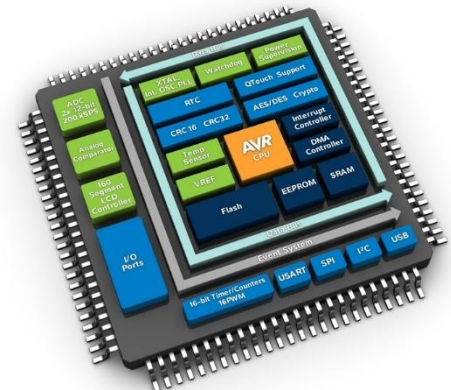


# Мікроконтролери



## **Вступ**

Сучасна електроніка будується мікропроцесорних пристроях, які впевнено увійшли в наше життя як високопродуктивний та універсальний інструмент для створення вимірювальних та побутових приладів, систем керування, систем комунікацій, контролю, сигналізації, тощо.

**Мікропроцесор в поєднанні з ОЗП, ПЗП, а також з різними периферійними пристроями отримали назву - «мікроконтролер».**

Метою даного курсу є знайомство студентів радіофізичних спеціальностей з сімействами сучасних мікроконтролерів, вивчення їх архітектури та набуття навичок програмування.

Вивчення архітектури мікроконтролерів дозволить оцінити можливість застосування мікроконтролерів в різних системах автоматики та вимірювальних приладах.

Основна увага приділяється практиці програмування мікроконтролерів. Такий підхід повинен послужити «поштовхом» для підготовки фахівців технічних спеціальностей в сучасних умовах розвитку техніки.

- Література



На практиці будуть вивчатися мікроконтролери сімейства Mega, бо є відносно простим та зручним інструментом побудови більшості пристроїв автоматики та керування.

Даний курс треба розглядати як **інструмент** для виконання дипломних та курсових робіт на високому технічному рівні.

Також, програміст мікроконтролерів (Embedded Software Developer) – **це окрема спеціальність**, що широко представлена на ринку праці.

Евстифеев А.В. — Микроконтроллеры AVR семейства Tiny и Mega фирмы Atmel

## Поняття «мікроконтролер»

**Мікроконтролер - це багатфункціональна мікросхема**, що містить в собі набір програмно налаштовуваних модулів та інтерфейсів.

Мікроконтролери конструктивно виконані у вигляді однієї мікросхеми і включають в себе всі пристрої, необхідні для реалізації цифрових систем керування мінімальної конфігурації: процесор, запам'ятовуючий пристрій даних, запам'ятовуючий пристрій команд, внутрішній генератор тактових сигналів, а також програмовані модулі для зв'язку з зовнішнім середовищем.

Ось короткий перелік виробів, що будуються на базі мікроконтролерів: Мікро-АТС, автовідповідачі, мобільні телефони, зарядні пристрої, факси, модеми, таймери, системи сигналізації, вимірювальні прилади, електронні лічильники води, газу та електроенергії, дозиметри, прилади авто сигналізації, електронні блоки керування авто, промислові контролери, промислові роботи, регулятори температури, вологості, тиску, схеми керування принтерами і плотерами, мережеві контролери, сканери, схеми управління аудіосистемами, системи синтезу мовних повідомлень, відеоігри, системи дистанційного керування, касові апарати...

PS

Іноді здається, що легше перерахувати електронні прилади в яких немає мікроконтролерів ☺

# В яких приладах можна зустріти мікроконтролери?

Побутова техніка



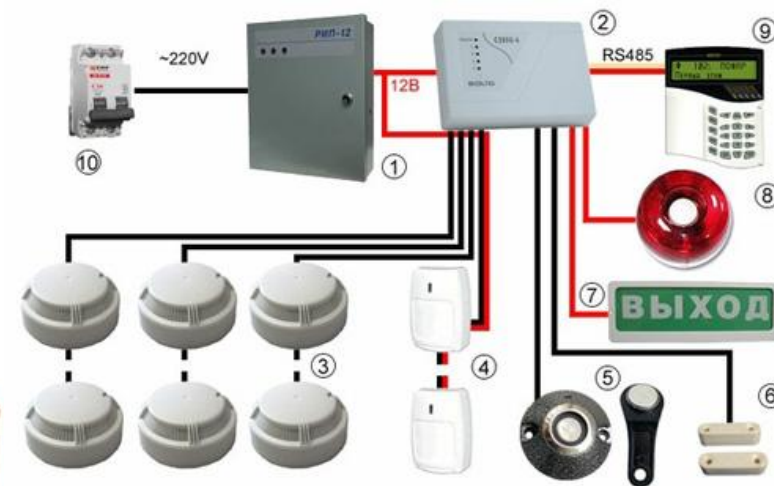
Smartwatch

ST | pebble

Системи контролю та керування



Системи сигналізації



# В яких приладах можна зустріти мікроконтролери?

Авто



Медичне обладнання



Вимірювальні прилади

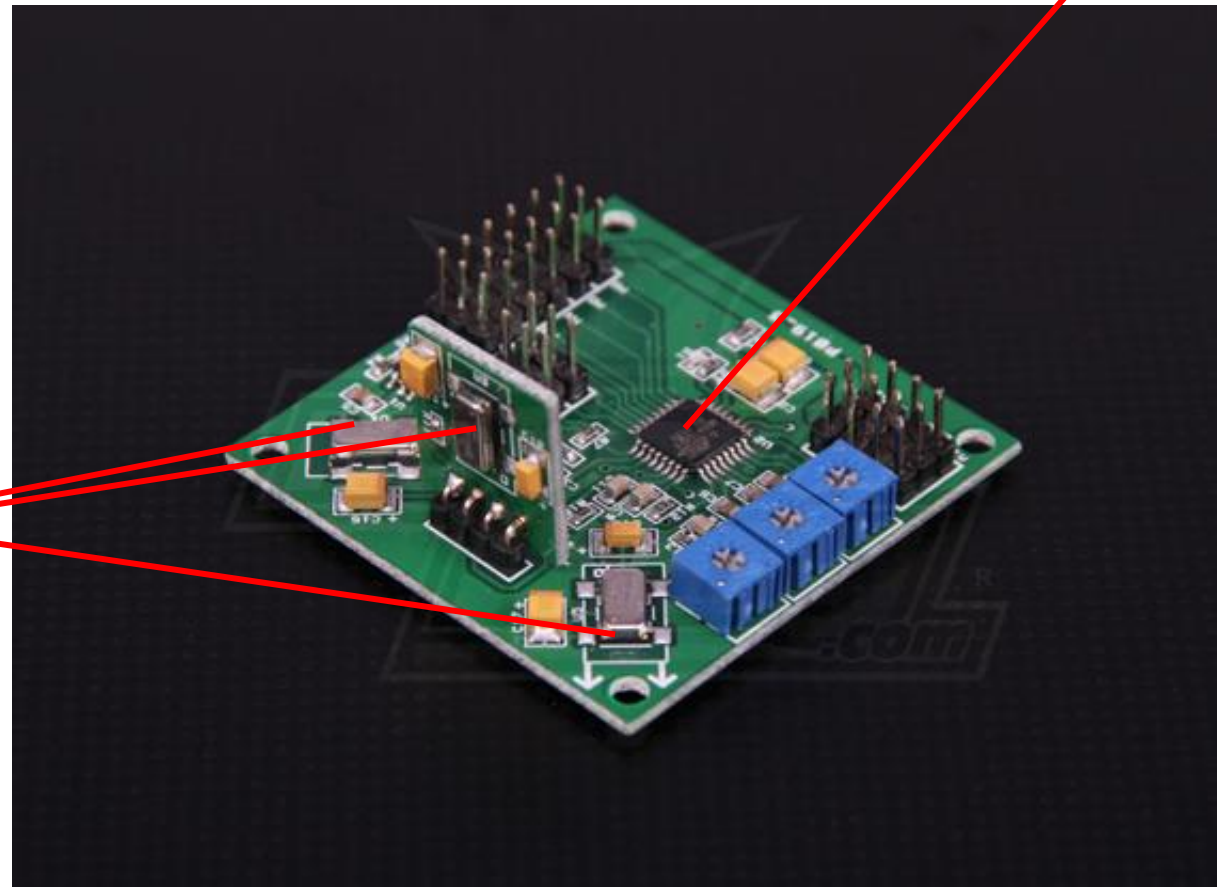


# Де «живуть» мікроконтролери?



Гіроскопи

Мікроконтролер

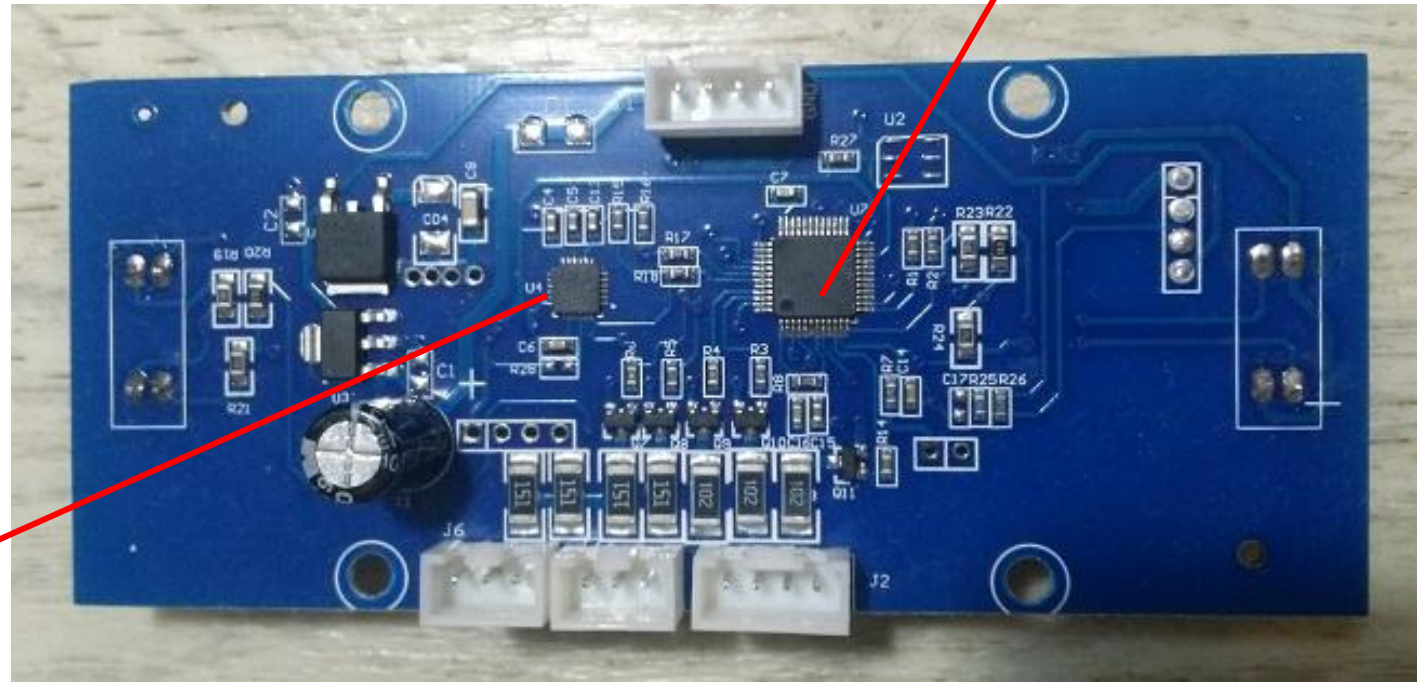


# Де «живуть» мікроконтролери?

Мікроконтролер



Гіроскоп





## ● Коротка історія розвитку

Термін «мікроконтролер» (МК) витіснив з ужитку раніше використовувався термін «однокристальна мікро-ЕОМ». Перший патент на однокристальну мікро-ЕОМ був виданий в 1971 році інженерам М. Кочрену і Г. Буну, співробітникам компанії Texas Instruments. Саме вони запропонували на одному кристалі розмістити не тільки мікропроцесор, але й пам'ять, пристрої вводу-виводу. З появою однокристальних мікро-ЕОМ пов'язують початок ери комп'ютерної автоматизації в галузі керування. Мабуть, ця обставина і визначило термін «мікроконтролер» (control - керування).

У 1980 році фірма Intel випускає мікроконтролер i8048. Трохи пізніше в цьому ж році Intel випускає наступний мікроконтролер: i8051. Вдалий набір периферійних пристроїв, можливість гнучкого вибору зовнішньої або внутрішньої програмної пам'яті і прийнятна ціна забезпечили цьому мікроконтролеру успіх на ринку. З точки зору технології, мікроконтролер i8051 був для свого часу дуже складним виробом - в кристалі було використано 128 тис. Транзисторів, що в 4 рази перевищувало кількість транзисторів в 16-розрядному мікропроцесорі i8086.

Популярністю у розробників-початківців користуються 8-бітові мікроконтролери PIC фірми Microchip Technology і AVR фірми Atmel, 16-бітові MSP430 фірми TI, а також, більш складні та продуктивні - 32-бітові з ARM ядром, архітектуру яких розробляє фірма ARM і продає ліцензії іншим фірмам для їх виробництва.

## Сімейства мікроконтролерів

Мікроконтролери об'єднуються в сімейства. До одного сімейства відносять вироби, які мають однакове ядро - сукупність таких понять, як система команд, циклограма роботи ЦП, організація пам'яті програм і пам'яті даних, система переривань і базовий набір периферійних пристроїв. Відмінності між різними представниками одного сімейства полягають, в основному, в складі периферійних пристроїв і обсязі пам'яті програм або даних. Найбільш важлива особливість сімейства - програмна сумісність на рівні двійкового коду всіх вхідних до нього МК.

### *8051*

Мікроконтролер Intel 8051, що вийшов у 1980 році, став класичним зразком пристроїв даного класу. Цей 8-бітний мікроконтролер поклав початок цілому сімейству мікроконтролерів, які панували на ринку аж до недавнього часу.

Більшість фірм виробників мікроконтролерів і сьогодні випускають пристрої, засновані на цій архітектурі. Серед них Philips, Atmel, Dallas, OKI, Siemens.

На даний момент цей першопроходець давно «залишився в історії».

## Сімейства мікроконтролерів

### *Microchip*

Перші значні зміни відбулися з появою PIC-контролерів фірми Microchip. Ці чіпи пропонувалися за рекордно низькими цінами, що дозволило їм в короткий термін захопити значну частину ринку мікроконтролерів. До того ж кристали від Microchip не поступаються, а часто і перевершують мікроконтролери x51 по продуктивності і не вимагали коштовних засобів програмування.

Разом з контролерами з'явилися дешеві комплекти PICSTART, що містять все, що було потрібно для того, щоб, не маючи ні коштів, ні навичок роботи з PIC-контролерами, швидко створити і налагодити на ньому продукт.

Ці мікроконтролери мали хороші порти, але все інше було зроблено дуже незручно. Архітектура залишала бажати кращого, система команд була вкрай обмежена. Проте, PIC-контролери залишаються популярними в тих випадках, коли потрібно створити недорогу електронну систему керування.

## Сімейства мікроконтролерів

### Atmel

Справжня революція в світі мікроконтролерів сталася у 1996 році, коли корпорація Atmel представила своє сімейство чіпів на новому прогресивному ядрі AVR. Більш продумана архітектура AVR, швидкодія, що перевершує контролери Microchip, вдала цінова політика сприяли відтоку симпатій багатьох розробників від недавніх претендентів на звання контролера номер один.

Мікроконтролери AVR мають більш розвинену систему команд, яка налічує до 133 інструкцій, продуктивність, що наближається до 1 мільйону операцій на 1 МГц, Flash ПЗП програм з можливістю внутрішньосхемного перепрограмування. AVR-архітектура оптимізована під язык високого рівня Сі.

Величезну роль зіграла доступність програмного забезпечення і засобів підтримки розробки. У Atmel безкоштовно розповсюджуються багато програмних продуктів. Добре відомо, що розвинені засоби підтримки розробок при освоєнні і знайомстві з будь-яким мікроконтролерним сімейством грають не менш значиму роль, ніж самі кристали. Фірма Atmel приділяє цьому питанню велику увагу. Надзвичайно вдале і абсолютно безкоштовне середовище розробки AVR Studio, що працює під Windows.

Провідні сторонні виробники випускають багатий спектр компіляторів та програматорів, що сприяє ще більшій популяризації.

## Сімейства мікроконтролерів

### **STMicroelectronics**

STMicroelectronics - європейська мікроелектронна компанія, одна з найбільших, яка займаються розробкою, виготовленням і продажем різних напівпровідникових електронних і мікроелектронних компонентів. Сьогодні штаб квартира компанії знаходиться в Женеві, в той же час, її холдингова компанія STMicroelectronics зареєстрована в Амстердамі, однак компанія історично пов'язана з Італією і Францією. Компанія ST одна з перших випустила свої мікроконтролери з ядром Cortex-M0 (2007 р.) і швидко стала домінуючим гравцем на ринку.

## Архітектура МК

**Архітектура мікроконтролерів - це сукупність внутрішніх і зовнішніх програмно доступних апаратних ресурсів і системи команд.**

Розглянемо архітектуру мікроконтролера на прикладі мікроконтролерів сімейств **AVR**. Файл реєстрів швидкого доступу, містить 32 восьмирозрядних робочих реєстра загального призначення пов'язаних безпосередньо з АЛУ. За один тактовий цикл з файлу реєстрів вибираються два операнда, виконується операція, і результат знову повертається в файл реєстрів.

Шість з 32 реєстрів можуть бути використані як три 16-розрядних реєстра покажчика непрямої адресації адресного простору даних, що забезпечують ефективно обчислення адрес. Один з цих покажчиків адреси використовується, також, як покажчик адреси для функції безперервного перегляду таблиць. Ці 16-розрядні додаткові реєстри позначаються X-реєстр (R26, R27), Y-реєстр (R28, R29) і Z-реєстр (R30, R31).

АЛУ підтримує арифметичні і логічні операції між реєстрами або між константою і реєстром. Виконуються в АЛУ і операції з окремими реєстрами.

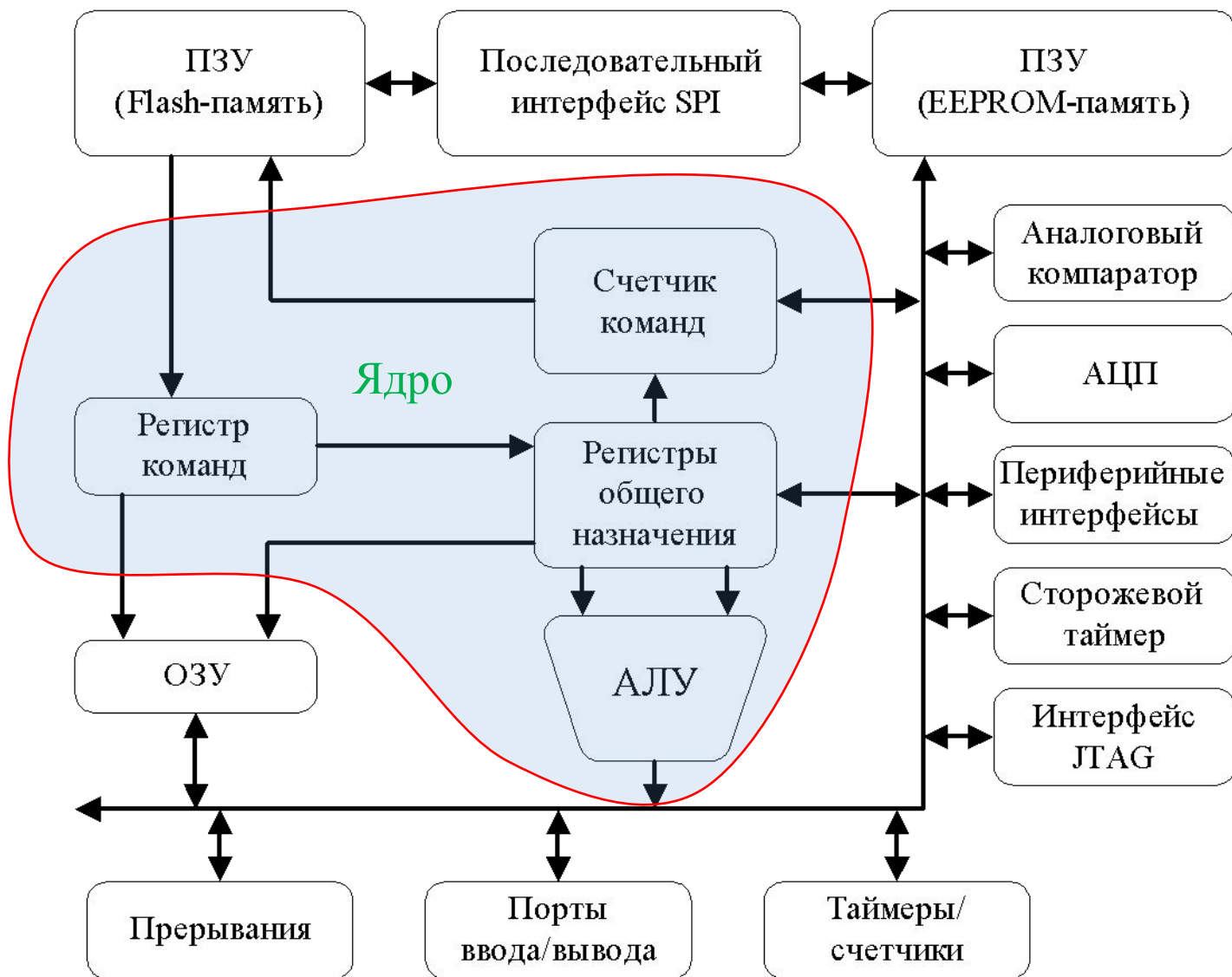
7	0	Addr.
	R0	\$00
	R1	\$01
	R2	\$02
	...	
	R13	\$0D
	R14	\$0E
	R15	\$0F
	R16	\$10
	R17	\$11
	...	
	R26	\$1A
	R27	\$1B
	R28	\$1C
	R29	\$1D
	R30	\$1E
	R31	\$1F

**Що таке «ядро процесора»?**

**Ядро виконує всі обчислювальні операції і, одночасно, керує роботою всіх інших модулів мікроконтролера (АЛУ, реєстри загального призначення, реєстр команд, лічильник команд).**

## Архітектура МК

Розширена RISC (*reduced instruction set computer*) архітектура мікроконтролерів.



**Регистр команд** (*Instruction Register - IR*) — складова частина процесора, що відповідає за приймання та збереження двійкового коду команди впродовж машинного циклу, поки вона не буде виконана чи дешифрована.

**Лічильник команд, програмний лічильник, вказівник на поточну команду** (*program counter, instruction pointer*) — спеціалізований регістр процесора, за допомогою якого визначається, яка команда програми буде виконуватись процесором наступною (або яка поточна команда ним виконується — залежно від прийнятого в тій чи іншій архітектурі правила щодо завантаження лічильника).

## Архитектура МК *Арифметико-логическое устройство*

Высокопроизводительное арифметико-логическое устройство (АЛУ) соединено непосредственно со всеми быстродействующими регистрами общего назначения. За один тактовый цикл АЛУ выполняет операцию между регистрами этого регистрового файла. Операции АЛУ подразделяются на три основные категории: арифметические, логические и операции над битами.

Арифметические операции:

- сложения
- вычитания
- умножения

Логические операции:

- операции И
- ИЛИ
- исключающее ИЛИ
- циклического сдвига
- сброса
- инвертирования

Важной особенностью АЛУ является его способность оперировать не только байтами, но и битами. Отдельные программно-доступные биты могут быть установлены, сброшены, инвертированы, переданы, проверены и использованы в логических операциях. Эта способность достаточно важна, поскольку для управления объектами часто применяются алгоритмы, содержащие операции над входными и выходными булевыми переменными, реализация которых средствами обычных микропроцессоров сопряжена с определенными трудностями.

&	порозрядне І	
	порозрядне АБО	порозрядні операції
^	порозрядне виключне АБО	
&&	логічне І	логічні операції
	логічне АБО	
,	послідовне обчислення	послідовного обчислення



# Архитектура МК *Арифметико-логическое устройство*

Логична операція І (AND, &)

(біт 1)	(біт 2)	a(біт 1) & b(біт 2)
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Логична операція АБО (OR, |)

a(біт 1)	b(біт 2)	a(біт 1)   b(біт 2)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

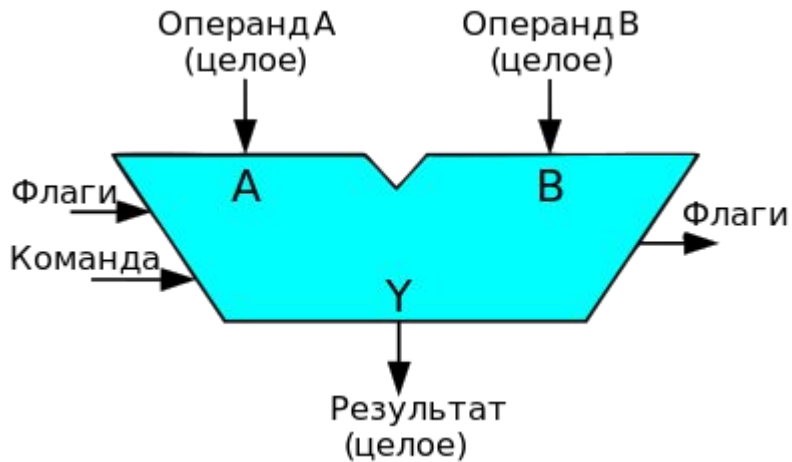
Логична виключна диз'юнкція (XOR, ^)

a(біт 1)	b(біт 2)	a(біт 1) ^ b(біт 2)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Логична операція заперечення (NO, ~)

a(біт 1)	~a(отрицание бита)
0	1
1	0

## Архитектура МК *Арифметико-логическое устройство*

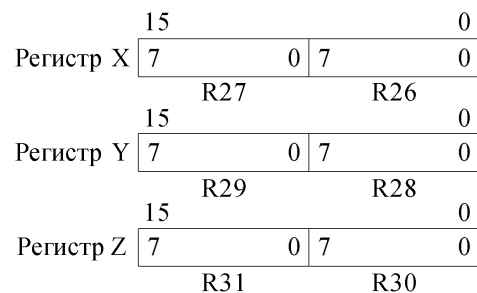


Обобщённая блок-схема арифметико-логического устройства (АЛУ). Стрелками указаны входные и выходные слова. Флаги — признаки (например, результата сравнения операндов) выполнения предыдущей операции (вход) и результата выполнения текущей операции (выход). В одноместных операциях таких, например, как инверсия битов слова или битовый сдвиг второй операнд (В) не участвует в операции. Слово команды указывает необходимую операцию.

## Архитектура МК *Регистры общего назначения*

Регистры общего назначения образуют регистровый файл быстрого доступа, где каждый регистр напрямую связан с АЛУ. За один такт из регистрового файла выбираются два операнда, выполняется операция, и результат возвращается в регистровый файл. АЛУ поддерживает арифметические и логические операции с регистрами, между регистром и константой или непосредственно с регистром.

Регистровый файл также доступен как часть памяти данных. 6 из 32-х регистров могут использоваться как три 16-разрядных регистра-указателя для косвенной адресации. Старшие микроконтроллеры семейства AVR имеют в составе АЛУ аппаратный умножитель.



### Регистры X, Y и Z

В различных режимах адресации эти регистры выполняют функции фиксированного смещения, автоматического инкремента и декремента.

## Архитектура МК ПЗУ (*Flash - память*)

**Флеш-память** (англ. *flash memory*) — разновидность полупроводниковой технологии электрически перепрограммируемой памяти (EEPROM). Это же слово используется в электронной схемотехнике для обозначения технологически законченных решений постоянных запоминающих устройств в виде микросхем на базе этой полупроводниковой технологии. В быту это словосочетание закрепилось за широким классом твердотельных устройств хранения информации.

Благодаря компактности, дешевизне, механической прочности, большому объёму, скорости работы и низкому энергопотреблению, флеш-память широко используется в цифровых портативных устройствах и носителях информации. Серьёзным недостатком данной технологии является ограниченный срок эксплуатации носителей, а также чувствительность к электростатическому разряду.

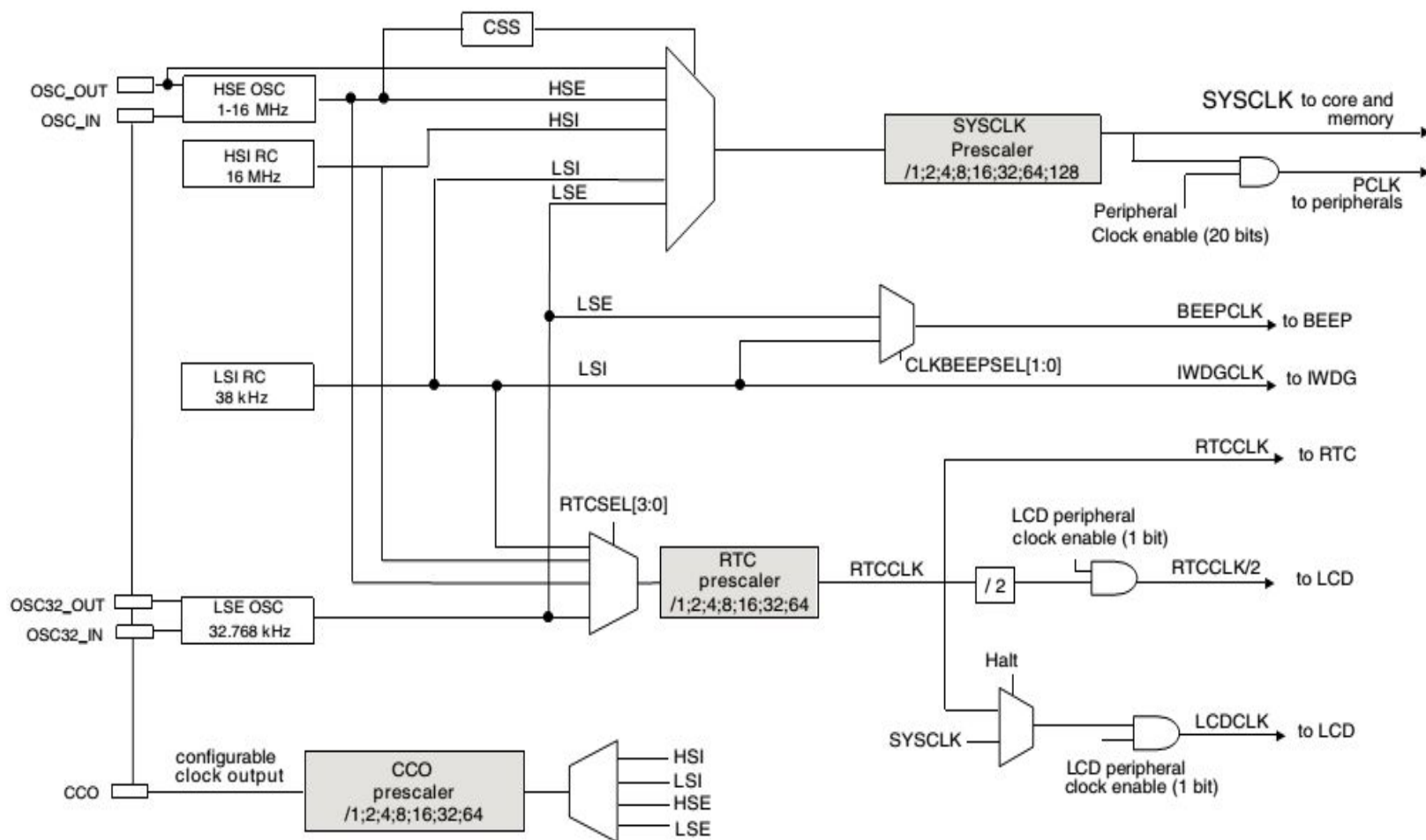
## Архитектура МК ПЗУ (EEPROM-память)

**EEPROM** (англ. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) — электрически стираемое перепрограммируемое ПЗУ (ЭСППЗУ), один из видов энергонезависимой памяти (таких, как PROM и EPROM).

На сегодняшний день классическая двухтранзисторная технология EEPROM практически полностью вытеснена флеш-памятью типа NOR. Однако название *EEPROM* прочно закрепилось за сегментом памяти малой ёмкости независимо от технологии.

EEPROM память данных организована как отдельное пространство данных с возможностью считывания и записи отдельного байта. EEPROM обеспечивает 100000 циклов стирания/записи. Взаимодействие между EEPROM и CPU определяется регистром адреса EEPROM, регистром данных EEPROM и регистром управления EEPROM.

# Архитектура МК Таймеры-счетчики

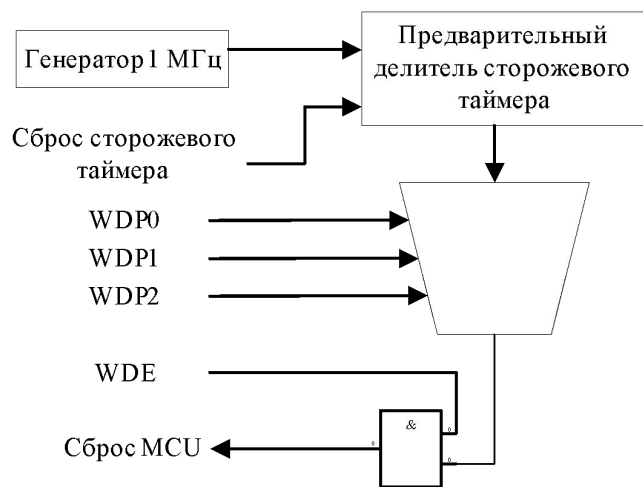


ai18269

Таймер-счетчик является одним из самых ходовых ресурсов AVR микроконтроллера. **Его основное назначение** - отсчитывать заданные временные интервалы, формирование ШИМ сигналов, подсчет длительности и количества входящих импульсов.

У большинства микроконтроллеров AVR семейства Atmega присутствует три таймера-счетчика: два 8-ми разрядных таймера-счетчика T0 и T2, и один 16-ти разрядный - T1.

## Архитектура МК *Сторожевой таймер (Watchdog Timer)*

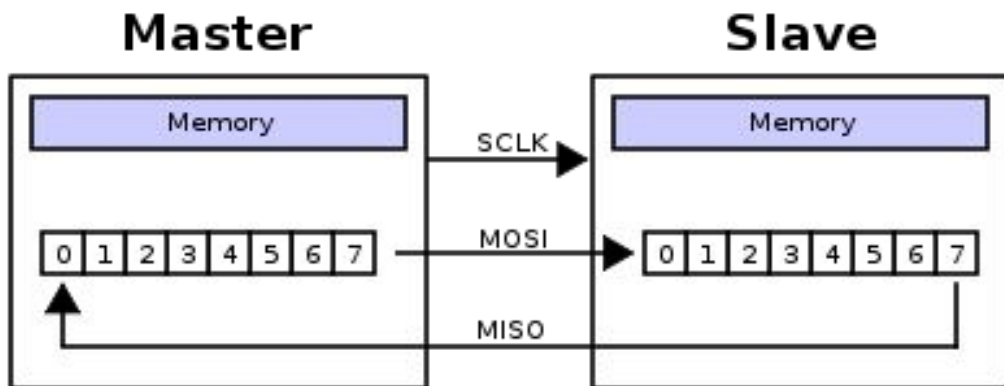


Идея использования сторожевого таймера предельно проста и состоит в регулярном его сбрасывании под управлением программы или внешнего воздействия до того, как закончится его выдержка времени и не произойдет сброс процессора. Если программа работает нормально, то команда сброса сторожевого таймера должна регулярно выполняться, предохраняя процессор от сброса. Если же микропроцессор случайно вышел за пределы программы (например, от сильной помехи по цепи питания) либо зациклился на каком-либо участке программы, команда сброса сторожевого таймера скорее всего не будет выполнена в течение достаточного времени и произойдет полный сброс процессора, инициализирующий все регистры и приводящий систему в рабочее состояние.

Любая программа МК обязательно имеет какой-то бесконечный цикл. Приблизительно зная максимальную длительность этого цикла, делитель таймера устанавливается на заведомо большее время. При старте программы WDT запускается, а в бесконечном рабочем цикле - перезапускается. В случае же ошибки программы (например, зацикливание) перезапуска сторожевого таймера не будет, и через определенное время программа будет сброшена.

## Архитектура МК *Последовательный периферийный интерфейс SPI (Serial Peripheral Interface)*

SPI — синхронный последовательный интерфейс. Последовательный периферийный интерфейс обеспечивает высокоскоростной синхронный обмен данными между микроконтроллерами и периферийными устройствами или между несколькими микроконтроллерами.



В простейшем случае к ведущему устройству подключено единственное ведомое устройство и необходим двусторонний обмен данными. В таком случае используется трехпроводная схема подключения. Интерфейс SPI позволяет подключать к одному ведущему устройству несколько ведомых устройств, причем подключение может быть осуществлено несколькими способами.

В SPI используются четыре цифровых сигнала:

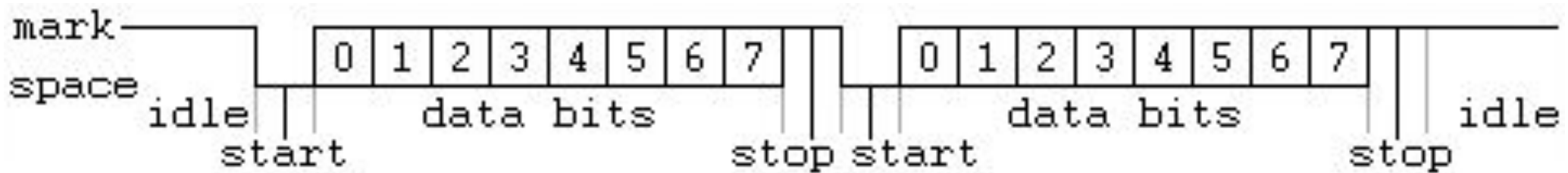
- MOSI — выход ведущего, вход ведомого ([англ.](#) *Master Out Slave In*). Служит для передачи данных от ведущего устройства ведомому.
- MISO — вход ведущего, выход ведомого ([англ.](#) *Master In Slave Out*). Служит для передачи данных от ведомого устройства ведущему.
- SCLK — последовательный тактовый сигнал ([англ.](#) *Serial Clock*). Служит для передачи тактового сигнала для ведомых устройств.
- CS или SS — выбор микросхемы, выбор ведомого ([англ.](#) *Chip Select, Slave Select*).



## Архитектура МК *UART - универсальный асинхронный приемопередатчик*

Универсальный асинхронный или универсальный синхронно/асинхронный приемопередатчик (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter - UART или USART) - удобный и простой последовательный интерфейс для организации информационного канала обмена микроконтроллера с внешним миром. Способен работать в дуплексном режиме (одновременная передача и прием данных).

Передача данных в UART осуществляется по одному биту в равные промежутки времени. Этот временной промежуток определяется заданной скоростью UART и для конкретного соединения указывается в бодах (что в данном случае соответствует битам в секунду). Существует общепринятый ряд стандартных скоростей: 300; 600; 1200; 2400; 4800; 9600; 19200; 38400; 57600; 115200; 230400; 460800; 921600 бод. Скорость (S, бод) и длительность бита (T, секунд) связаны соотношением  $T = 1/S$ . Скорость в бодах иногда называют сленговым словом битрейт.

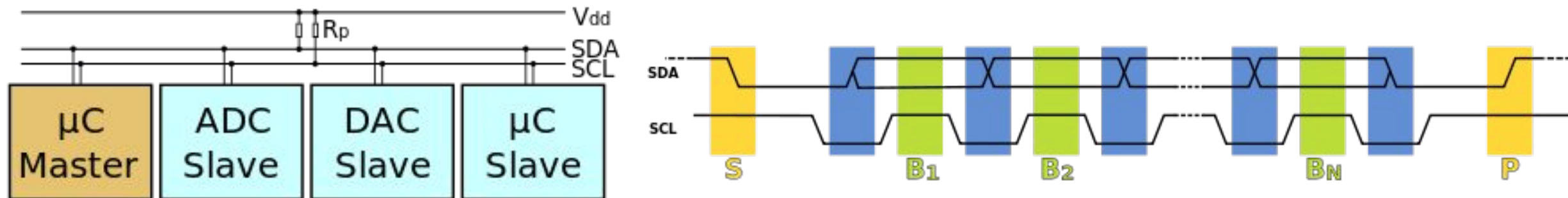


## Архитектура МК *Двухпроводной последовательный интерфейс TWI*

Двухпроводной последовательный интерфейс TWI (Two-wire Serial Interface) является полным аналогом базовой версии интерфейса I2C (двухпроводная двунаправленная шина) фирмы Philips. Этот интерфейс позволяет объединить вместе до 128 различных устройств с помощью двунаправленной шины, состоящей из линии тактового сигнала (SCL) и линии данных (SDA).

Разработана фирмой [Philips](#) в начале 1980-х как простая шина внутренней связи для создания управляющей электроники.

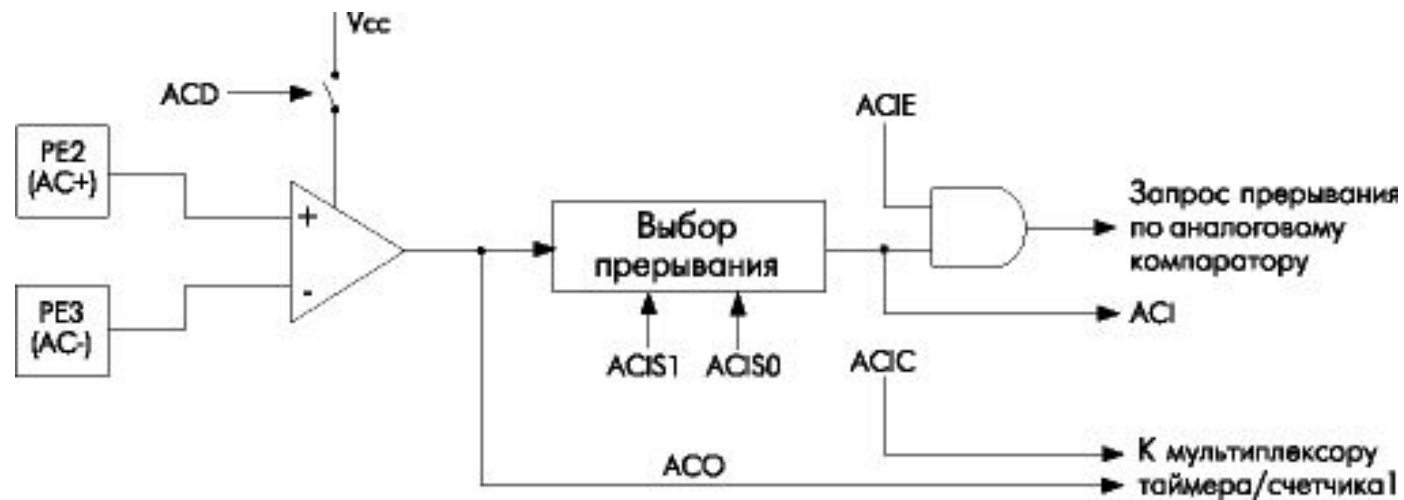
Классическая адресация включает 7-битное адресное пространство с 16 зарезервированными адресами. Это означает до 112 свободных адресов для подключения периферии на одну шину.



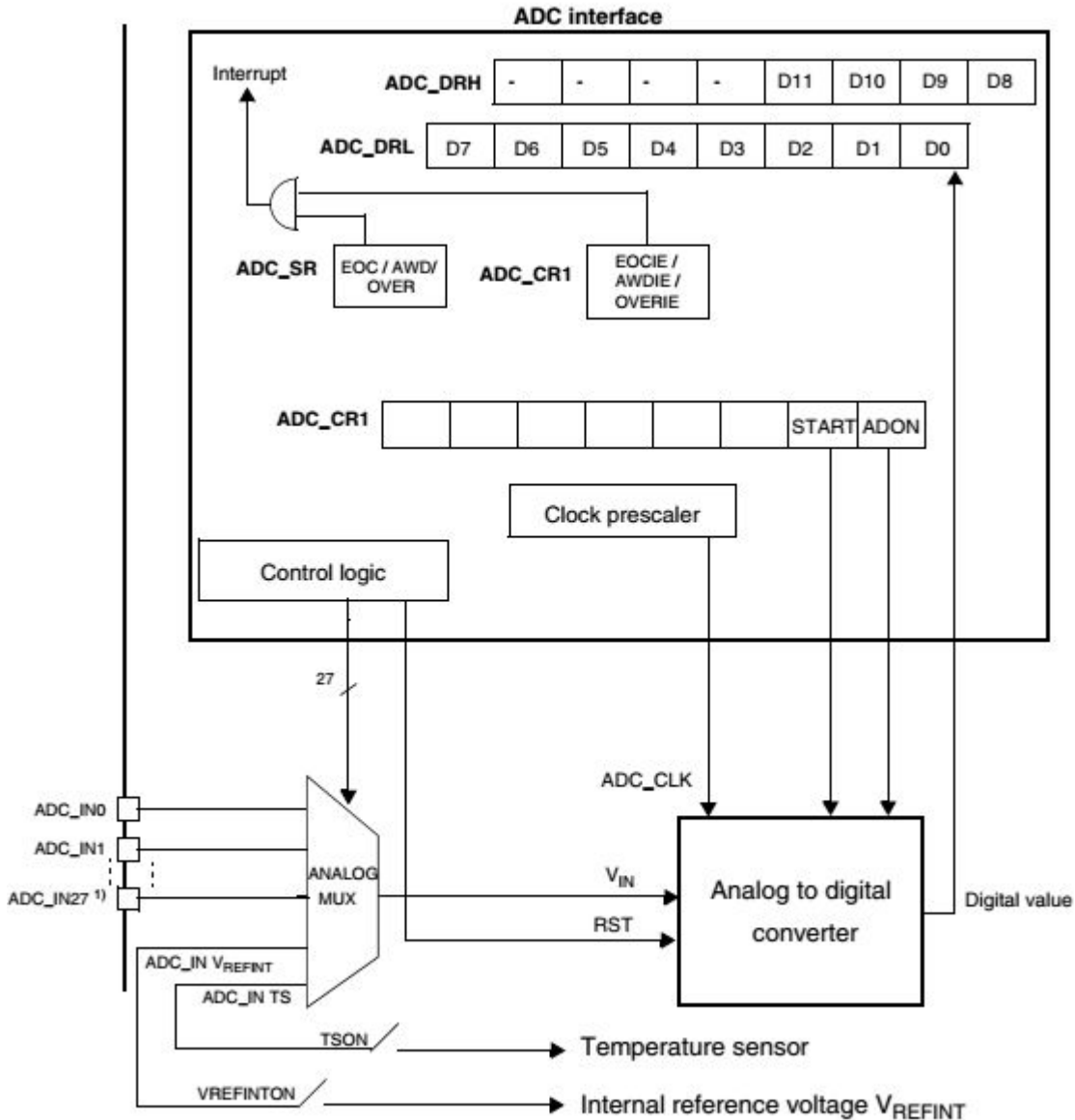
## Архитектура МК Аналоговый компаратор

Компаратор — электронная схема, принимающая на свои входы два аналоговых сигнала и выдающая логическую «1», если сигнал на прямом входе больше, чем на инверсном входе, и логический «0», если сигнал на прямом входе меньше, чем на инверсном входе.

Аналоговый компаратор сравнивает уровни на положительном выводе PE2 (АС+) и отрицательном выводе PE3 (АС-). При напряжении на положительном выводе PE2 (АС+) больше, чем напряжение на отрицательном выводе PE3 (АС-), выход аналогового компаратора АСО устанавливается в состояние 1. Выход компаратора может быть использован для управления входом захвата таймера-счетчика 1. Кроме того, компаратор может формировать свой запрос прерывания.



# Архитектура МК Аналого-цифровой преобразователь - (Analog to Digital Converter)

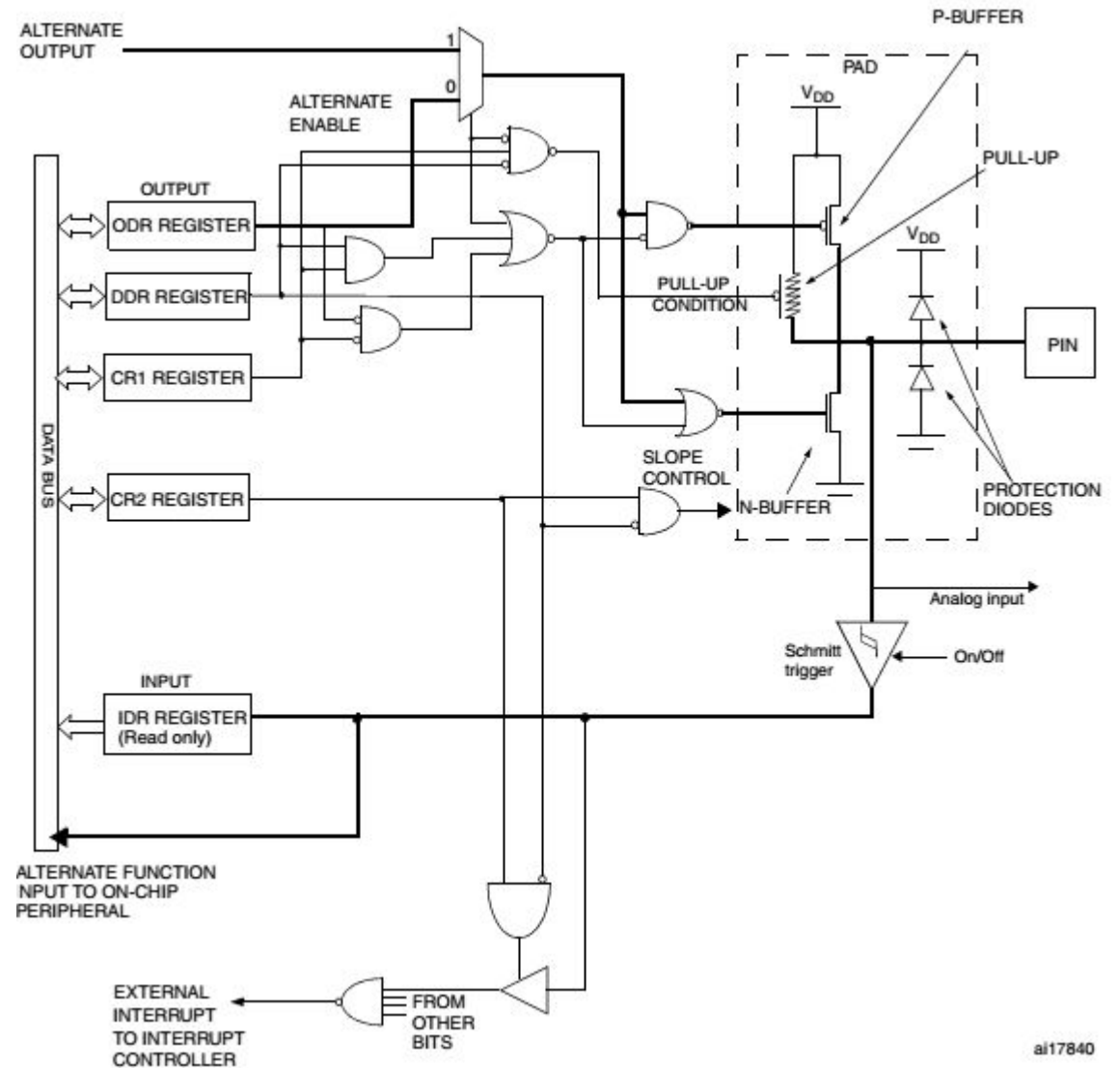


Микроконтроллеры оснащены 10 или 12-разрядным ADC последовательного приближения. ADC подсоединен к аналоговому мультиплексору, позволяющему использовать любой вывод порта в качестве входа.

# Архитектура МК *Порты ввода-вывода*

Во многих моделях процессоров ввод-вывод организуется теми же функциями, что и чтение-запись в память — так называемый «ввод-вывод через память». Соответственно, схемотехнически устройства ввода-вывода располагаются на шине памяти, и часть адресов памяти направляются на ввод-вывод.

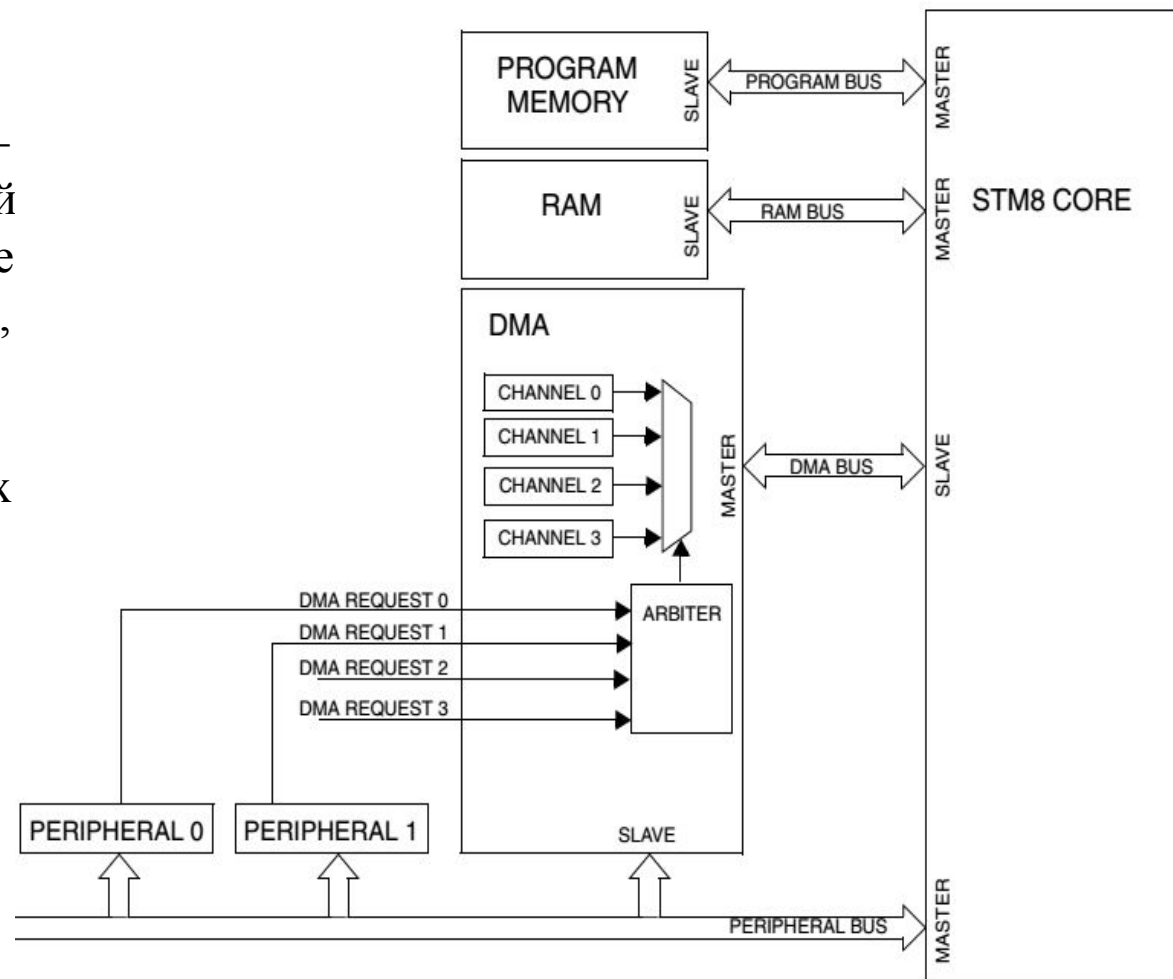
Одни порты используются для передачи данных (например, приём данных от клавиатуры или чтение времени системных часов), другие — для управления периферийными устройствами (команда чтения данных с диска). Исходя из этого порт ввода-вывода может быть портом только для ввода, только вывода, а также двунаправленным портом.



## Архитектура МК Контроллер прямого доступа к памяти

**Прямой доступ к памяти** (*direct memory access, DMA*) — режим обмена данными между устройствами и основной памятью, в котором центральный процессор (ЦП) не участвует. Так как данные не пересылаются в ЦП и обратно, скорость передачи увеличивается.

Данный модуль характерен для современных микроконтроллеров с ARM ядром.



## Двоичная система счисления

10	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001

При записи двоичных чисел принято делать приставку **0b**.

## Побитовые операции

Пример **0b01010010**

and	0	1	0	0	0	0	1	1
	0	1	1	1	0	0	1	0
	0	1	0	0	0	0	1	0
xor	0	1	0	0	0	0	1	1
	0	1	1	1	0	0	1	0
	0	0	1	1	0	0	0	1
or	0	1	0	0	0	0	1	1
	0	1	1	1	0	0	1	0
	0	1	1	1	0	0	1	1
not	0	1	0	0	0	0	1	1
	1	0	1	1	1	1	0	0

Побитовое отрицание (NOT)  
Побитовое И (AND)  
Побитовое ИЛИ (OR)  
Исключающее ИЛИ (XOR)

# Шестнадцатеричная система счисления

## Таблица шестнадцатеричных чисел

$X_{10}$	$X_{16}$	$X_2$
0	0	0000
1	1	0001
2	2	0010
3	3	0011
4	4	0100
5	5	0101
6	6	0110
7	7	0111

$X_{10}$	$X_{16}$	$X_2$
8	8	1000
9	9	1001
10	A	1010
11	B	1011
12	C	1100
13	D	1101
14	E	1110
15	F	1111

При записи шестнадцатеричных чисел принято делать приставку **0x**

$X_{10}$	$X_{16}$
16	0x10
32	0x20
255	0xFF