

Лекція 1 ОДНОКРИСТАЛЬНІ МІКРОКОНТРОЛЕРИ AVR З RISC-АРХІТЕКТУРОЮ

1. Загальна характеристика мікроконтролерів AVR

Atmel Corporation — виробник напівпровідникових електронних компонентів. Компанія заснована в 1984 році. Була одним з лідерів у виробництві напівпровідників (флеш-пам'ять, EEPROM, мікроконтролери з ядром MCS-51 та ARM, а також мікроконтролери власної архітектури AVR та AVR32). Також розробляє та виготовляє невеликі модулі енергонезалежної пам'яті для електронних виробів, ПЛІС, цифрові мікросхеми-радіоприймачі та передавачі, сканери відбитків пальців. Компанія може запропонувати клієнтам систему на кристалі, яка об'єднує потрібні компоненти.

Продукцію Atmel використовують в комп'ютерних мережах, промисловості, медицині, зв'язку, автомобілях, космосі, воєнних пристроях, а також у смарт-картках.

Перший мікроконтролер Atmel з'явився в 1993 році та базувався на класичному ядрі Intel 8051. Продукція Atmel включає мікроконтролери серій AT89 (архітектура Intel MCS-51), AT91(архітектура ARM), мікроконтролери на власних ядрах AVR та AVR32, радіочастотні (RF) пристрої, мікросхеми пам'яті типів EEPROM та флеш.

У січні 2016 року фірма Microchip купила Atmel за 3,56 млрд доларів.

AVR-мікроконтролери – один із найцікавіших напрямків, що розвивався корпорацією Atmel. Обсяги продажу AVR у світі подвоюювались щорічно, неухильно росте число сторонніх фірм, що випускають програмні й апаратні засоби підтримки розробок для цих мікроконтролерів. Можна вважати, що AVR поступово стає ще одним промисловим стандартом серед 8-розрядних мікроконтролерів загального

призначення. В даний час виробляється три родини AVR – tiny, mega й XMEGA, що відрізняються ємністю масивів пам'яті Flash, EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) і SRAM (Static Random Access Memory), набором периферійних вузлів і побудовою схеми синхронізації. Родину classic знято з виробництва, але вона й досі широко використовується в багатьох розробках.

До цього часу було виготовлено велику кількість мікроконтролерів родини classic, які широко використовуються в сучасних мікропроцесорних пристроях і розглядаються у деяких прикладах. Суттєвої різниці між родинами mega та classic немає.

AVR являє собою 8-розрядний RISC-мікроконтролер (RISC – Reduced Instruction Set Computer), що має швидке процесорне ядро, Flash-пам'ять програм, пам'ять даних SRAM, порти введення/виведення і інтерфейсні схеми. Гарвардська архітектура AVR реалізує повне логічне і фізичне розділення не тільки адресних просторів, але й шин даних для звертання до ROM і SRAM. Така побудова подібна до структури цифрових сигнальних процесорів і забезпечує істотне підвищення продуктивності. Використання дворівневого конвеєра в AVR також помітно скоротило цикл «вибірка-виконання» команди. Наприклад, у стандартних мікроконтролерів родини MCS-51 коротка команда виконується за 12 тактів генератора (1 машинний цикл), протягом якого процесор послідовно зчитує код операції і виконує її. У мікроконтролерах AVR коротка команда в загальному потоці теж виконується за один машинний цикл, але він триває тільки один період тактової частоти. Відмітною рисою архітектури AVR є регістровий файл швидкого доступу, що містить 32 байтових регістри загального призначення. Шість регістрів файлу можуть використовуватися як три 16-розрядних регістри-вказівники адреси при

непрямій адресації даних (індексні регістри X, Y і Z), що істотно підвищує швидкість пересилання даних при роботі прикладної програми.

Flash-пам'ять програм AVR можна завантажувати як за допомогою звичайного програматора, так і за допомогою інтерфейсу SPI (Serial Peripheral Interface), зокрема безпосередньо на робочій платі – функція ISP (In-System Programming). Останні версії кристалів родини mega мають можливість самопрограмування (функція SPM). Усі AVR мають також блок енергонезалежної пам'яті даних EEPROM, доступний програмі мікроконтролера безпосередньо в ході її виконання. EEPROM звичайно використовується для збереження проміжних даних, констант, таблиць перекодувань, калібрувальних коефіцієнтів і т.ін. Цю пам'ять можна завантажити ззовні як через SPI-інтерфейс, так і за допомогою звичайного програматора. Два програмованих біти дозволяють захистити ROM і енергонезалежну пам'ять даних EEPROM від несанкціонованого доступу. Внутрішня оперативна пам'ять SRAM є в родині mega, а також в одного представника tiny – ATtiny26/L. До деяких мікроконтролерів можна під'єднати зовнішню пам'ять даних ємністю до 64 Кб.

Внутрішній тактовий генератор AVR може запускатися від зовнішнього генератора або кварцового резонатора, а також від внутрішнього або зовнішнього RC-ланцюга. Усі AVR повністю статичні, їх мінімальна робоча частота не обмежується (аж до покрокового режиму). Мікроконтролер ATtiny15L має додатковий блок PLL (Phase-Locked Loop) для апаратного збільшення основної тактової частоти в 16 разів. При її номінальному значенні 1,6 МГц одержувана допоміжна периферійна частота дорівнює 25,6 МГц. Ця частота може служити джерелом для одного з таймерів/лічильників мікроконтролера, значно підвищуючи точність його роботи. Мікроконтролери ATmega64/103/128 також мають цікаву архітектурну особливість, що дозволяє значно знизити

енергоспоживання кристала в цілому, коли в процесі роботи доцільно понизити основну тактову частоту мікросхеми. Спеціальний передподільник на кристалі дозволяє ділити основну частоту на ціле число в діапазоні від 2 до 256. Вимкнення/увімкнення даної функції здійснюється програмно.

Мікроконтролери AVR мають від 1 до 6 таймерів/лічильників загального призначення з розрядністю 8 або 16 біт.

Загальні риси всіх таймерів/лічильників наступні:

- наявність програмованого перед подільника вхідної частоти з різними коефіцієнтами ділення. Відмітною рисою є можливість роботи таймерів/лічильників на основній тактовій частоті мікроконтролера без попереднього її зниження, що помітно підвищує точність формування часових інтервалів системи;

- незалежне функціонування від режиму роботи процесорного ядра мікроконтролера (тобто їх можна як зчитати, так і завантажити новим значенням у будь-який час);

- можливість роботи або від зовнішнього джерела опорної частоти, або як лічильник зовнішніх подій. Верхній частотний поріг визначено у цьому випадку як половина основної тактової частоти мікроконтролера. Вибір перепаду зовнішнього джерела (фронт або зріз) програмується користувачем;

- наявність різних векторів переривань для подій «переповнення вмісту», «захоплення», «порівняння».

Вартовий (сторожовий) таймер у AVR має свій власний RC-генератор з частотою 1 МГц, яка залежить від величини напруги живлення мікроконтролера та температури. Вартовий таймер містить окремий програмований перед подільник вхідної частоти, що дозволяє підлаштовувати часовий інтервал переповнення таймера і скидання

мікроконтролера. Даний таймер можна програмно відключати під час роботи мікроконтролера як в активному режимі, так і в кожному з режимів зниженого енергоспоживання. В другому випадку це призводить до значного зниження струму, що споживається.

У мікроконтролерах родини mega реалізовано систему реального часу (RTC). Таймер/лічильник RTC (Real-Time Clock) має окремий передподільник, що може бути програмним способом підключений або до джерела основної тактової частоти або до додаткового асинхронного джерела опорної частоти (кварцовий резонатор або зовнішній синхросигнал). Для цієї мети зарезервовано два виводи мікросхеми. Внутрішній осцилятор, що оптимізований для роботи з зовнішнім «годинниковим» кварцовим резонатором 32,768 кГц, підключено до лічильного входу таймера/лічильника RTC.

Порти введення/виведення AVR мають число незалежних ліній вхід/вихід від 3 до 86. Вихідні драйвери забезпечують номінальну навантажувальну здатність 20 мА на лінію порту (вхідний струм) при максимальному значенні 40 мА, що дозволяє безпосередньо підключати до мікроконтролера світлодіоди і біполярні транзистори. Побудова портів введення/виведення AVR із трьома бітами контролю/керування (замість двох, як це зроблено в більшості 8-розрядних мікроконтролерів) дозволяє розробнику повніше контролювати процес введення/виведення, усуває необхідність мати копію вмісту порту в пам'яті для безпеки і підвищує швидкість роботи мікроконтролера при роботі з зовнішніми пристроями. Особливого значення набуває дана можливість AVR при реалізації систем, що працюють в умовах зовнішніх електричних завад.

До складу більшості AVR-мікроконтролерів входить аналоговий компаратор. Він має окремий вектор переривання в загальній системі переривань мікроконтролера. Тип перепаду, що викликає запит на

переривання при спрацьовуванні компаратора, може бути запрограмований як фронт, зріз або зміна стану виходу компаратора. Важливою апаратною особливістю є те, що логічний вихід компаратора можна програмним чином підключити до входу одного з 16-розрядних таймерів/лічильників, що працює в режимі захоплення. Це дає можливість вимірювати тривалості аналогових сигналів, а також реалізовувати АЦП двотактного інтегрування.

Аналого-цифровий перетворювач побудовано за схемою АЦП послідовного наближення з пристроєм вибірки/зберігання. Число незалежних каналів перетворення визначається типом мікроконтролера. Розрядність АЦП становить 10 біт. За допомогою встановлення коефіцієнта дільника частоти, що входить до складу блоку АЦП, час перетворення встановлюється програмно. Важливою особливістю аналого-цифрового перетворювача є функція приглушення шуму при перетворенні, коли на точність не впливають завади, що виникають при роботі процесорного ядра.

AVR-мікроконтролери можна програмно перевести в один із шести режимів зниженого енергоспоживання. Для різних родин AVR і різних мікроконтролерів у межах кожної родини змінюється кількість і реалізоване поєднання доступних режимів зниженого енергоспоживання.

Система команд AVR є досить розвинута і нараховує до 118 (а в останніх розробках і до 137) різних інструкцій. Майже всі команди мають фіксовану довжину в одне слово (16 біт), що дозволяє в більшості випадків поєднувати в одній команді і код операції, і операнд(и). В останніх версіях кристалів mega реалізовано функцію апаратного множення. За різноманітністю і кількістю інструкцій AVR більше схожі на CISC (Complex Instruction Set Computer), ніж на RISC-процесори. Наприклад, у

РІС-контролерів система команд нараховує до 75 різних інструкцій, а в MCS-51 вона становить 111.

AVR функціонують у широкому діапазоні споживаної напруги – від 1,8 до 6,0 В. Температурні діапазони роботи – комерційний (0°C – +70°C) і промисловий (-40°C – +85°C).

Корпорація Atmel планує подальший розвиток AVR. Винятком є лише функціонально-збалансована родина classic. У родині tiny з'явився цікавий мікроконтролер – ATtiny26, що має у своєму складі блок SRAM ємністю 128 байт і модуль USI (Universal Serial Interface). Модуль USI налаштовується програмним чином для роботи як комунікаційний інтерфейс SPI або I²C (Inter-Integrated Circuit). Додатково USI можна запрограмувати як напівдуплексний UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) або 4/12-розрядний лічильник. Але найбільш прогресивні рішення реалізовані в родині mega, де почато серійний випуск цілого ряду кристалів за технологією 0,35 мкм. Ємність Flash-пам'яті програм з функціями ISP і само програмування у нових mega варіюється від 4 до 256 Кб, а випускаються вони в корпусах MLF, DIP і TQFP з кількістю виводів від 28 до 100. Усі нові мікроконтролери родини mega мають JTAG-інтерфейс (за винятком mega8), апаратний помножувач, схему захисту від збоїв, послідовний інтерфейс I²C, АЦП (за винятком ATmega162) і ряд інших апаратних особливостей. Крім цього, удвічі підвищено швидкість роботи всіх периферійних вузлів, поліпшено роботу схеми тактування і спрощено доступ до зовнішньої пам'яті даних.

Програмні й апаратні засоби розробки для AVR розробляються паралельно із самими мікроконтролерами й складаються з компіляторів, внутрішньо схемних емуляторів, налагоджувачів, програматорів і найпростіших налагоджувальних плат – конструкторів практично на будь-який смак. Активно йде процес співробітництва зі сторонніми фірмами, що

випускають програмні засоби проектування і налагодження, операційні системи, різноманітні налагоджувальні комплекси і внутрішньо схемні емулятори для AVR.

2. Особливості та склад серії мікроконтролерів AVR

Мікроконтролери сімейства MCS-51 з CISC архітектурою характеризуються досить розвиненою системою команд. Однак аналіз програм показав, що 20 % команд використовуються у 80 % випадків, а дешифратор команд займає понад 70 % усієї площі кристала. Тому у розробників МК виникла ідея скоротити кількість команд, придати їм єдиний формат і зменшити площу кристала, тобто використати RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) архітектуру.

Особливістю МК, виконаних за RISC архітектурою, є те, що всі команди виконуються за один-три такти, тоді як у CISC-мікроконтролерах - за один-три машинних цикли, кожний з яких складається з кількох тактів. Тому RISC-мікроконтролери мають значно більшу швидкодію.

Найбільш поширені і популярні серед МК з RISC архітектурою – МК серії AVR. Однокристальні мікроконтролери AVR - це 8-розрядні високопродуктивні МК загального призначення. Вони були створені групою розроблювачів дослідницького центру фірми Atmel, ініціали яких сформували марку AVR. Особливістю МК AVR є їх широка номенклатура, що дає змогу користувачу вибрати мікроконтролер з мінімальною апаратною надлишковістю і, отже, найменшої вартості.

В межах серії AVR МК підрозділяються на декілька сімейств. Застаріле сімейство «Classic» в даний час вже не використовується. Основу серії складає сімейство «Tiny» і сімейство «Mega». Сімейство МК «Tiny» — це МК мінімальної конфігурації і, переважно, невеликих габаритів, які призначені

для простих недорогих і мініатюрних електронних пристроїв керування. Вони мають мінімальний набір можливостей і невисоку ціну.

Мікроконтролери сімейства «Mega», навпаки, мають розвинену архітектуру і призначені для потужніших мікропроцесорних систем. Отже, серія AVR включає мікроконтролери самої різної конфігурації, з різним об'ємом пам'яті, різною кількістю вбудованих портів введення-виведення і інших додаткових пристроїв. Конструктивне виконання МК також різноманітне. Застосовується декілька типів корпусів з кількістю виводів від 8 до 64.

Крім того, фірма Atmel випускає ще декілька видів мікроконтролерів, які вона також відносить до серії AVR. Повний склад серії AVR наведений в табл.

1. В цій таблиці використовуються такі позначення:

- Flash – енергонезалежна пам'ять програм;
- EEPROM – енергонезалежна пам'ять даних;
- SRAM – статична пам'ять даних;
- ISP – можливість програмування МК на цільовій платі за основної напруги живлення (I);
- Self-Prog – можливість самопрограмування МК без участі зовнішнього програматора (S);
- I/O – лінії введення-виведення.

Всі МК AVR будуються за єдиним принципом і мають єдину систему команд, яка для різних моделей мікроконтролерів може відрізнятися лише в наявності або відсутності декількох непринципових команд. Тому доцільно вивчати всю серію мікросхем як єдине ціле.

Так як МК серії AVR відносяться до класу 8-розрядних мікроконтролерів, то переважна більшість операцій центральні процесори МК проводять з 8-розрядними двійковими числами. Тому вбудована шина даних, всі елементи

пам'яті і більшість регістрів МК також 8-розрядні.. Виняток становить пам'ять програм. Вона цілком складається з 16-розрядних комірок.

Для обробки 16-розрядних чисел деякі внутрішні регістри можуть

Мікроконтролери серії AVR

Таблиця 1

Найменування	Об'єм пам'яті, байт			ISP (I), Self-Prog (S)	Кількість ліній I/O	Наявні інтерфейси	Кількість таймерів 8/16 біт	Число каналів АЦП	Кількість переривань внутрішн./зовнішн.	Тактова частота, МГц
	Flash	EEPROM	SRAM							
Сімейство «Tiny»										
ATtiny11*	1K	-	-	I	6	-	1/-	-	4/1	2, 6
ATtiny12*	1K	64	-	I	6	-	1/-	-	5/1	1, 4, 8
ATtiny13	1K	64	64	I	6	-	1/-	4	9/6	10, 20
ATtiny15L	1K	64	-	I	6	-	2/-	4	8/1	1,6
ATtiny26	2K	128	128	I	16	USI	2/-	11	11/1	8, 16
ATtiny46	4K	256	256	I	16	USI	2/1	11	11/1	8, 20
ATtiny86	8K	512	512	I	16	USI	2/1	11	11/1	8, 20
ATtiny28	2K	-	-	-	20	USI	1/-	-	5/2	1,4
ATtiny2313	2K	128	128	I	18	USI, UART	2/1	-	8/2	16
ATtiny25	2K	128	128	I,S	6	USI	2/-	4	15/7	16
ATtiny45	4K	256	256	I,S	6	USI	2/-	4	15/7	16
ATtiny86	8K	512	512	I,S	6	USI	2/-	4	15/7	16
Сімейство «Tiny» (вбудований датчик температури)										
ATtiny24	2K	128	128	I	12	USI	2/-	8	17/12	10, 20
ATtiny44	4K	256	256	I	12	USI	2/-	8	17/12	10, 20
ATtiny84	8K	512	512	I	12	USI	2/-	8	17/12	10, 20
Сімейство «Lighting AVR» (ЦАП 10 біт і інтерфейс DALI)										
AT90PWM2	8K	512	512	I,S	19	SPI, UART	1/1	8	-/4	16
AT90PWM3	8K	512	512	I,S	27	SPI, UART	1/1	11	-/4	16
Сімейство «CAN AVR»										
AT90CAN128	128K	4K	4K	I,S	53	I ² C, SPI,	2/2	8	34/8	16

						2 UART				
Сімейство «Smart battery AVR» (контроль батареї живлення, ЦАП 12 біт, АЦП 18 біт, датчик температури)										
Atmega406	40K	512	2K	I,S	48	TWI	1/1	-	23/4	1

Продовж. табл. 1

Сімейство „Mega”										
ATmega48	4 K	256	512	I,S	23	UART, 2 SPI, I ² C	2/1	8	26/26	10,20
ATmega8	8 K	512	1 K	I,S	23	UART, SPI, I ² C	2/1	6/8	18/2	8,16
Atmega88	8 K	512	1 K	I,S	23	UART, 2 SPI, I ² C	2/1	8	26/26	10,20
ATmega8515	8 K	512	512	I,S	35	UART, SPI	2/1	-	16/3	8,16
Atmega8535	8 K	512	512	I,S	35	UART, SPI, I ² C	2/1	8	20/3	8,16
Atmega16	16 K	512	1 K	I,S	32	UART, SPI, I ² C	2/1	8	20/3	8,16
Atmega162	16 K	512	1 K	I,S	35	2 UART, SPI	2/2	-	28/3	8,16
Atmega164	16 K	512	1 K	I,S	32	2 USART, SPI, I ² C	2/1	8	31/32	10,20
Atmega165	16 K	512	1 K	I,S	54	USART, SPI, I ² C	2/1	8	23/17	8,16
Atmega168	16 K	512	1 K	I,S	23	UART, 2 SPI, I ² C	2/1	8	26/26	10,20
Atmega169	16 K	512	1 K	I,S	54	USI, SPI, USART	2/1	8	23/17	8,16
Atmega325	32 K	1 K	2 K	I,S	53	USI, SPI, USART	2/1	8	23/17	8,16
Atmega3250	32 K	1 K	2 K	I,S	68	USI, SPI, USART	2/1	8	32/17	8,16
Atmega32	32 K	1 K	2 K	I,S	32	UART, SPI, I ² C	2/1	8	19/3	8,16
Atmega324	32 K	1 K	2 K	I,S	32	2 USART, SPI, I ² C	2/1	8	31/32	10,20
Atmega325	32 K	1 K	2 K	I,S	54	USI, SPI, USART	2/1	8	23/17	8,16
Atmega64	64 K	2 K	4 K	I,S	53	USI, SPI, USART	2/1	8	34/8	8,16
Atmega644	64 K	2 K	4 K	I,S	32	USART,	2/1	8	31/32	10,20

						SPI, I ² C				
Atmega640	64 К	4 К	8 К	I,S	86	4 USART, SPI, I ² C	2/4	16	57/32	8,16
Atmega645	64 К	2 К	4 К	I,S	53	USI, SPI, USART	2/1	8	23/17	8,16

Продовж. табл. 1

Atmega6450	64 К	2 К	4 К	I,S	68	USI, SPI, USART	2/1	8	32/17	8,16
Atmega128	128 К	4 К	4 К	I,S	53	2 UART, SPI, I ² C	2/2	8	34/8	8,16
Atmega1281	128 К	4 К	8 К	I,S	51	2 USART, SPI, I ² C	2/4	8	48/17	16
Atmega1280	128 К	4 К	8 К	I,S	86	4 USART, SPI, I ² C	2/4	16	57/32	16
Atmega2561	256 К	4 К	8 К	I,S	51	2 USART, SPI, I ² C	2/4	8	48/17	16
Atmega2560	256 К	4 К	8 К	I,S	86	4 USART, SPI, I ² C	2/4	16	57/32	16
Сімейство „LCD AVR” (з вбудованим драйвером РКІ 4x25)										
Atmega169	16 К	512	1 К	I,S	53	UART, SPI, I ² C	2/1	8	23/17	16
Atmega329	32 К	1 К	2 К	I,S	53	USI, SPI, USART	2/1	8	25/17	20
Atmega649	64 К	2 К	4 К	I,S	53	USI, SPI, USART	2/1	8	25/17	20
Сімейство „LCD AVR” (з вбудованим драйвером РКІ 4x40)										
Atmega1690	16 К	512	1 К	I,S	53	UART, SPI, I ² C	2/1	8	25/32	16
Atmega3290	32 К	1 К	2 К	I,S	68	USI, SPI, USART	2/1	8	25/32	20
Atmega6490	64 К	2 К	4 К	I,S	68	USI, SPI, USART	2/1	8	25/32	20

об'єднуватися попарно і кожна така пара може працювати як один 16-розрядний регістр.

МК AVR виготовляються за КМДН-технологією, завдяки якій вони мають достатньо високу швидкість і низький струм споживання. Більшість

команд МК виконуються за один такт. Тому продуктивність МК може досягати 1 мільйона операцій в секунду при тактовій частоті 1 МГц. Крім того, МК AVR є повністю статичними приладами, що забезпечує можливість їх роботи з тактовою частотою від нульової до максимальної.

3. Архітектура мікроконтролерів AVR

Розглянемо архітектуру мікроконтролерів AVR на прикладі МК сімейства «Mega» - ATmega8515 (рис. 1).

Мікроконтролер містить центральний процесор ЦП, постійний запам'ятовувальний пристрій ПЗП об'ємом 8 Кбайт (енергонезалежна пам'ять програм типу Flash); оперативний запам'ятовувальний пристрій ОЗП об'ємом 512 байт (статична пам'ять даних SRAM); енергонезалежна пам'ять даних EEPROM об'ємом 512 байт; паралельні порти введення-виведення (порти A, B, C, D та E); послідовні порти SPI та USART; аналоговий компаратор; таймери (у тому числі сторожовий таймер); генератори тактових імпульсів; систему переривань; схему синхронізації та керування; програмовану логіку.

Центральний процесор ЦП є Гарвардським процесором, який реалізує повний логічний і фізичний розподіл не лише адресних просторів, а й інформаційних шин для звертання до пам'яті програм і до пам'яті даних, причому способи адресування й доступу до цих масивів пам'яті також різні.

Подібна побудова ближча до структури цифрових сигнальних процесорів і забезпечує істотне підвищення продуктивності. Процесор працює одночасно як із пам'яттю програм, так і з пам'яттю даних; розрядність шини пам'яті програм розширена до 16 біт. У МК AVR використовується технологія конвеєризації, внаслідок чого цикл вибірка-виконання команди значно скорочений. Для порівняння, у мікроконтролерів

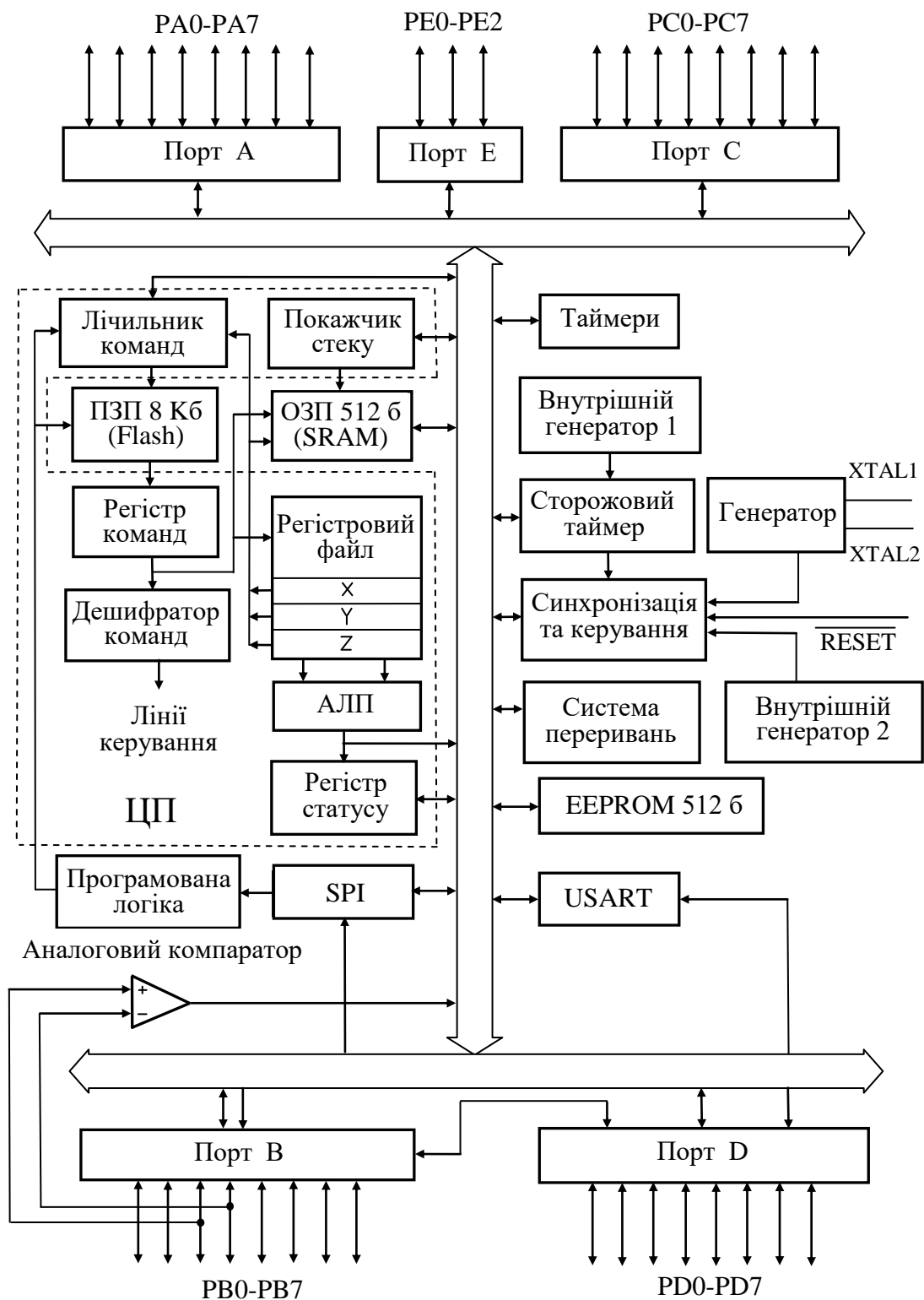


Рис. 1 Архітектура мікроконтролера ATmega8515

сімейства MCS-51 коротка команда виконується за 12 тактів генератора (один машинний цикл), упродовж якого процесор послідовно зчитує код операції і виконує її.

У МК AVR кожна команда з пам'яті програм виконується за один машинний цикл із використанням багаторівневої конвеєрної обробки. У той момент, коли поточна команда виконується, наступна команда зчитується із програмної пам'яті. Так як машинний цикл у МК AVR становить один період тактової частоти, така концепція дозволяє виконувати по одній команді за один такт генератора.

Регістровий файл (рис. 2) містить 32 8-розрядних регістра загального призначення (РЗП) R0÷R31 та займає молодші 32 байти в загальному просторі оперативного запам'ятовувального пристрою ОЗП (SRAM). Доступ до цих регістрів здійснюється за один такт генератора.

7	0	Адреса	
		R0	0x00
		R1	0x01
		R2	0x02
		...	
		R13	0x0D
		R14	00xE
		R15	0x0F
		R16	0x10
		R17	0x11
		...	
		R26	0x1A
		R27	0x1B
		R28	0x1C
		R29	0x1D
		R30	0x1E
		R31	0x1F

} Робочі
 } регістри
 } загального
 } призначення

X-регістр, молодший байт
 X-регістр, старший байт
 Y-регістр, молодший байт
 Y-регістр, старший байт
 Z-регістр, молодший байт
 Z-регістр, старший байт

Рис. 2 Регістровий файл МК AVR

Це дозволяє арифметико-логічному пристрою АЛП здійснювати більшість своїх операцій за один такт.

Регістри загального призначення використовуються для зберігання проміжних результатів обчислень. Всі команди перетворення даних (додавання, віднімання, тощо) МК AVR обов'язково використовують РЗП. Кожна команда у якості операндів використовує або вміст двох різних РЗП, або вміст РЗП і константу. Результат обчислень також розміщується в одному з РЗП.

Регістри загального призначення використовуються також і в командах пересилання даних. Пересилати дані можна з одного РЗП в інший, з РЗП в комірку пам'яті і у зворотному напрямі. Пересилання даних можливе також між РЗП і регістрами введення-виведення.

Шість із 32-х регістрів файлу можуть використовуватися як три 16-розрядних покажчика адреси за непрямого адресування даних (регістри X, Y і Z). Один з цих покажчиків (Z) застосовується також для доступу до даних, записаних у пам'яті програм МК. Використання трьох 16-розрядних покажчиків (X, Y і Z) значно підвищує швидкість пересилання даних під час роботи прикладної програми.

Арифметико-логічний пристрій АЛП працює в прямого зв'язку з усіма 32 регістрами загального призначення. АЛП призначений для виконання арифметичних і логічних операцій, а також операцій з розрядами.

Лічильник команд (програмний лічильник) PC (*Program Counter*) призначений для зберігання адреси поточної команди, яка виконується. Цей регістр не доступний для програміста, бо не існує команд прямого запису або читання його вмісту. Розрядність лічильника команд складає для різних мікроконтролерів AVR від 9 до 12 розрядів. Кількість розрядів лічильника

команд залежить від розміру програмної пам'яті конкретного МК. Після скидання МК у лічильник команд записується нульове значення.

В процесі виконання програми лічильник завжди вказує на поточну команду, яка виконується. При зчитуванні коду команди значення лічильника збільшується на одиницю або двійку (залежно від довжини команди). При виконанні команд безумовного і умовного передавання керування, якщо це передавання керування виконується, у нього записується нове значення адреси.

Окрім команд передавання керування, мікроконтролери AVR мають можливість пропускання наступної команди за умовою. У командах цього типу проводиться перевірка якоїсь умови, і результат перевірки впливає на виконання наступної команди. Якщо умова виконується, то наступна команда пропускається, а вміст лічильника команд збільшується на одиницю або на дві одиниці, залежно від довжини команди, що пропускається. Якщо умова не виконується, то команда не пропускається і виконується в звичайному порядку (див. систему команд у табл. 4).

Показчик стеку призначений для організації стекової пам'яті. Запис в стекову пам'ять і читання з неї проводиться за принципом «останній зайшов - перший вийшов». У МК AVR застосовується широко поширений спосіб організації стекової пам'яті, коли стек є частиною ОЗП. Для реалізації принципу «останній зайшов - перший вийшов» і служить регістр - показчик стеку.

Показчик стеку у всіх МК AVR виконаний у вигляді двох 8-розрядних регістрів введення-виведення. Число фактично використовуваних розрядів для кожної моделі МК різне. У деяких моделях обсяг пам'яті даних настільки малий, що для показчика стеку використовується тільки молодший з регістрів показчика стека SPL, а регістр SPH у них відсутній. Для МК з ОЗП

великих розмірів до регістра SPL додається ще один регістр SPH. Разом вони складають один 16-розрядний покажчик стеку.

Вміст покажчика стеку зменшується на одиницю, коли дані записуються в стек за допомогою команди PUSH, і зменшується на два, коли в стек записується адреса повернення з підпрограми або процедури обробки переривання.

Покажчик стека збільшується на одиницю, коли дані читаються зі стеку за допомогою команди POP, і збільшується на два, коли дані читаються зі стека при виході з підпрограми (команда RET) або завершенні процедури обробки переривання (команда RETI).

Перед початком роботи в покажчик стеку необхідно записати адресу вершини стеку. Це деяка адреса комірки ОЗП, яка є старшою коміркою області пам'яті, виділеної під стек. Визначати розмір стекової пам'яті і адресу її вершини повинен сам програміст. Зазвичай вершину стеку встановлюють рівною адресі старшої комірки ОЗП.