

## **Тема 10 Мікроконтролери**

*10.1. Загальні відомості про мікроконтролери*

*10.2. Основи архітектури мікроконтролерів*

*10.3. Пам'ять мікроконтролерів і їх програмування*

*10.4 Сімейства MCS-48, MCS-51 і їх модифікації*

### **10.1. Загальні відомості про мікроконтролери**

Більшість сучасних цифрових систем управління реалізуються на базі мікроконтролерів (МК) – спеціалізованих мікропроцесорних пристроїв, орієнтованих на виконання керуючих функцій. Інтегруючи на одному кристалі високопродуктивний процесор, пам'ять і набір периферійних пристроїв, мікроконтролери дозволяють з мінімальними витратами реалізувати високоефективні системи і пристрої управління.

В даний час однокристальні мікроконтролери є найбільш масовими представниками мікропроцесорної техніки, обсяг випуску яких становить близько 2,5 млрд. штук на рік. Їх виробництвом займається ряд фірм (Intel, Motorola, Philips, Siemens, Atmel, Dallas, Temic, Oki, AMD і ін.), які надають споживачам більшу номенклатуру виробів, починаючи з простих 8-розрядних моделей і закінчуючи 32-розрядними пристроями, ядром яких служать CISC-iRISC-процесори.

У виробках масового застосування найбільшого поширення набули 8-розрядні однокристальні мікроконтролери, які мають практично однакове обчислювальне ядро, але відрізняються обсягом і типом внутрішньої пам'яті, номенклатурою розміщених на кристалі периферійних пристроїв і низкою технічних характеристик. Біля витоків виробництва мікроконтролерів стоїть фірма Intel з родинами восьмирозрядних мікроконтролерів MCS-48 і MCS-51.

Перші модифікації MCS-48/51 були виконані поп-MOS технології і були функціонально завершеними однокристальними мікроЕОМ гарвардської архітектури, один з основних принципів якої складається в логічному поділі адресних просторів пам'яті програм і даних. Подальші версії контролерів MCS-51 стали виготовляти за більш досконалої і нізкопотребуючої CMOS технології.

На сьогоднішній день існує понад 200 модифікацій мікроконтролерів сімейства MCS-51, що випускаються майже 20-ма компаніями.

Ці модифікації включають в себе кристали з найширшим набором периферії: від простих 20-вивідних МК з одним таймером і резидентної пам'яті програм об'ємом 1 Кбайт до складних 100-вивідних кристалів з 10-розрядними АЦП, масивами таймерів / лічильників, апаратними 16-розрядними множниками і резидентною пам'яттю програм до 64 Кбайт.

Щороку з'являються все нові варіанти представників сімейства MCS-51 з підвищеною швидкістю, зниженим енергоспоживанням, великим об'ємом пам'яті, а також з можливістю підключення складних периферійних пристроїв на основі CAN і USB інтерфейсів.

В даному курсі лекцій розглядається архітектура типових представників сімейств мікроконтролерів MCS-48 і MCS-51, а також наводяться рекомендації щодо їх використання в цифрових системах управління.

## **10.2. Основи архітектури мікроконтролерів**

### *Основні типи мікроконтролерів*

Мікроконтроллер- це пристрій, виконаний за технологією БІС і об'єднує на одному кристалі мікропроцесор, пам'ять, порти вводу-виводу, а також засоби підтримки роботи в реальному масштабі часу (таймери, обробники переривань і т.д.).

У однокристальних мікроконтролерах використовується Гарвардська архітектура. Згідно з її концепціям пам'ять програм і пам'ять даних мають роздільні адресні простори, при зверненні до яких використовуються різні механізми адресації. Вміст пам'яті програм формується або на заводі-виробнику або з використанням програматора користувача.

Сучасні мікроконтролери можна розділити на три основні типи:

а) вбудовуються 8-розрядні мікроконтролери; б) 16- і 32-розрядні мікроконтролери; в) цифрові сигнальні процесори. У вбудованих мікроконтролерах всі необхідні ресурси (пам'ять, таймери, порти вводу-виводу і т.д.) розташовуються на одному кристалі з процесорним ядром, завдяки чому забезпечується їх включення в систему управління з використанням мінімальної кількості додаткових компонентів. Для них характерні невеликі за сучасними поняттями обсяги пам'яті програм (ROM об'ємом от 1 до 128 Кбайт) і пам'яті даних (RAM об'ємом от 64 байт до 4 Кбайт). Крім того, зазвичай виключається можливість запису в пам'ять програм, що зменшує ймовірність помилок, і є захистом від несанкціонованого копіювання вмісту цієї пам'яті. Типовий мікроконтролер для вбудованих додатків споживає струм від мікроампер до десятка міліампер і зазвичай працює в температурному діапазоні від -55 до +125 ° С. Програмуються такі контролери на мовах асемблер іліС.

У більш складних мікроконтролерах (16- і 32-розрядних) використовують тільки зовнішню пам'ять, яка включає в себе як пам'ять програм (ROM), так пам'ять даних (RAM). Вони застосовуються в системах, де потрібен великий обсяг пам'яті і відносно невелика кількість

пристроїв (портів) введення / виведення. Типовим прикладом застосування такого МК із зовнішньою пам'яттю є контролер жорсткого диска (HDD) з буферної кеш-пам'яттю, який забезпечує проміжне зберігання і розподіл великих обсягів даних (порядку декількох мегабайт). Зовнішня пам'ять дозволяє такому мікроконтролеру працювати з більш високою швидкістю, ніж вбудований МК.

Цифрові сигнальні процесори (DSP) призначені для цифрової обробки аналогових сигналів, тобто для вирішення завдань, які традиційно вирішувала аналогова схемотехніка. Вони забезпечують введення даних від аналогового джерела, їх обробку і формування відповідного входу в реальному масштабі часу. До сигнальних процесорів пред'являються специфічні вимоги. Від них потрібні максимальну швидкість, малі габарити, легка стиковка з аналого-цифровими і цифро-аналоговими перетворювачами, велика розрядність оброблюваних даних і невеликий набір математичних операцій, обов'язково включає операцію множення-накопичення і апаратну організацію циклів. На процесорах такого типу зроблено більшість модемів, а також різні системи

обробки звуку і відео.

Для підключення зовнішніх пристроїв в мікроконтролерах застосовуються як паралельні порти введення / виводу, так і послідовні шини типу I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit bus) чи SPI (serial peripheral interface). Завдяки цим шинам для підключення периферійних мікросхем до процесора досить двох-трьох ліній. Відповідно, зменшується число висновків мікросхем, дозволяючи зменшити габарити пристроїв, підвищити надійність і спростити розробку пристроїв.

Слід також розрізняти CISC і RISC-мікроконтролери. Команди RISC-процесорів дуже прості і майже завжди виконуються за один такт. Для реалізації операції, оброблюваної CISC-процесором як одна команда, RISC повинен виконати послідовність мікрокоманд. Гідністю CISC-мікроконтролерів є скорочений обсяг програмного коду і економія зусиль програміста, витрачених на його написання. Однак RISC-процесори продуктивніше, займають менше місця на кристалі і споживають значно менше енергії, ніж CISC. Тому останнім часом з'являється все більше типів мікроконтролерів з RISC-архітектурою.

### **10.3 Пам'ять мікроконтролерів і їх програмування**

У мікроконтролерах використовується три основних види пам'яті: пам'ять програм, пам'ять даних, регістри. Пам'ять програм являє собою постійну пам'ять, призначену для зберігання програмного коду і констант. Вона не змінює вмісту в процесі виконання програми.

Пам'ять даних призначена для зберігання змінних в ході виконання програми. Регістри включають внутрішні регістри процесора і регістри, використовувані для управління периферійними пристроями. Варто зауважити, що в мікроконтролерах сімейств MCS-48/51 в якості регістрів використовується спеціальна область внутрішньої (резидентної) пам'яті даних. Крім того, поряд з внутрішньою пам'яттю більшість мікроконтролерів можуть використовувати і зовнішню пам'ять програм і даних.

Для зберігання програм зазвичай служить один з видів постійної пам'яті: ROM (масочний ПЗУ), PROM (одноразово програмовані ПЗП), EPROM (Електрично програмовані ПЗП з ультрафіолетовим стиранням) або EEPROM (ПЗУ з електричною записом і стиранням, до цього виду також відносяться сучасні мікросхеми Flash-пам'яті). Всі ці види пам'яті є незалежними, тобто вміст такої пам'яті зберігається після вимкнення живлення.

Для програмування мікроконтролерів (тобто. Записи в них програм) зазвичай використовуються спеціальні пристрої-програматори, що підключаються до персонального комп'ютера. Винятком є мікроконтролери з ROM-пам'яттю, програмування яких здійснюється в процесі виготовлення.

Однак в даний час програмування EEPROM-пам'яті можна здійснювати і безпосередньо на платі проектного або вже готового пристрою. Такий спосіб отримав назву-ISP (In System Programming), він дозволяє оновлювати програмне забезпечення мікроконтролера без видалення з плати, що дає велику економію часу на етапі розробки.

Останні моделі мікроконтролерів містять встроєну Flash-пам'ять, яка функціонально мало відрізняється від EEPROM. Основна відмінність полягає в здатності стирання записаної інформації. У пам'яті EEPROM стирання проводиться окремо для кожного осередку, а у Flash-пам'яті стирання здійснюється цілими блоками.

Для зберігання даних використовується RAM - оперативний запам'ятовуючий пристрій. Число циклів читання і запису в такій пам'яті необмежено, але при відключення живлення вся інформація втрачається.

#### *Живлення і управління енергоспоживанням*

Перші мікроконтролери були розраховані на напругу живлення 5В. Однак останнім часом з'являється все більше пристроїв з номінальною напругою 3,3В і менш. Це пов'язано в першу чергу з розширенням сфери застосування мікроконтролерів в пристроях з автономним живленням.

Крім того, у багатьох мікроконтролерах передбачена можливість управління споживаної потужності, шляхом їх переведення програмними

засобами в режим ходу або режим зупинки. Режим холостого ходу характеризується тим, що робота процесорного ядра припиняється, в робочому стані залишаються лише генератор синхросигналов і сторожовий таймер. Регістри зберігають своє значення. Вихід з цього режиму можливий за переривання або за сигналом скидання. Також може бути передбачений спеціальний таймер холостого режиму, який періодично "пробуджує" мікроконтролер для виконання активних дій. У цьому режимі мікроконтролер споживає близько 30% номінальної потужності. В режимі зупинки робота всередині кристала повністю зупинена. Вихід з режиму можливий за сигналом скидання (іноді по сигналу зовнішнього переривання). В режимі зупинки споживаний струм може досягати 1 мкА і менш.

#### **10.4 Сімейства MCS-48, MCS-51 і їх модифікації**

##### *Мікроконтролери фірми Intel*

Мікроконтролери Intel 8048 і 8051, виготовлені за технологією n-MOS, заклали основу архітектури однокристальних пристроїв сімейств MCS-48 і MCS-51. Наступним важливим етапом став перехід на CMOS-технологію (модифікація 8xC51), що дозволило реалізувати режими Idle (Холостий хід) і PowerDown (знижене енергоспоживання). Надалі фірмою Intel були випущені мікроконтролери 8xC51FA / FB / FC і 8xC51RA / RB / RC з вбудованими спеціалізованими таймером / лічильником (PCA) і сторожовим таймером (WDT), що дозволяють істотно знизити час реакції на зовнішні події. Архітектура цих мікроконтролерів виявилася настільки вдалою, що стала промисловим стандартом. Спочатку найбільш "вузькими" місцями MCS-51 були 8-розрядне АЛУ і досить великий час виконання команд (12 тактів). Для усунення цих недоліків було створено сімейство мікроконтролерів MCS-251/151, які забезпечують адресацію до 16 Мбайт пам'яті і виконують 16-бітні арифметичні і логічні операції за 2 такти. Система команд MCS-251 включає два набори інструкцій - перший набір є копією системи команд MCS-51, а другий - містить розширені інструкції, що реалізують переваги архітектури MCS-251. Перед використанням мікроконтролера його необхідно конфігурувати, тобто визначити, який з наборів стане активним після включення живлення. Для користувачів, орієнтованих на застосування MCS-251 в якості заміни MCS-51, випускаються мікроконтролери MCS-151, вже запрограмовані на активізацію системи команд MCS-51.

У системах управління також широко використовуються 16-розрядні мікроконтролери сімейства MCS-96, засновані на дещо іншій архітектурі. Базовий представник цього сімейства 8096 включає 16-розрядний

процесор, 8 Кбайт внутрішньої програмної пам'яті з можливістю зовнішнього розширення до 64 Кбайт, 232 байта ОЗУ з можливістю зовнішнього розширення до 64 Кбайт, розвинені засоби в режимі реального часу, швидкісне введення-виведення. Він дозволяє здійснювати операції в форматах "байт" (8 біт), "слово" (16 біт), а також "подвійне слово" (32 біт).

Такі мікроконтролери мають удосконалену систему команд, а також різноманітністю вбудованої периферії (паралельні і послідовні порти, блоки процесорів подій, багатоканальні аналого-цифрові перетворювачі, широтно-імпульсні модулятори, трифазні генератори, генератори меандру, сторожові таймери і ін.). Типові області застосування для цих мікроконтролерів- управління двигунами, модеми, контролери жорстких і оптичних дисків.

#### *Мікроконтролери фірми Philips*

Фірма Philips виробляє понад 100 модифікацій сімейства MCS-51, в склад яких входять мікроконтролери в корпусах від 24 до 80 висновків, що працюють при тактовій частоті до 40 МГц і напрузі живлення від 1,8 В.

Вироби цієї фірми орієнтовані на ринок побутової електроніки. У таких мікроконтролерах використовується стандартне ядро MCS-51, доповнене широким набором периферії, серед якої слід відзначити: 10-розрядні АЦП; 8-розрядний ЦАП; широтно-імпульсні модулятори; масиви програмованих таймерів / лічильників; інтерфейси I2C, CAN; спеціалізовану периферію для телевізійної, відео- і аудіотехніки.

Крім того, Philips випускає мікроконтроллери MCS-51, що володіють функцією зниження електромагнітних завад (Lower EMI).

Нове оригінальне рішення Philips з розвитку архітектури сімейства MCS-51 реалізовано в сімействі мікроконтролерів 51XA ( "розширена архітектура 51"). При цьому розробники вирішили відмовитися від досягнення сумісності кодів команд нового мікроконтролера с8051. Таке рішення, з одного боку, унеможливило пряму заміну мікроконтроллера MCS-51 на мікроконтролер сімейства 51XA, але з іншого боку дозволило створити повноцінне 16-розрядне ядро, що забезпечує майже 100-кратне збільшення швидкодії в порівнянні з традиційною архітектурою MCS-51.

#### *Мікроконтролери фірми Atmel*

Фірма Atmel є одним зі світових лідерів з виробництва одно кристальних мікроконтролерів. Архітектура MCS-51 реалізована в її контролерах сімейства AT89, які мають вбудовану Flash-пам'ять для зберігання програм і даних, а також мають можливість внутрішньосхемного програмування (завантаження програмного коду) по послідовному інтерфейсу. Є також модифікації мікроконтролерів цього

сімейства, конструктивно виконаних у 20-вивідних корпусах (замість стандартних 40-вивідних). Крім того, випускаються мікроконтролери з архітектурою MCS-51, які програмуються на замовлення покупця на підприємстві-виробнику (сімейство AT80) або допускають лише одноразове програмування користувачем (сімейство AT87).

В даний час більш широке поширення набувають нові вироби фірми Atmel - 8-розрядні мікроконтролери з AVR-ядром і 32-розрядні контролери з ARM-ядром. Вони побудовані на базі RISC-процесорів і мають більш високу продуктивність, ніж MCS-51 при меншому енергоспоживанні.

AVR-архітектура реалізована в сімействі AT90 і об'єднує 8-розрядний гарвардський RISC-процесор, 32 регістра загального призначення, кожен з яких може працювати як акумулятор, і розвинену систему команд фіксованої 16-бітної довжини. Більшість команд виконуються за один машинний такт з одночасним виконанням поточної і вибіркою наступної команди, що забезпечує продуктивність до 1 MIPS на кожен МГц тактової частоти.

Всі мікроконтроллери AVR мають вбудовану Flash-пам'ять з можливістю внутрішньосхемного програмування через послідовний 4-провідний інтерфейс. Їх периферія включає: таймери-лічильники, широтно-імпульсні модулятори, підтримку зовнішніх переривань, аналогові компаратори, 10-розрядний 8-канальний АЦП, паралельні порти (від 3 до 48 ліній введення і виведення), інтерфейси UART і SPI, вартовий таймер і пристрій скидання по включенню живлення. Є три підродини таких мікроконтролерів (tiny AVR, classic AVR і mega AVR), що відрізняються продуктивністю і об'ємом пам'яті.

ARM-архітектура реалізована в сімействі AT91 і заснована на 32-розрядному RISC-процесорі. Мікроконтролери цього сімейства відрізняються найбільш високою продуктивністю і випускаються з різними комбінаціями RAM, ROM і Flash-пам'яті. Їх перевагою є також наявність EBI-інтерфейсу (External Bus Interface), що забезпечує високошвидкісний доступ до додаткової зовнішньої пам'яті і зовнішнім периферійних пристроїв.

#### *Мікроконтролери фірми Analog Devices*

У пристроях обробки аналогових сигналів широко застосовуються мікроконтроллери ADuC8xx з вбудованим прецизійними АЦП і ЦАП сімейства MicroConverter фірми Analog Devices. У цих виробах використовується процесорне ядро 8051 / 52, вбудована Flash-пам'ять і блок введення-виведення аналогової інформації, що включає багатоканальні ЦАП і АЦП з розрядністю 12 біт і більше. Є також

вбудований датчик температури і джерело опорного напруги з функціями термостабілізації.

Як типовий приклад наведемо технічні характеристики мікроконтролера ADuC812, званого також "однокристальною системою збору даних". Це пристрій виконаний в B52-вивідному корпусі і має 8-розрядний мікропроцесор з тактовою частотою 12-16 МГц і системою команд MCS-51, 8 Кбайт резидентної Flash-пам'яті програм, 640 байт резидентної Flash-пам'яті даних і 256 байт резидентної RAM-пам'яті даних. Є також можливість адресації до 16 Мбайт зовнішньої пам'яті даних і до 64 Мбайт зовнішньої пам'яті програм. Аналоговий інтерфейс включає в себе 8-канальний прецизійний 12-розрядний АЦП з швидкодією 5 мкс, два 12-розрядних ЦАП, DMA контролер для передачі даних від АЦП в пам'ять.

Вбудовані периферійні модулі забезпечують послідовну передачу даних через порти типу UART, SPI і I<sup>2</sup>C. Живлення здійснюється від джерела з напругою від 3 до 5 В, є схема стеження за напругою живлення і два режими зниженого енергоспоживання. Нові продукти цієї фірми ADuC702x засновані на 32-розрядному процесорному ARM-ядрі і мають розширений набір аналогових входів-виходів. Вони призначені для застосування в бортовій автоелектроніці і промисловій автоматичності, що забезпечується апаратною підтримкою шин типу LIN і LIN, а також простотою сполучення з електромагнітними, ультразвуковими і оптичними датчиками положення.

#### *PIC-мікроконтролери фірми Microchip*

Мікроконтролери типу PIC (Peripheral Interface Controller) з'явилися в кінці 80-х років і склали серйозну конкуренцію контролерам MCS-51. В їх основу була покладена 8-розрядна RISC-архітектура з системою простих однослівних команд (в базовій моделі PIC16C5x використовується тільки 33 команди). Всі команди (крім команд переходу) виконуються за один машинний цикл (чотири такти). Відмінною особливістю PIC-мікроконтролерів, реалізованих за CMOS-технології, є низька енергоспоживання: 2 мА при живленні 5 В на тактовій частоті 4 МГц; 15 мкА при живленні 3 В на тактовій частоті 32 кГц і менш 3 мкА в режимі очікування. Діапазон напруг живлення становить від 2 В до 6 В. Це обумовлює широке застосування таких мікроконтролерів в портативних приладах з батарейним живленням.

В даний час Microchip випускає чотири основних сімейства 8-розрядних PIC-мікроконтролерів, програмно сумісних від низу до верху:

PIC15Cx - базове сімейство з 12-розрядними командами і мінімальною периферією;



PIC12Cxxx - сімейство з 12-розрядними командами, яке випускається в мініатюрному 8-вивідному виконанні;

PIC16x / 7x / 8x / 9x - середнє сімейство з 14-розрядними командами, засобами аналогового вводу / виводу, контролерами SPI, USART і I2C;

PIC17C4x / 5xx - високопродуктивне сімейство з 16-розрядними командами, збільшеним об'ємом пам'яті, розвиненою системою введення / виведення і підвищеною тактовою частотою (до 33 МГц).

Перспективне п'яте сімейство PIC-контролерів PIC18Cxxx матиме розширене RISC-ядро, оптимізоване під використання нового Сі-компілятора, адресний простір програм до 2 Мбайт, до 4 Кбайт вбудованої пам'яті даних і продуктивністю 10 млн. операцій в секунду.