

## **Модуль 12 – битного АЦП в микроконтроллерах PIC16C770/771**

Статья основывается на технической документации DS41120A  
компании Microchip Technology Incorporated, USA.

**© ООО «Микро-Чип»  
Москва - 2001**

Распространяется бесплатно.  
Полное или частичное воспроизведение материала допускается только с письменного разрешения  
ООО «Микро-Чип»  
тел. (095) 737-7545  
[www.microchip.ru](http://www.microchip.ru)

## Модуль 12 – битного АЦП в микроконтроллерах PIC16C770/771

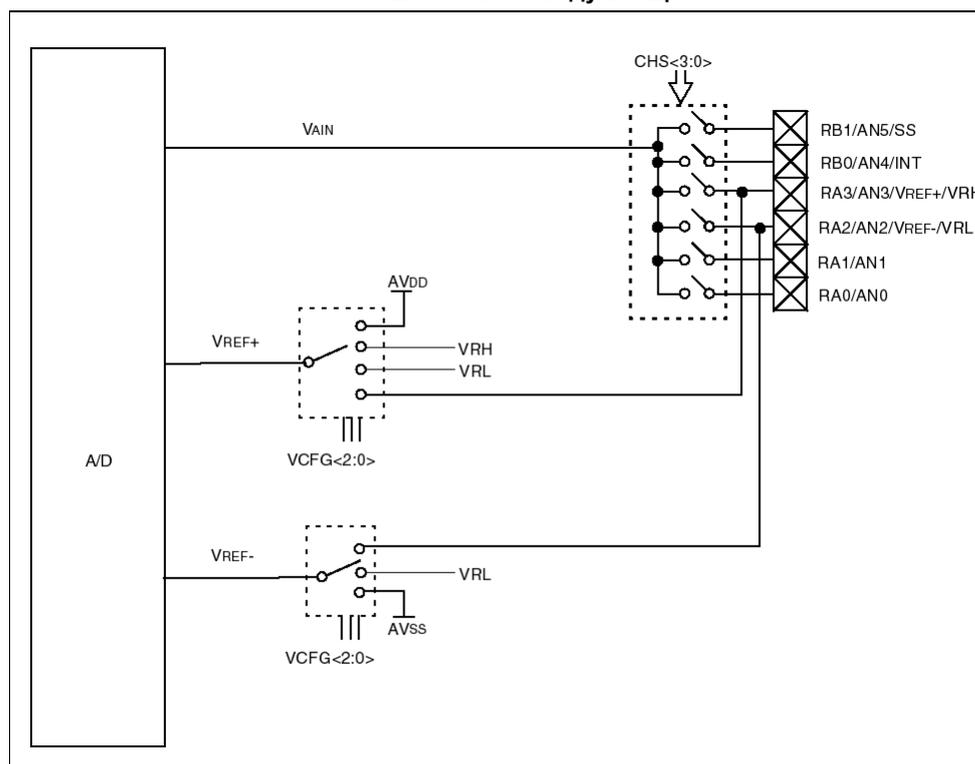
Статья основывается на технической документации DS41120A компании Microchip Technology Incorporated, USA.

Модуль аналого-цифрового преобразования (АЦП) имеет 5 аналоговых каналов.

Входной аналоговый сигнал поступает на АЦП через коммутатор каналов и преобразуется в соответствующий 12-битный цифровой код. Положительный и отрицательный входы опорного напряжения могут быть программно выбраны либо с выводов AVdd и AVss, либо со входов Vref+ и Vref- или внутреннего источника опорного напряжения VRH и VRL.

Допускается работа модуля АЦП в SLEEP режиме микроконтроллера, при этом в качестве источника импульсов для АЦП должен быть выбран RC-генератор.

Блок схема модуля АЦП



Для управления АЦП в микроконтроллере используется 5 регистров:

- регистр результата старший байт (ADRESH)
- регистр результата младший байт (ADRESL)
- регистр управления 0 (ADCON0)
- регистр управления 1 (ADCON1)
- регистр выбора аналоговых входов (ANSEL)

Регистр ADCON0 используется для настройки работы модуля АЦП и выбора рабочего канала. С помощью регистра ADCON1 устанавливается, правило сохранения результата в спаренном 16-битном регистре ADRESH:ADRESL и используемый источник опорного напряжения.

В регистре ADRESH:ADRESL сохраняется 12-битный результат аналого-цифрового преобразования. Когда преобразование завершено, результат преобразования записывается в регистр ADRESH:ADRESL, после этого сбрасывается флаг GO/DONE (ADCON0<2>) и устанавливается флаг прерывания ADIF регистра PIR1.

В регистре ANSEL указывается, какие линии АЦП будут использоваться как аналоговые входы. При этом соответствующие биты регистров TRIS должны быть установлены.

Перед началом преобразования необходимо сделать паузу в 20-30 мкс после выбора аналогового канала и каждого преобразования для заряда входной емкости АЦП  $C_{HOLD}$ . Затем установить бит GO/DONE (ADCON0<2>) для начала преобразования.

Рекомендованная последовательность действий для работы с АЦП:

1. Выбрать аналоговые входы (ANSEL)
2. Установить соответствующие биты регистров TRISA или TRISB
3. Настроить модуль АЦП.
  - выбрать – формат сохранения результата, источник опорного напряжения (ADCON1)
  - выбрать источник импульсов преобразования (ADCON0)
  - выбрать входной канал АЦП (ADCON0)
  - включить модуль АЦП (ADCON0)
4. Настроить прерывание от АЦП модуля (если необходимо)
  - сбросить бит ADIF (флаг окончания преобразования)
  - установить бит ADIE (маска прерывания от АЦП)
  - установить биты GIE, PEIE
5. Пауза необходимая для зарядки конденсатора  $C_{HOLD}$  (не менее  $3T_{da}$ )
6. Начать аналого-цифровое преобразование
  - установить GO/DONE бит (ADCON0)
7. Ожидать, окончания преобразования (не менее  $13T_{da}$ )
  - ждать, пока бит GO/DONE не будет сброшен ИЛИ
  - ожидать прерывание по окончании преобразования
8. Считать результат преобразования из регистра ADRESH:ADRESL, сбросить бит ADIF, если это необходимо
9. Для следующего преобразования необходимо выполнить шаги начиная с пункта 1, 2, 3 или 4. Время преобразования одного бита определяется как время  $T_{AD}$ . Минимальное время ожидания перед следующим преобразованием должно составлять не менее  $2T_{AD}$ .

Замечание: Бит GO/DONE и бит включения АЦП ADON должны устанавливаться различными командами!

Регистр ADCON0

R/W - 0	R/W - 0	R/W - 0	R/W - 0	R/W - 0	R/W - 0	R/W - 0	R/W - 0
<b>ADCS1</b>	<b>ADCS0</b>	<b>CHS2</b>	<b>CHS1</b>	<b>CHS0</b>	<b>GO/DONE</b>	<b>CHS0</b>	<b>ADON</b>
бит7						бит0	
<p>бит 7-6: <b>ADCS1:ADCS0</b>: выбор источника импульсов преобразования модуля АЦП            Если внутренние источники опорного напряжения VRL и/или VRH не используются            00 = Fosc/2            01 = Fosc/8            10 = Fosc/32            11 = FRC (источник импульсов – внутренний RC генератор)            Если выбран внутренний источник опорного напряжения VRL и/или VRH            00 = Fosc/16            01 = Fosc/64            10 = Fosc/256            11 = FRC (источник импульсов – внутренний RC генератор)</p>							
<p>бит 1,5-3: <b>CHS3:CHS0</b>: выбор рабочего аналогового канала            0000 = канал 0, (AN0)            0001 = канал 1, (AN1)            0010 = канал 2, (AN2)            0011 = канал 3, (AN3)            0100 = канал 4, (AN4)            0101 = канал 5, (AN5)            0110:1111 = зарезервированно</p>							
<p>бит 2: <b>GO/DONE</b>: бит состояния модуля АЦП            1 = модуль АЦП производит преобразование (установка бита вызывает начало преобразования)            0 = модуль АЦП преобразования нет (аппаратно сбрасывается по завершению преобразования)</p>							
<p>бит 0: <b>ADON</b>: включение модуля АЦП            1 = включить модуль АЦП            0 = модуль АЦП выключен (что снижает общий ток потребления микроконтроллера)</p>							

Регистр ADCON1

R/W - 0	R/W - 0	R/W - 0	R/W - 0	U - 0	U - 0	U - 0	U - 0
<b>ADFM</b>	<b>VCFG2</b>	<b>VCFG1</b>	<b>VCFG0</b>	-	-	-	-
бит7							бит0

бит 7: **ADFM**: формат сохранения 12-битного результата  
 1 = правое выравнивание  
 0 = левое выравнивание

бит 6-4: **VCFG2:VCFG0**: биты выбора источника опорного напряжения

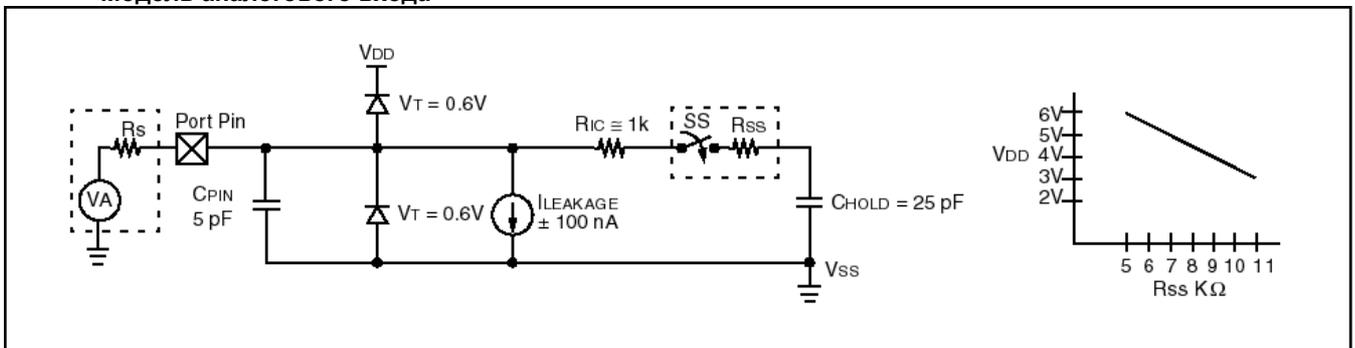
VCFG	Vref+	Vref-
000	AVdd	Avss
001	Внешний Vref+	Внешний Vref-
010	Внутренний VRH	Внутренний VRL
011	Внешний Vref+	Avss
100	Внутренний VRH	Avss
101	AVdd	Внешний Vref-
110	AVdd	Внутренний VRL
111	Внутренний VRL	Avss

бит 3-0: Не используются

**Требования, необходимые для нормального функционирования модуля АЦП**

Для обеспечения необходимой точности преобразования конденсатор C<sub>HOLD</sub> должен успевать полностью заряжаться до уровня входного напряжения. Схема модели входа АЦП приведена на рисунке.

**Модель аналогового входа**



Сопротивления  $R_s$  и  $R_{SS}$  напрямую влияют на время зарядки емкости  $C_{HOLD}$ . Величина сопротивления ключа выборки ( $R_{SS}$ ) зависит от напряжения питания ( $V_{DD}$ ). Значение входного сопротивления  $R_s$  влияет на значение входного смещения напряжения (через ток утечки вывода). Максимальное рекомендуемое выходное сопротивление аналогового источника сигнала должно быть не более 2,5 кОм. После того, как будет выбран один из нескольких аналоговых входных каналов, но прежде чем будет производиться преобразование, должно пройти определенное время. Для нахождения данного времени воспользуйтесь уравнением, описанным далее. Данное уравнение производит вычисление с ошибкой в пределах 1/4 LSb (16384 шагов АЦП). Ошибка в 1/4 LSb, это максимальная погрешность, позволяющая функционировать модулю АЦП с необходимой точностью вычисления.

**Уравнение вычисления минимального времени заряда емкости  $C_{HOLD}$ .**

$$V_{HOLD} = (V_{REF} - (V_{REF}/16383)) \cdot (1 - e^{-(T_{CAP}/C_{HOLD}(R_{IC} + R_{SS} + R_S)})$$

Уравнение дает:  $V_{HOLD} = (V_{REF}/16383)$ , для разрешения в 1/4 LSB.

Из уравнения получаем:  $T_{CAP} = -(25 \text{ пФ})(1 \text{ кОм} + R_{SS} + R_S) \ln(1/16383)$

Рассмотрим пример нахождения минимального времени  $T_{ACQ}$

Исходные данные:

$C_{HOLD} = 25 \text{ пФ}$ ;  $R_S = 2,5 \text{ кОм}$ ; Ошибка в 1/4 LSB;  $V_{DD} = 5V \rightarrow R_{SS} = 10 \text{ кОм}$

Temp (максимальная рабочая температура) = 50°C

**Замечание 1:** Опорное напряжение ( $V_{REF}$ ) не влияет на уравнение.

**Замечание 2:** Конденсатор ( $C_{HOLD}$ ) после каждого преобразования не разряжается.

**Замечание 3:** Максимальное рекомендуемое сопротивление аналогового источника сигнала составляет 2,5кОм, для компенсации тока утечки вывода.

**Замечание 4:** После того, как преобразование завершено, необходимо программно обеспечить задержку не менее  $2.0T_{AD}$ , прежде чем начать следующее преобразование. В течении этого времени конденсатор  $C_{HOLD}$  не подключен к выбранному входному каналу АЦП.

**Пример вычисления времени  $T_{ACQ}$** 

$T_{ACQ} = \text{Amplifier Settling Time} + \text{Holding Capacitor Charging Time} + \text{Temperature Coefficient}$

$T_{ACQ} = 5 \text{ мксек} + T_{CAP} + [(Temp - 25^\circ C)(0.05 \text{ мсек}/^\circ C)]$

$T_{CAP} = -C_{HOLD} (R_{IC} + R_{SS} + R_S) \ln(1/16383) = -25 \text{ пФ} (1 \text{ кОм} + 10 \text{ кОм} + 2,5 \text{ кОм}) \ln(1/16383)$

$= -25 \text{ пФ} (13,5 \text{ кОм}) \ln(1/16383) = -0.338 \text{ мксек} (-9.704)$

$T_{CAP} = 3.3 \text{ мксек}$

$T_{ACQ} = 5 \text{ мксек} + 3.3 \text{ мксек} + [(50^\circ C - 25^\circ C)(0.05 \text{ мсек}/^\circ C)] = 8.3 \text{ мксек} + 1.25 \text{ мксек}$

$T_{ACQ} = 9.55 \text{ мксек}$

**Выбор источника импульсов преобразования АЦП**

Время преобразования зависит от  $T_{AD}$ . Для 12-битного аналого-цифрового преобразования требуется время  $13T_{AD}$ .  $T_{AD}$  зависит от выбранного источника импульсов преобразования, доступны четыре варианта:

- 2 TOSC
- 8 TOSC
- 32 TOSC
- Внутренний RC генератор.

Если будет выбран внутренний источник опорного напряжения VRH и/или VRL то коэффициент деления увеличится в 8 раз.

Для достоверного аналого-цифрового преобразования должен быть выбран источник импульсов, обеспечивающий время  $T_{AD}$  не менее 1.6 мксек.

**Зависимость времени  $T_{AD}$  от рабочей частоты**

Источник опорного напряжения	Источник импульсов АЦП		Рабочая частота			
	Источник	ADCS1: ADCS0	20МГц	5МГц	4МГц	1.25МГц
Внешний	2TOSC	00	100нс <sup>(2)</sup>	800нс <sup>(2)</sup>	500нс <sup>(2)</sup>	1.6 мкс
	8TOSC	01	400нс <sup>(2)</sup>	1.6 мкс	2 мкс	6.4 мкс
	32TOSC	10	1.6 мкс	6.4 мкс	8 мкс <sup>(3)</sup>	24мкс <sup>(3)</sup>
	RC	11	2-6мкс <sup>(1,4)</sup>	2-6мкс <sup>(1,4)</sup>	2-6мкс <sup>(1,4)</sup>	2-6мкс <sup>(1,4)</sup>
Внутренний VRH и/или VRL	16TOSC	00	800нс <sup>(2)</sup>	3.2 мкс <sup>(2)</sup>	4 мкс <sup>(2)</sup>	12.8 мкс
	64TOSC	01	6.4 мкс <sup>(2)</sup>	12.8 мкс	16 мкс	51.2 мкс
	256TOSC	10	12.8 мкс	51.2 мкс	64 мкс <sup>(3)</sup>	192мкс <sup>(3)</sup>
	RC	11	16-48 мкс <sup>(4,5)</sup>	16-48мкс <sup>(4,5)</sup>	16-48мкс <sup>(4,5)</sup>	16-48мкс <sup>(4,5)</sup>

Затененные ячейки показывают, что значение находится за пределами рекомендуемого порога значений.

Замечания:

1. RC-источник импульсов имеет значение  $T_{AD}$  примерно равное 4мкс при  $V_{dd} > 3 \text{ В}$ .
2. Это значение выходит за пределы минимально-допустимого времени  $T_{AD}$ .
3. Для более быстрого преобразования рекомендуется выбрать другой источник импульсов.
4. Если рабочая частота устройства больше 1МГц, рекомендуется использовать RC-генератор импульсов только для работы в SLEEP-режиме.
5. RC-источник импульсов имеет значение  $T_{AD}$  примерно равное 32мкс при  $V_{dd} > 3 \text{ В}$ .

### Настройка аналоговых входов

Регистры ANSEL и TRIS отвечают за настройку выводов АЦП. Если выводы микросхемы конфигурируются как аналоговые входы, то при этом должны быть установлены соответствующие биты в регистре TRIS. Если соответствующий бит сброшен, вывод микросхемы настроен как цифровой выход, со значениями выходных напряжений V<sub>OH</sub> или V<sub>OL</sub>.

Модуль АЦП функционирует независимо от состояния битов CHS3:CHS0 и битов TRIS, ANLS.

**Замечание 1:** При чтении содержимого регистра порта нули будут установлены в тех разрядах, которые были настроены как аналоговые входы.

**Замечание 2:** Значения напряжений, подаваемых на выводы, настроены как аналоговые входы, включая выводы (AN5:AN0), могут влиять на ток потребления входного буфера, который может выйти за пределы значений, оговоренных в технической спецификации.

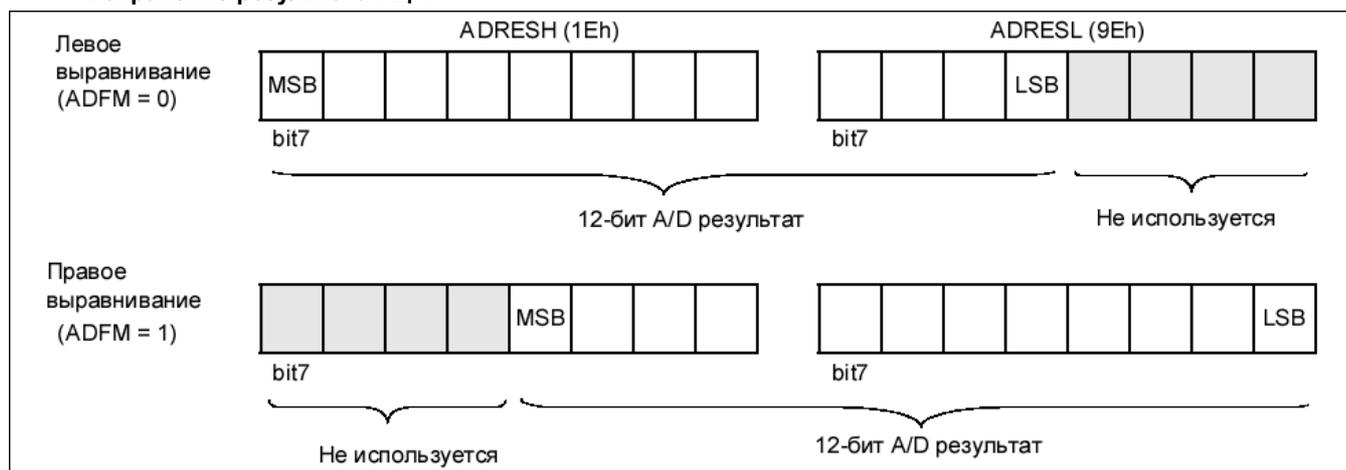
### Аналого-цифровое преобразование

Сброс бита GO/DONE во время преобразования приведет к его прекращению, при этом регистр ADRESH:ADRESL не изменит своего содержимого. После досрочного завершения преобразования необходимо обеспечить временную задержку 2T<sub>AD</sub>, после чего будет автоматически подключен выбранный канал.

**Замечание:** Бит GO/DONE и бит включения АЦП должны устанавливаться различными командами!

Сохранение 12-битного результата преобразования производится в спаренном 16-битном регистре ADRESH:ADRESL. Запись результата преобразования может выполняться с правым или левым выравниванием, в зависимости от значения бита ADFM. Не задействованные биты регистра ADRESH:ADRESL читаются как '0'.

#### Сохранение результата АЦП



#### Пример программы

```
BCF      PIR1, ADIF      ; Сбросить флаг прерываний от АЦП
BSF      STATUS, RP0    ; Выбрать банк 1
CLRF     ADCON1         ; Выбрать Avdd и Avss, источник ОН
MOVLW   0x01           ;
MOVWF    ANSEL         ; Настроить AN0 как аналоговый вход
MOVWF    TRISA         ;
BSF      PIE1, ADIE     ; Разрешить прерывания от АЦП
BCF      STATUS, RP0    ; Выбрать банк 0
MOVLW   0xC1           ; Выбрать RC генератор и канал AN0
MOVWF    ADCON0        ;
BSF      INTCON, PEIE   ; Включить прерывания от периферийных устройств
BSF      INTCON, GIE    ; Разрешить прерывания
```

; Убедитесь, что прошло определенное время для выбранного входного  
; канала. Только после этого может начинаться процесс аналого-  
; цифрового преобразования

```
BSF      ADCON0, GO     ; Начинаем аналого-цифровое преобразование
```

; После окончания процесса преобразования установится бит  
; ADIF а бит GO/DONE сбросится.



### Подключение к модулю АЦП

Если значение входного напряжения превышает на 0.3В величину порога питающих напряжений (VSS и VDD), то точность преобразования выйдет за пределы значений, оговоренных в спецификации.

Иногда, для сглаживания пульсаций входного сигнала, на вход АЦП добавляется внешняя RC-цепочка. Значение сопротивления R должно выбираться из соображения, чтобы общее сопротивление источника сигнала было в пределах рекомендованной величины 2,5кОм. Любой внешний электронный компонент, подключенный к аналоговому входу (конденсатор, стабилитрон и др.), должны иметь низкий ток утечки через вывод.

### Регистры и биты, используемые при работе с АЦП

Адрес	Имя	Бит 7	Бит 6	Бит 5	Бит 4	Бит 3	Бит 2	Бит 1	Бит 0	Состояние POR, BOR	Состояние Reset
0Bh, 8Bh, 10Bh, 18Bh	INTCON	GIE	PEIE	T0IE	INTE	RBIE	T0IF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000U
0Ch	PIR1	-	ADIF	-	-	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF	-0-- 0000	-0- 00000
8Ch	PIE1	-	ADIE	-	-	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE	-0-- 0000	-0-- 0000
1Eh	ADRESH	Результат преобразования старший байт								xxxx xxxx	uuuu uuuu
9Eh	ADRESL	Результат преобразования младший байт								xxxx xxxx	uuuu uuuu
9Bh	REFCON	VRHEN	VRLEN	VRHO	VRLO	-	-	-	-	0000 ----	0000 ----
1Fh	ADCON0	ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	CHS3	ADON	0000 0000	0000 0000
9Fh	ADCON1	ADMF	VCFG2	VCFG1	VCFG0	-	-	-	-	0000 ----	0000 ----
05h	PORTA	Порт данных PORTA								000x 0000	000u 0000
06h	PORTB	Порт данных PORTB								xxxx xx00	uuuu uu00
85h	TRISA	Регистр направления данных PORTA								1111 1111	1111 1111
86h	TRISB	Регистр направления данных PORTB								1111 1111	1111 1111
9Dh	ANSEL	-	-	ANS5	ANS4	ANS3	ANS2	ANS1	ANS0	1111 1111	1111 1111

Примечание: x = неизвестно, u = без изменений, - = не используются, читаются как "0". Затененные клетки не используются при аналого-цифровом преобразовании.

Статья основывается на технической документации DS41120A компании Microchip Technology Incorporated, USA.