну, а розробник апаратної частини - дані про те, які з'єднання необхідно реалізувати фізично. Світлодіоди підключені таким чином, щоб світитися, коли на них приходить логічна «1», і гаснуть, коли приходить «0». перемикачі з'єднані певним чином для отримання «1», коли вони замкнені, і «0» - при розімкненому стані. Мікроконтролер може використовувати порт як для управління світлодіодами, так і для читання станів перемикачів.

PIC32 організовує групи GPIO в порти, які зчитуються і записуються разом. PIC32 називає ці порти RA, RB, RC, RD, RE, RF, і RG; до них звертаються просто як порт A, порт B і т.д. Кожен порт може мати до 16 GPIO-пінів.

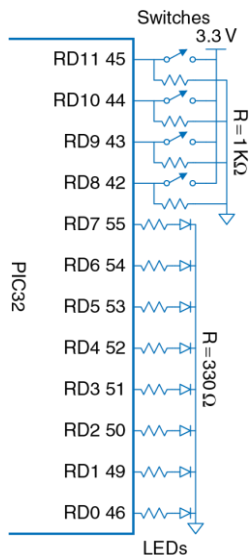


Рис. 3

Кожен порт керується двома регістрами: TRISx і PORTx, де x- мітка (A-G) із зазначенням порту, що представляє інтерес в даний момент. Регістри TRISx визначають, чи є пін порту введенням або виведенням, в той час як регістри PORTx визначають значення, зчитуване з порту введення або яке подається на вихід. 16 молодших бітів кожного регістра відповідають шістнадцяти пінам порту GPIO. Коли даний біт регістра TRISx дорівнює 0, пін стає виходом, а коли він дорівнює 1 - входом.

Кожен регістр відображається в пам'яті у вигляді слова в області віртуальної пам'яті, відведеної під Спеціальні Функціональні Регістри (Special Function Registers, SFR) (0xBF80000- BF8FFFF). Файл заголовка p32xxxx.h оголошує ці регістри 32-розрядними цілими числами без знаку. Отже, програміст може отримати доступ до них по імені, замість того, щоб шукати адресу.

Кожен порт також має відповідні регістри SET і CLR, які можуть бути записані з маскою, що вказує, які біти слід встановити або очистити.

Наприклад,

```
PORTDSET = 0b0101;
```

```
PORTDCLR = 0b1000;
```

встановлює перший і третій біти PORTD і очищає четвертий біт. Якщо нижні чотири біта PORTD були 1110, вони стануть 0111.

2.2. Послідовний ввід-вивід

Якщо мікроконтролеру необхідно надіслати більше бітів, ніж кількість вільних GPIO-пінів, йому знадобиться розбити повідомлення на кілька менших посилок. На кожному кроці він може посилати або один біт, або кілька бітів. Перший метод називається послідовним вводом-виводом, а другий - паралельним вводом-виводом. Послідовний ввід-вивід популярний, тому що він використовує невелику кількість проводів і досить швидкий для безлічі завдань. Він настільки популярний, що для послідовного введення-виведення було встановлено безліч стандартів і в PIC32 виділено апаратне забезпечення для

простого пересилання даних за цими стандартами такі як протоколи Послідовного периферійного інтерфейсу (Serial Peripheral Interface, SPI) і Універсального Асинхронного Прийомопередавача (Universal Asynchronous Receiver / Transmitter, UART).

Іншими поширеними послідовними стандартами є Двопровідна Двонаправлена Шина (Inter-Integrated Circuit, I2C), Універсальна Послідовна Шина (Universal Serial Bus, USB) і Ethernet.

Послідовний периферійний інтерфейс (Serial Peripheral Interface, SPI)

Послідовний Периферійний Інтерфейс SPI - простий синхронний послідовний протокол, легкий у використанні і відносно швидкий. Фізичний інтерфейс складається з трьох пінів: SerialClock (SCK), SerialDataOut (SDO) і Serial Data In (SDI).

SPI підключає ведучий пристрій (master) до веденого пристрою (slave), як це показано на Рис. 4 (а). Ведучий пристрій виробляє сигнал тактової частоти. Він ініціює встановлення зв'язку шляхом надсилання серії імпульсів тактової частоти на SCK. Якщо він хоче послати дані на ведений пристрій, він посилає їх на SDO, починаючи зі старшого біта. Ведений пристрій може одночасно відповісти, посилаючи дані на SDI ведучого пристрою. На Рис. 4 (б) показана діаграма сигналів SPI для передачі 8 бітів даних.

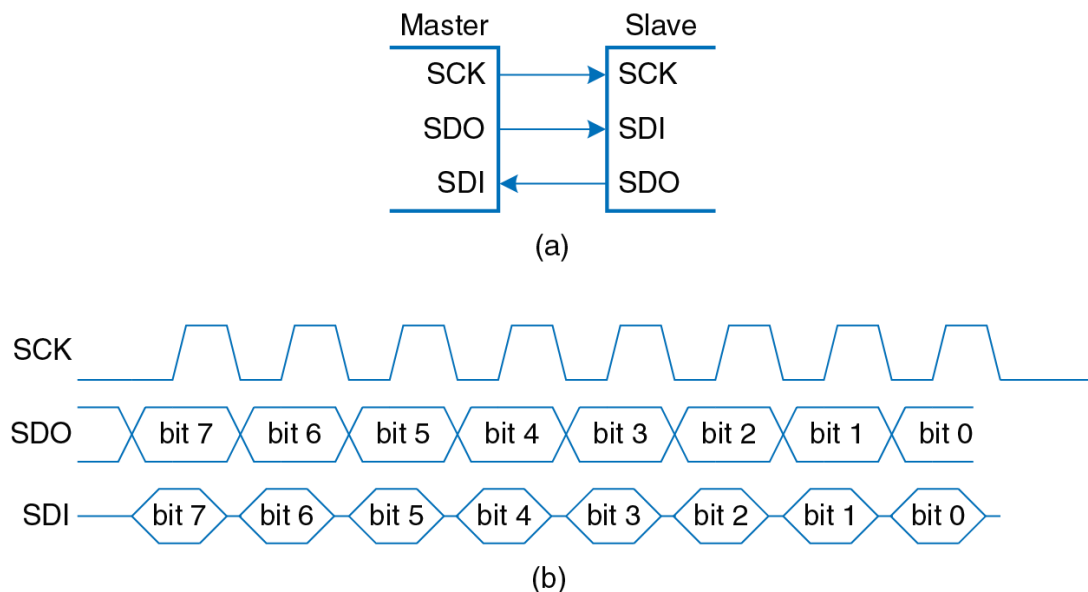


Рис. 4 Схема підключення по SPI інтерфейсу і тимчасова діаграма ведучого пристрою

У PIC32 є до 4-х портів SPI, названих SPI1- SPI4. Кожен порт може виступати в ролі ведучого або веденого пристрою. Щоб використовувати SPI-порт, програма PICR спочатку повинна конфігурувати порт. Потім вона може записувати дані в регістр; дані послідовно передаються на ведений пристрій. Дані, отримані від веденого пристрою, зберігаються в іншому регістрі. Коли передача завершена, PIC32 може прочитати отримані дані.

Кожен SPI-порт асоціюється з чотирма 32-бітними регістрами: SPIxCON, SPIxSTAT, SPIxBRG і SPIxBUF. Наприклад, SPI1CON є керуючим регістром для

SPI-порту 1. Він використовується для включення SPI і установки атрибутів, таких як число бітів, які необхідно передати, і полярність тактового генератора. STAT - реєстр стану, який вказує, наприклад, чи заповнений приймаючий реєстр. BRG - реєстр швидкості передачі даних, який встановлює швидкість SCK по відношенню до периферійної тактової частоти у відповідності до формули:

$$f_{SP1} = f_{\text{peripheral_clock}} / 2 \times (BRG + 1)$$

BUF - буфер даних. Дані, що записуються в BUF, передаються через SPI-порт на SDO-пін, а отримані з SDI-піна дані можуть бути отримані шляхом зчитування буфера після завершення передачі даних

SPI завжди посилає дані в обидва напрямки при кожній передачі. Якщо системі потрібно лише односторонній зв'язок, вона може проігнорувати непотрібні дані. Наприклад, якщо ведучому пристрою потрібно лише надіслати дані на ведений, то байт, отриманий від веденого, може бути проігнорований. Якщо ведучий пристрій має тільки отримати дані від веденого, він все ще має запустити SPI-зв'язок шляхом посилки довільного байта, який ведений проігнорує. Потім він може зчитати дані, отримані від веденого пристрою.

Універсальний Асинхронний Прийомопередавач (UART)

UART є периферійним пристроєм послідовного введення-виведення без пересилання тактового сигналу. Замість цього системи повинні заздалегідь домовитися про швидкість передачі даних, і кожна з них повинна локально генерувати свій власний тактовий сигнал. Хоча ці системні тактові сигнали можуть мати невелику похибку частоти і невідоме співвідношення фаз, UART забезпечує надійний асинхронний зв'язок.

На Рис. 5 (а) показано асинхронний послідовний зв'язок. DTE посилає дані в DCE по лінії TX і отримує дані назад по лінії RX. На Рис. 5 (b) показана одна з цих ліній, що відправляє символ зі швидкістю передачі даних 9600 бод.

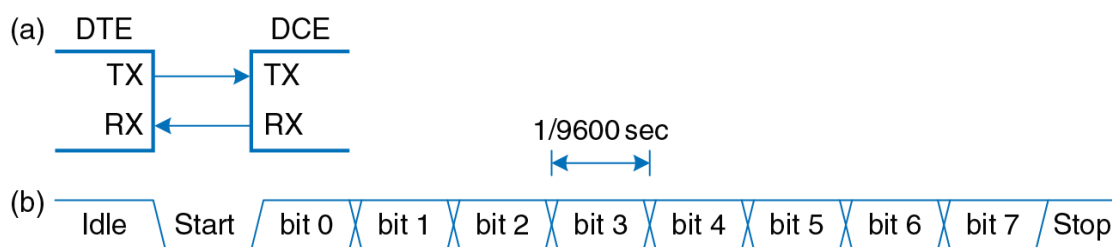


Рис. 5

Кожен знак складається з стартового біта (0), 7-8 бітів даних, опціонального біта парності і одного або більше стоп-бітів (1).

Універсальна послідовна шина Universal Serial Bus (USB) на даний час замінила UART в персональних комп'ютерах.

Таймери

Вбудовані системи зазвичай потребують вимірювань часу. PIC32 має п'ять 16-розрядних таймерів на платі. Таймер 1 називається таймером типу А, який може прийняти асинхронне зовнішнє джерело сигналу синхронізації, наприклад,

кварцовий генератор, що дає частоту 32 кГц. Таймери 2/3 і 4/5 мають тип В. Вони працюють синхронно з периферійним сигналом синхронізації і можуть працювати в парі (наприклад, 2 з 3), щоб утворити 32-розрядні таймери для вимірювання тривалих періодів часу.

За замовчуванням, кожен таймер діє як 16-розрядний лічильник, накопичуючи такти внутрішнього периферійного годинника. Іншою корисною особливістю таймера є режим закритого накопичення часу, в якому таймер веде відлік, лише поки на зовнішньому піні підтримується високий рівень. Це дозволяє таймеру вимірювати тривалість зовнішнього імпульсу.

Переривання

Таймери часто використовуються в поєднанні з перериваннями таким чином, що програма може працювати як зазвичай і потім періодично обробляти завдання, коли таймер генерує переривання.

Запити на переривання виникають, коли відбувається подія в апаратній частині, така як переповнення таймера, отримання символу по UART або перемикання певних виводів GPIO. Кожен тип запиту переривання встановлює конкретний біт в регістри Статусу прапора переривання (Interrupt Flag Status, IFS). Потім процесор перевіряє відповідний біт в регістрах дозволу переривань управління (Interrupt Enable Control, IEC). Якщо біт встановлено, мікроконтролер повинен відповісти на запит переривання за допомогою виклику програми обробки переривань (Interrupt Service Routine, ISR)

ISR являє собою функцію з аргументами порожнього типу даних (void), яка обробляє переривання і очищає біт з IFS до повернення з обробки. Система переривань PIC32 підтримує одно- і багатовекторні режими. У одновекторному режимі всі переривання викликають один і той же ISR, який повинен перевірити регістр CAUSE, щоб визначити причину переривання (якщо може виникнути кілька типів переривань) і обробляти його відповідним чином. У багатовекторному режимі кожен тип переривання викликає свій ISR.

2.3. Аналоговий ввід-вивід

Багато вбудованих систем потребують аналогові входи і виходи для взаємодії з навколишнім світом. Вони використовують аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) для квантування аналогових сигналів в цифрові значення і цифроаналогові перетворювачі (ЦАП), щоб зробити зворотне. На Рис. 6 показані умовні графічні позначення для цих компонентів. Такі перетворювачі характеризуються роздільністю, динамічним діапазоном, частотою дискретизації і точністю.

Багато мікроконтролерів мають вбудовані АЦП помірної продуктивності. Для більш високої продуктивності (наприклад, 16-бітовим дозволом або частотою дискретизації понад 1 МГц), часто необхідно використовувати окремий АЦП, з'єднаний з мікроконтролером. Менша кількість мікроконтролерів мають вбудовані ЦАП, тому також можуть бути використані окремі чіпи. Проте, мікроконтролери часто імітують аналогові виходи, використовуючи метод, званий широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

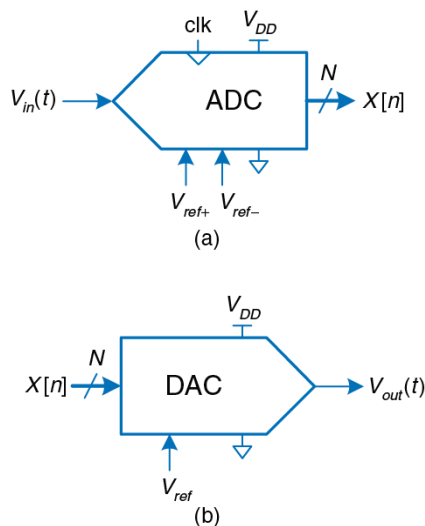


Рис. 6 Умовні позначення АЦП і ЦАП

Широтно-імпульсна модуляція

Способом генерувати аналоговий вихідний сигнал в цифровій системі є широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), в якій періодичний вихідний сигнал приймає високе значення протягом частини періоду передачі і низьке для решти. Частина періоду, для якої сигнал має високе значення, називається коефіцієнтом заповнення (duty cycle), Рис. 7. Середнє значення на виході пропорційно коефіцієнту заповнення. Наприклад, якщо вихідні перепади розкидані в діапазоні між 0 і 3,3 В і коефіцієнт заповнення становить 25%, середнє значення буде $0,25 \times 3,3 = 0,825$ В. Низькочастотна фільтрація сигналу ШІМ виключає коливання, і вихідний сигнал приймає необхідне середнє значення.

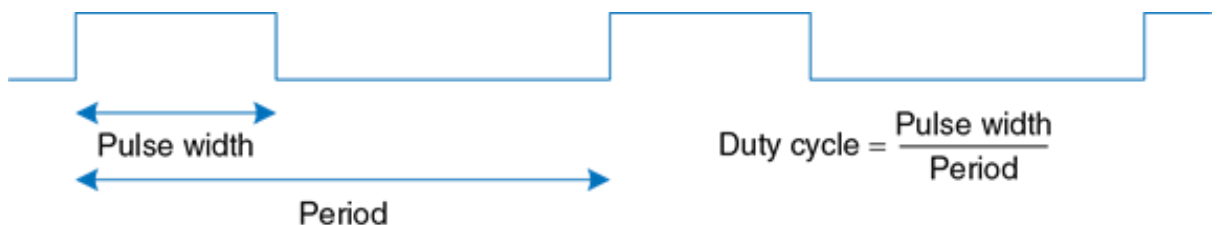


Рис. 7

PIC32 містить п'ять модулів порівняння вихідних сигналів OC1-OC5, і кожен, у поєднанні з таймером, може виробляти ШІМ-сигнали на виході.

3. Інтерфейси вводу-виводу ПК

Персональні комп'ютери (ПК) використовують величезну кількість протоколів введення-виведення для різних цілей: передачі і отримання даних з пам'яті, роботи з дисками, з мережею, з картами розширень і з зовнішніми пристроями. Ці протоколи розвивалися з метою забезпечення високої продуктивності передачі даних і можливості для користувачів без проблем підключати зовнішні пристрої. Для реалізації цих двох особливостей протоколи вводу-виводу довелося сильно ускладнити.

На Рис. 8 показана материнська плата з роз'ємом для процесора Core i5 або i7. Процесор поміщений в корпус з 1156 контактними площадками - LGA-корпус (англ. LGA - land grid array). Ці площадки підводять до процесора живлення,

землю, під'єднують до нього пам'ять і пристрої введення-виведення. На материнській платі розташовано два слоти для оперативної пам'яті (DRAM), різні роз'єми для пристроїв введення-виведення і роз'єм для підключення живлення, регулятори напруги і конденсатори. Оперативна пам'ять підключається через інтерфейс DDR3. Периферійні пристрої, такі як клавіатура або веб-камери, підключаються через інтерфейс USB. Високопродуктивні плати розширення, наприклад, відеокарти, підключаються до слоту PCI Express з 16-ма лініями передачі (x16), в той час як менш вимогливі по продуктивності карти розширення можуть використовувати слот з однією лінією передачі (x1) або більш старий інтерфейс PCI. ПК підключається до мережі через Ethernet-кабель. Жорсткий диск підключається до роз'єму SATA.

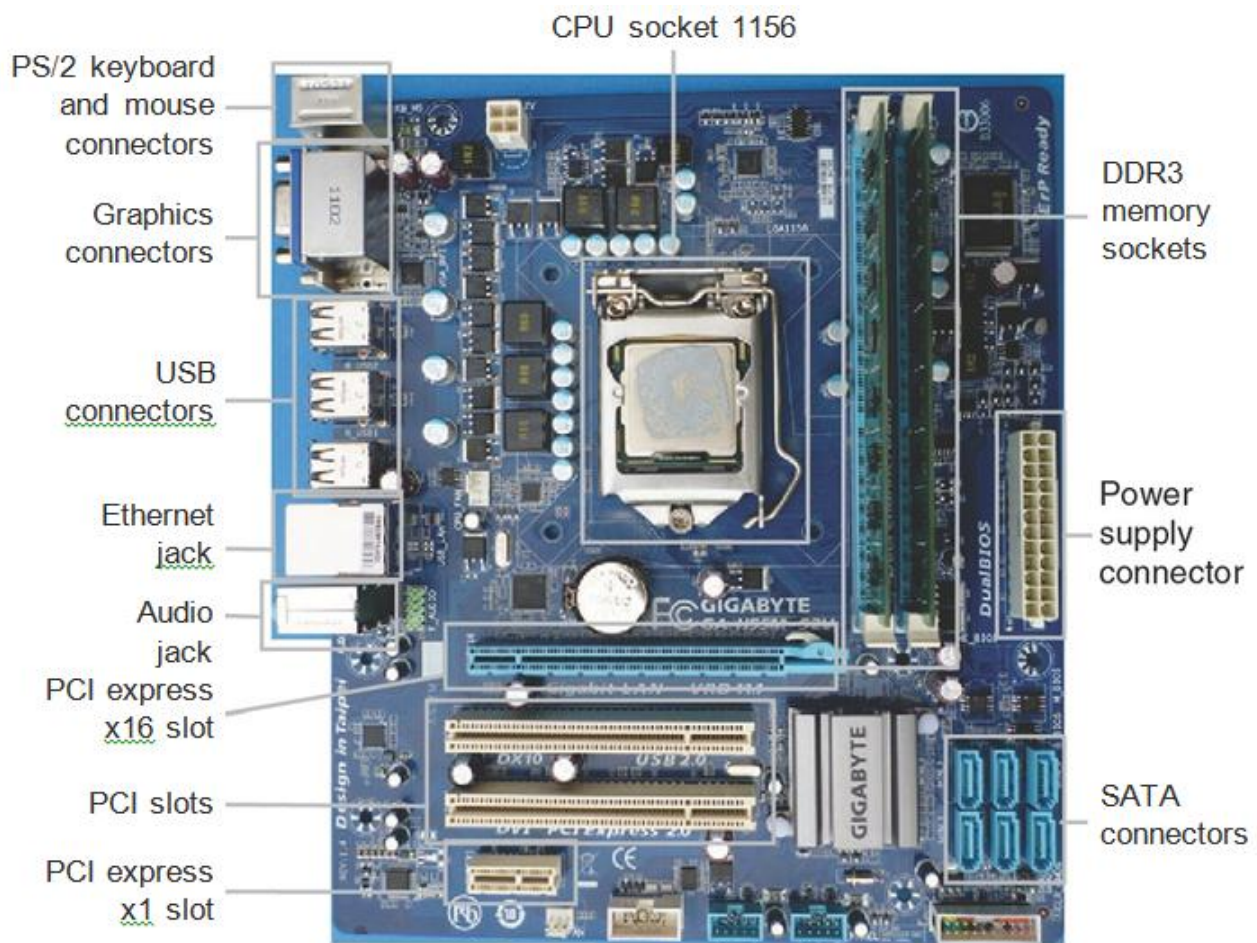


Рис. 8

Одним з головних досягнень в стандартах введення-виведення ПК є розробка високошвидкісних послідовних інтерфейсів. До сьогодення більшість інтерфейсів були паралельними.

Послідовні інтерфейси «точка-точка» вирішують безліч проблем. Дані зазвичай передаються по диференціальній парі. Зовнішній шум впливає на обидва провідники в парі, і, таким чином, перестає впливати на переданий сигнал. Лінії передачі простіше з'єднувати, так як віддзеркалення малі. Тактуючий сигнал не подається в явному вигляді; замість цього, приймач відновлює його за часом перемикавання даних (з 0 в 1 і з 1 в 0). Хороші інтерфейси

можуть працювати на швидкостях понад 10 Гбіт / с по мідним провідниках, а по оптоволокну - навіть швидше.

USB

Універсальна послідовна шина (USB), розроблена компаніями Intel, IBM, Microsoft і іншими, значно спростила додавання периферійних пристроїв завдяки стандартизації кабелів і процесу конфігурації програмного забезпечення.

Стандарт USB 2.0, випущений у 2000 році, підняв швидкість передачі даних до 480 Мбіт / с шляхом збільшення швидкості роботи диференціальної пари. Після підвищення продуктивності стало можливим підключення веб-камер і зовнішніх жорстких дисків. Flash-накопичувачі з інтерфейсом USB також замінили гнучкі магнітні диски (дискети) як засіб передачі файлів між комп'ютерами.

Стандарт USB 3.0, випущений в 2008 році, приніс ще більше збільшення швидкості передачі даних до 5 Гбіт / с. Він використовує ту ж форму роз'єму, але кабель має більше провідників, сигнал з яких передається на дуже високій швидкості. Він краще підходить для підключення високопродуктивних жорстких дисків. Приблизно в той же час стандарт специфікований для можливості заряду акумуляторних батарей, тим самим збільшивши потужність, що подається на порт.

PCI і PCI Express

Шина зв'язку периферійних пристроїв (PCI) є стандартом шин розширення, розробленим компанією Intel який став широко поширеним з 1994 року. Даний інтерфейс використовувався для додавання плат розширення, таких як додаткові порти послідовного введення-виведення або USB-порти, мережеві інтерфейси, звукові карти, модеми, дискові контролери або відеокарти. Інтерфейс являє собою 32-розрядну паралельну шину, що працює на частоті 33 МГц і забезпечує смугу пропускання в 133 Мбайт / с.

На сучасних материнських платах досі часто можна зустріти невелику кількість слотів PCI, але високопродуктивні пристрої, такі як відеокарти, підключаються через PCI Express (PCIe). Слоти PCI Express містять одну або кілька ліній високошвидкісного послідовного інтерфейсу. Відповідно до стандарту PCIe 3.0 кожна лінія може забезпечити пропускну здатність до 8 Гбіт / с. На більшості материнських плат розташовується слот з 16-ма лініями, в сумі забезпечують смугу пропускання в 16 Гбайт / с для ресурсномістких пристроїв, таких як відеокарти.

Мережа

Комп'ютери з'єднуються з Інтернетом через мережевий інтерфейс по протоколу TCP/IP. Фізичне з'єднання може здійснюватися за допомогою Ethernet-кабелю або бездротової мережі Wi-Fi.

Ethernet визначається стандартом IEEE 802.3. Він був розроблений в дослідницькому центрі Херох PARC в 1974 році. Спочатку він працював на швидкості 10 Мбіт / с, але тепер - зазвичай на 100 Мбіт / с і на 1 Гбіт / с. Сигнал передається по кабелях категорії 5, що містить 4 виті пари. 10-Гігабітний Ethernet, що працює на оптоволоконних кабелях, стає все популярнішим для

серверних і інших високопродуктивних обчислень, на даний час все частіше з'являється Ethernet 100 Гбіт.

Wi-Fi - популярна назва бездротового мережевого стандарту IEEE 802.11. Він працює в діапазонах неліцензованого бездротового зв'язку на частотах 2,4 і 5 ГГц. Це означає, що користувачеві не потрібно отримувати ліцензію радіооператора для передачі в цих діапазонах на низькій потужності.

Поява стандарту 802.11ac обіцяє збільшення швидкості бездротової передачі даних аж до 1 Гбіт / сек. Збільшення продуктивності відбувається шляхом поліпшення модуляції і обробки сигналу, збільшення числа антен і використання більш широкої смуги пропускання.

SATA

Внутрішні жорсткі диски вимагають швидкого з'єднання з ПК. У 1986 році компанія WD представила інтерфейс IDE (Integrated Drive Electronics), який був включений в стандарт з'єднання ATA. Стандарт використовує широкий шлейф з 40 або 80 провідниками з максимальною довжиною 18 " (45 см) для передачі даних зі швидкостями від 16 до 133 Мбайт / с.

Стандарт ATA був витіснений стандартом Serial ATA, що є високошвидкісним послідовним інтерфейсом. Інтерфейс працює на швидкостях 1,5, 3 або 6 Гбіт / с, а підключення відбувається через більш зручний 7-жильний кабель.

Пов'язаний з SATA стандарт - стандарт SAS (Serial Attached SCSI) - результат еволюції паралельного інтерфейсу SCSI (Small Computer System Interface). SAS пропонує порівнянну з SATA продуктивність і підтримує довші кабелі. Цей інтерфейс зазвичай застосовується в серверних комп'ютерах.