

Лекция 6

Аналогово-Цифровой преобразователь

Устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в дискретный код. Как правило, АЦП — электронное устройство, преобразующее напряжение в двоичный цифровой код. Тем не менее, некоторые неэлектронные устройства с цифровым выходом следует также относить к АЦП, например, некоторые типы преобразователей угол-код. Простейшим одноразрядным двоичным АЦП является компаратор.

— Wikipedia

Статья для общего представления есть на habre:

[Аналого-цифровой преобразователь для самых маленьких](#)

АЦП бывают **линейными** и нелинейными, мы будем работать только с **линейными** АЦП

Основные характеристики АЦП

- Разрешение
 - Разрядность
 - Эффективная разрядность
- Передаточная характеристика АЦП
- Точность
- Нелинейность
- Ошибки квантования
- Частота дискретизации

Разрешение

Разрешение АЦП — минимальное изменение величины аналогового сигнала, которое может быть преобразовано данным АЦП.

- В случае единичного измерения без учёта шумов разрешение напрямую определяется разрядностью АЦП.
- Разрядность АЦП характеризует количество дискретных значений, которые преобразователь может выдать на выходе.
- В двоичных АЦП измеряется в битах. Например, двоичный 8-разрядный АЦП способен выдать 256 дискретных значений (0...255), $2^8=256$.

Разрешение по напряжению равно разности напряжений, соответствующих максимальному и минимальному выходному коду, делённой на количество выходных дискретных значений.

— Wikipedia

Пример :

- Диапазон входных значений = от 0 до 3 вольт
- Разрядность двоичного АЦП 12 бит: $2^{12} = 4096$ уровней квантования
- Разрешение двоичного АЦП по напряжению: $(3-0)/4096 = 0,0007324$ вольт = 0,7324 мВ

Эффективная разрядность

На практике разрешение АЦП ограничено отношением сигнал/шум входного сигнала. При большой интенсивности шумов на входе АЦП различение соседних уровней входного сигнала становится невозможным.

При этом реально достижимое разрешение описывается эффективной разрядностью (англ. effective number of bits, ENOB), которая меньше, чем реальная разрядность АЦП.

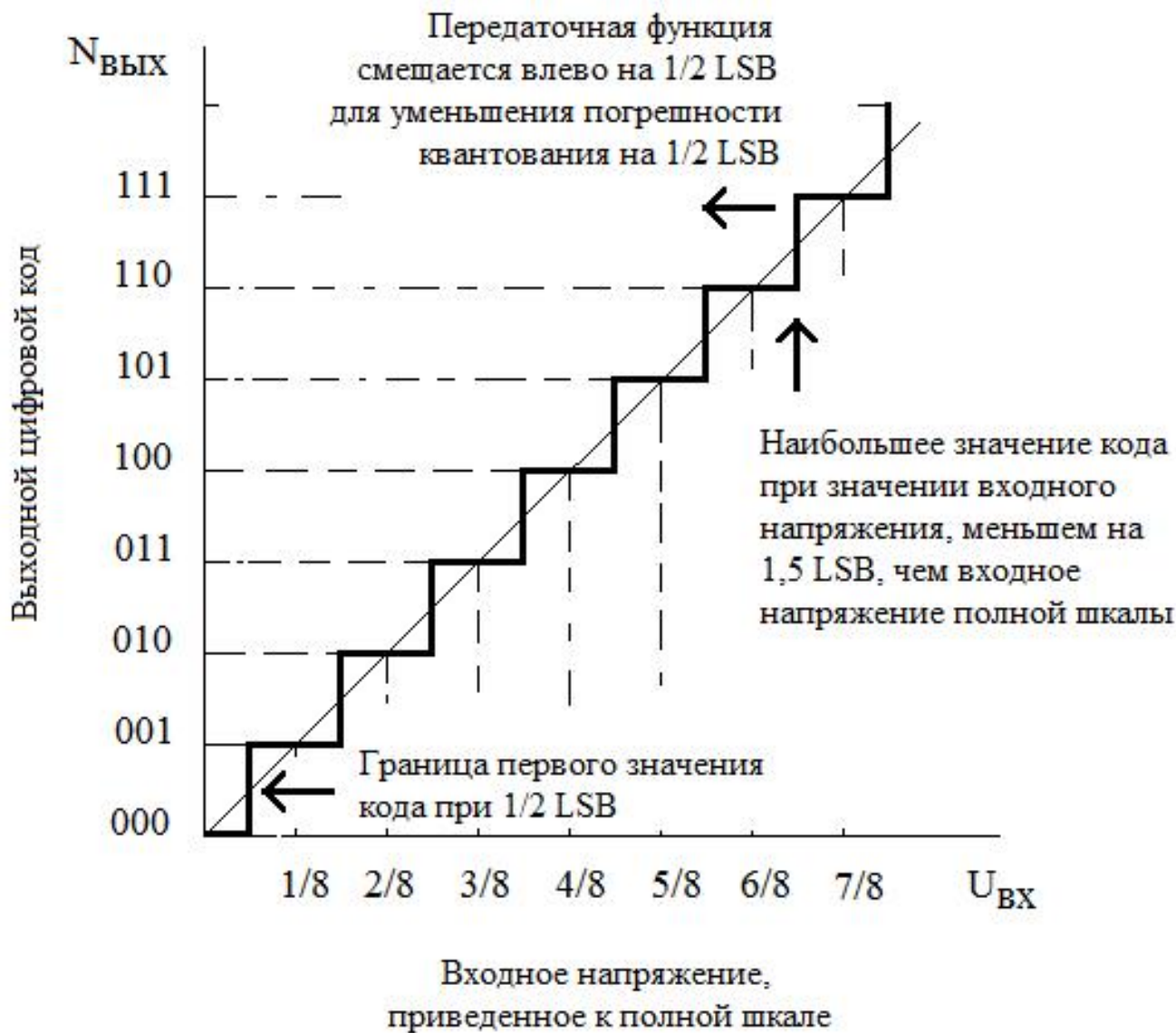
При преобразовании сильно зашумлённого сигнала младшие разряды выходного кода практически бесполезны, так как содержат шум. Для достижения заявленной разрядности отношение сигнал/шум входного сигнала должно быть примерно 6 дБ на каждый бит разрядности (6 дБ соответствует двукратному изменению уровня сигнала).

— Wikipedia

Передаточная характеристика АЦП

Передаточная характеристика АЦП — зависимость числового эквивалента выходного двоичного кода от величины входного аналогового сигнала.

Для линейных АЦП всегда возможно провести такую прямую линию, чтобы все точки передаточной характеристики, соответствующие входным значениям $\Delta \cdot 2^k$ где Δ — шаг дискретизации, k лежит в диапазоне $0..N$, где N — разрядность АЦП, были от неё равноудалены.



Точность

Имеется несколько источников погрешности АЦП.

- Ошибки квантования и нелинейности присущи любому аналого-цифровому преобразованию.
- Апертурные ошибки, которые являются следствием джиттера (англ. jitter) тактового генератора, они проявляются при преобразовании сигнала в целом (а не одного отсчёта).

Эти ошибки измеряются в единицах, называемых МЗР — младший значащий разряд (LSB англ.).

— Wikipedia

Для 12-битного двоичного АЦП ошибка в 1 МЗР составляет $1/4096$ от полного диапазона сигнала, то есть 0,0244 %.

Ошибка квантования

- Ошибки квантования являются следствием ограниченного разрешения АЦП. Этот недостаток не может быть устранён ни при каком типе аналого-цифрового преобразования.
- Абсолютная величина ошибки квантования при каждом отсчёте находится в пределах от нуля до половины МЗР. В общем случае можно считать, что ошибка квантования равна половине МЗР.

— Wikipedia

Нелинейность

Всем АЦП присущи ошибки, связанные с нелинейностью, которые являются следствием физического несовершенства АЦП.

Это приводит к тому, что передаточная характеристика (в указанном выше смысле) отличается от линейной (точнее от желаемой функции, так как она не обязательно линейна). Такие ошибки могут быть уменьшены путём калибровки.

— Wikipedia

Частота дискретизации

Аналоговый сигнал является непрерывной функцией времени, в АЦП он преобразуется в последовательность цифровых значений. Следовательно, необходимо определить частоту

выборки цифровых значений из аналогового сигнала.

Частота, с которой производятся цифровые значения, получила название частота дискретизации АЦП.

Непрерывно меняющийся сигнал с ограниченной спектральной полосой подвергается оцифровке (то есть значения сигнала измеряются через интервал времени T — период дискретизации), и исходный сигнал может быть точно восстановлен из дискретных во времени значений путём интерполяции. Точность восстановления ограничена ошибкой квантования. Однако в соответствии с теоремой Котельникова — Шеннона точное восстановление амплитуды возможно, только если частота дискретизации выше, чем удвоенная максимальная частота в спектре сигнала.

Поскольку реальные АЦП не могут произвести аналого-цифровое преобразование мгновенно, входное аналоговое значение должно удерживаться постоянным от начала до конца процесса преобразования (этот интервал времени называют время преобразования).

Эта задача решается путём использования специальной схемы на входе АЦП — устройства выборки-хранения (УВХ).

УВХ, как правило, хранит входное напряжение на конденсаторе, который соединён со входом через аналоговый ключ: при замыкании ключа происходит выборка входного сигнала (конденсатор заряжается до входного напряжения), при размыкании — хранение.

Типы АЦП

- **АЦП прямого(параллельные АЦП) преобразования**
- **АЦП последовательного приближения**
- **Сигма-дельта АЦП**
- АЦП дифференциального кодирования
- АЦП сравнения с пилообразным сигналом
- АЦП с уравниванием заряда
- Оптические АЦП

АЦП последовательного преобразования

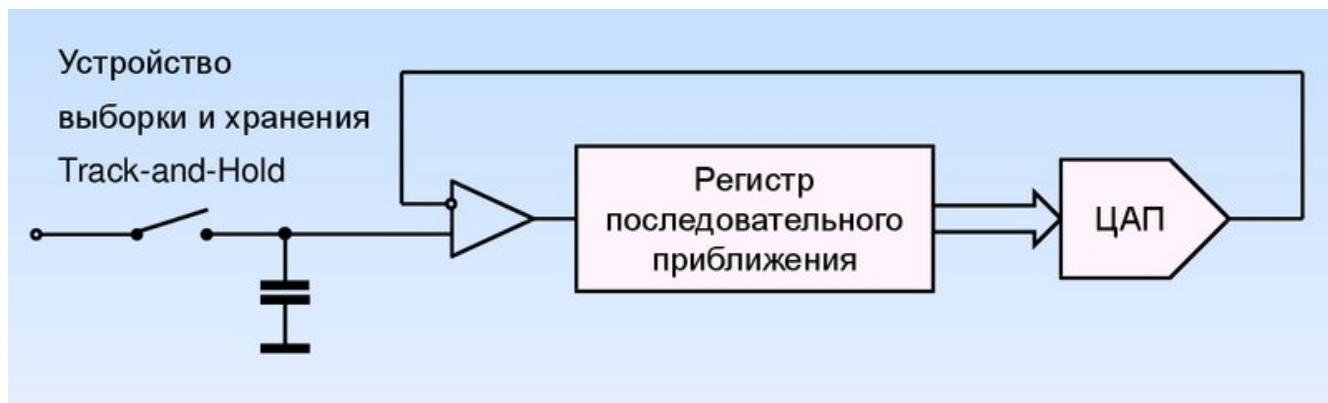
Ацп последовательного приближения работает методу половинного деления.

Пример для 8 битного двоичного АПЦ:

- На компаратор подается значение вначале равное половине опорного напряжения($U_{оп}/2$) (соответствующее установленном старшем бите 1000 0000b)
- Если компаратор сработал старший бит скидывается, выставляется 1/4 опорного напряжения ($U_{оп}/4$) (0100 0000b)
- Если компаратор не сработал старший бит остается, и выставляется 3/4 опорного

напряжения ($U_{оп}/4$) (1100 0000b)

- И так далее до самого младшего бита.



Сигма Дельта АЦП

Дома, подготовить доклад

АЦП прямого действия

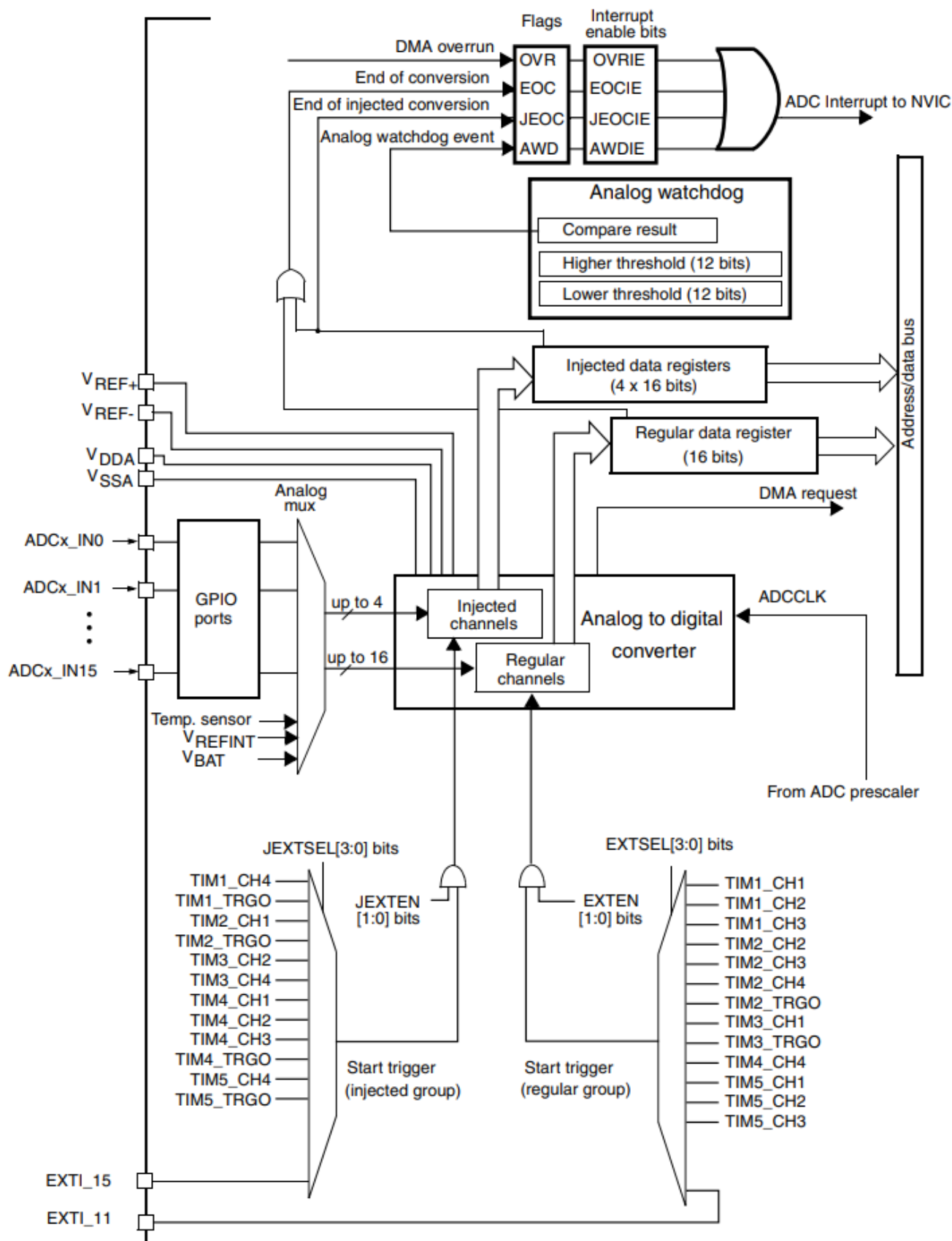
Дома, подготовить доклад

АПП микроконтроллера STM32F411

АЦП(макс 12 разрядов) микроконтроллера STM32F411 работает по принципу последовательного приближения.

- Основные элементы АЦП:
 - Наличие регулярных и инжектированных каналов – отличие только в том, что инжектированные каналы могут писать данные в 4 регистра с 4 каналов сразу, а регулярный только в один регистр
 - 19 аналоговых каналов, 16 из которых которые могут сконфигурированы на работу от внешних источников или 3 внутренних.
 - Внешние каналы поступают на мультиплексор, где выбирается только один из них. Т.е. в один момент времени может быть измерено напряжение только с одного канала.
 - Результат преобразования сохраняется в регистрах данных. Для регулярных каналов это только один 16 битный регистр. Для инжектированных – 4.
 - Запуск преобразования может быть как программным, так и внешним. Внешний запуск может происходить от таймеров или с двух внешних входов.

Схема АЦП микроконтроллера STM32F411



Особенности АЦП микроконтроллера STM32F411

- Разрядность АЦП можно изменять
 - 6, 8, 10, или 12 разрядов.
- Для одного канала можно задать разные режимы:

- однократно измерить аналоговую величину
- запустить канал в режиме непрерывного измерения.
- Режим сканирования
 - Можно задать группу каналов и порядок следования каналов в группе. Тогда измерения будут идти последовательно друг за другом, входной мультиплексор будет подключать внешние каналы к АЦП по очереди, в соответствии с запрограммированным порядком.
- Функция внешнего запуска для регулярных и инжектированных каналов.
- Режим “прерывистых” преобразований.
- Время одного преобразования зависит от частоты тактирования АЦП и времени скорости дискретизации, которое можно настроить.
 - $T_{conv} = \text{Sampling time} + 12 \text{ cycles}$. При 1 МГц, а время дискретизации 3 циклам, то полное время преобразование будет 15 тактов или 15 мкс.
- Размах входного сигнала не должен выходить за пределы опорного напряжения V_{ref} .
- Возможность введения временной задержки, автоматически вставляемой между преобразованиями. Длительность задержки программируется.
- Генерация запроса для прямого доступа к памяти (режим DMA) во время преобразования в регулярном канале.

Режим одиночного преобразования

В этом режиме АЦП находится сразу после сброса. Бит CONT регистра ADC_CR2 равен 0.

- Для начала работы с АЦП в этом режиме нужно
 - Настроить нужный порт, подключенный к нужному каналу АЦП на аналоговый вход
 - Подать тактирование на АЦП
 - Выбрать нужный канал для измерения
 - Настроить канал АЦП на нужную частоту преобразования
 - Включить АЦП
 - Начать преобразование
 - Дождаться флага готовности преобразования
 - Считать преобразованное значение

Режим сканирования

В этом режиме опрашивается группа каналов.

- Режим выбирается установкой бита SCAN в регистре ADC_CR1.
 - АЦП опрашивает все каналы, выбранные в регистрах ADC_SQRx (регулярные каналы)
 - Для каждого канала группы выполняется одиночное преобразование. После

окончания каждого преобразования следующий канал в группе опрашивается автоматически.

- Если установлен режим непрерывного преобразования (CONT = 1), то после последнего преобразования в группе, преобразования не прекращаются, а заново начинаются от первого выбранного канала в группе.
- Если установлен бит DMA, то данные из регистра ADC_DR пересылаются в память после каждого преобразования.
- В регулярных каналах флаг окончания преобразования EOC может устанавливаться либо в конце каждого преобразования, либо только по окончании всей последовательности. Для этого в регистре ADC_CR2 предусмотрен управляющий бит EOCS
 - EOCS = 0 – бит окончания преобразования EOC устанавливается после завершения всей последовательности регулярных преобразований.
 - EOCS = 1 – бит окончания преобразования EOC устанавливается после завершения каждого регулярного преобразования

Регистр статуса SR (ADC status register)

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved															
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Reserved										OVR	STRT	JSTRT	JEOC	EOC	AWD
										rc_w0	rc_w0	rc_w0	rc_w0	rc_w0	rc_w0

Bit5: OVR

Переполнение. Бит указывает, что данные преобразования регулярного канала были потеряны, т.е. программа не успела считать регистр данных регулярного канала, до следующего преобразования.

- 0: было переполнение
- 1: переполнения не было

Bit4: STRT

Флаг начала преобразования регулярного канала

- 0: преобразование начато
- 1: преобразование не начато

Bit1: EOC

Преобразование регулярных каналов закончено. Можно считывать регистр данных.

- 0: преобразование не закончено
- 1: преобразование закончено

Регистр управления CR1 (ADC control register 1)

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved					OVR1E	RES		AWDEN	JAWDEN	Reserved					
					rw	rw	rw	rw	rw						
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
DISCNUM[2:0]			JDISCEN	DISCEN	JAUTO	AWDSSL	SCAN	JEOCIE	AWDIE	EOCIE	AWDCH[4:0]				
rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw

Bits25..24: RES[1:0]

разрядность АЦП

- **00**: разрядность 12 бит (время преобразования $12 + 4 = 16$ тактов)
- **01**: разрядность 10 бит (время преобразования $11 + 4 = 15$ тактов)
- **10**: разрядность 8 бит (время преобразования $9 + 4 = 13$ тактов)
- **11**: разрядность 6 бит (время преобразования $7 + 4 = 11$ тактов)

Bit8: SCAN

Включение режима сканирования. В этом режиме опрашивается группа каналов. АЦП опрашивает все каналы, выбранные в регистрах ADC_SQRx (регулярные каналы). Для каждого канала группы выполняется одиночное преобразование. После окончания каждого преобразования следующий канал в группе опрашивается автоматически. Если установлен режим непрерывного преобразования ($CONT = 1$), то после последнего преобразования в группе, преобразования не прекращаются, а заново начинаются от первого выбранного канала в группе.

- **0**: режим сканирования выключен
- **1**: режим сканирования включен

Bit5: EOCIE

Разрешает прерывание по установке флага окончания преобразования EOC

- **0**: прерывание запрещено
- **1**: прерывание разрешено

Регистр управления CR2 (ADC control register 2)

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
reserved	SWSTART	EXTEN		EXTSEL[3:0]				reserved	JSWSTART	JEXTEN		JEXTSEL[3:0]			
	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw		rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
reserved				ALIGN	EOCS	DDS	DMA	Reserved						CONT	ADON
				rw	rw	rw	rw							rw	rw

<p>Bit30: SWSTART</p> <p>начать преобразование регулярного канала. Устанавливается программно, скидывает аппаратно.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 0: Преобразование не запущено • 1: Начать преобразование <p>Bit10: EOCS</p> <p>Выбор типа окончания преобразования</p> <ul style="list-style-type: none"> • 0: Бит Окончания преобразования ЕОС устанавливается после окончания преобразования для всей последовательности • 1: Бит Окончания преобразования ЕОС устанавливается после окончания преобразования для каждого канала 	<p>Bit9: DDS</p> <p>режим выключения DMA</p> <ul style="list-style-type: none"> • 0: DMA запросы не будут выполняться после последнего переданного данного • 1: DMA будут выполняться всегда, как только данные подготовлены и пока включен бит DMA <p>Bit8: DMA</p> <p>Включение DMA</p> <ul style="list-style-type: none"> • 0: DMA выключен • 1: DMA включен <p>Bit1: CONT</p> <p>Включение режима непрерывного преобразования</p> <ul style="list-style-type: none"> • 0: Режим единичного преобразования • 1: Режим непрерывного преобразования <p>Bit0: ADON</p> <p>Включение АЦП</p> <ul style="list-style-type: none"> • 0: Отключить АЦП и перейти в режим энергопреобразования • 1: Включить АЦП
---	--

Регистр настройки времени дискретизации АЦП SMPRx(ADC sample time register)

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved					SMP18[2:0]			SMP17[2:0]			SMP16[2:0]			SMP15[2:1]	
					rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
SMP15_0	SMP14[2:0]			SMP13[2:0]			SMP12[2:0]			SMP11[2:0]			SMP10[2:0]		
rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved		SMP9[2:0]			SMP8[2:0]			SMP7[2:0]			SMP6[2:0]			SMP5[2:1]	
		rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
SMP5_0	SMP4[2:0]			SMP3[2:0]			SMP2[2:0]			SMP1[2:0]			SMP0[2:0]		
rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw

Bits0..26 SMPx[2:0]

Выбор времени дискретизации для канала от х.

- **000**: 3 cycles
- **001**: 15 cycles
- **010**: 28 cycles
- **011**: 56 cycles
- **100**: 84 cycles
- **101**: 112 cycles
- **110**: 144 cycles
- **111**: 480 cycles

Регистр настройки последовательности преобразований SQR (ADC regular sequence register 1)

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved								L[3:0]				SQ16[4:1]			
								rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
SQ16_0	SQ15[4:0]						SQ14[4:0]				SQ13[4:0]				
rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw				rw	rw	rw	rw	rw

Bits20..23: L[3:0]

Длина последовательности преобразований

- **0000**: 1 преобразование
- **0001**: 2 преобразований
-
- **1111**: 16 преобразований

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved		SQ12[4:0]						SQ11[4:0]				SQ10[4:1]			
		rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
SQ10_0	SQ9[4:0]						SQ8[4:0]				SQ7[4:0]				
rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw

SQx

Номер канала для x преобразования

Регистр данных DR (ADC data register)

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved															
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
DATA[15:0]															
r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r

Bits0..15: DATA[15:0]

Данные преобразования регулярного канала

Общий регистр управления CCR (ADC common control register ADC_Common)

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved								TSVREFE	VBATE	Reserved				ADCPRE	
								rw	rw					rw	rw
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Reserved															

Bits23: TSVREFE

Подключить сенсор температуры и Vref

- **0**: Отключить сенсора температуры и Vref
- **1**: Включить сенсор температуры и Vref

Bits16:17: ADCPRE

установить частоту работы АЦП

- **00**: частота равна PCLK2/2
- **01**: частота равна PCLK2/4
- **10**: частота равна PCLK2/6
- **11**: частота равна PCLK2/8

Порядок запуска одиночного АЦ преобразования

- Подключить АЦП к источнику тактирования – устанавливаем бит ADC1EN в регистре RCC::APB2ENR (АЦП тактируется от шины APB2).
- Сконфигурировать порты. Определиться по каким каналам будут проводиться измерения, затем соответствующие выводы портов настроить для работы в аналоговом режиме.
- Сконфигурировать АЦП.
 - Установить разрядность в регистре ADC::CR1
 - Установить режим одиночного преобразование в регистре ADC::CR1 (биты CONT и EOCS установить в нужное значение)

- Установить количество измерений 1 в регистре ADC1::SQR1 бит L
- Выбрать канал для первого преобразования в регистре ADC1::SQR3 биты SQ1
- Установить скорость дискретизации в регистре SMPRx для нужного канала
- Включить АЦП. Это делается установкой бита ADON в регистре ADC::CR2.
- Запустить АЦП на преобразование установкой бита SWSTART в регистре ADC::CR2 для регулярных каналов
- Дождаться готовности бита EOC в регистре ADC::SR
- Считать данные из регистра ADC::DR

Задание

Измерить температуру микроконтроллера с помощью встроенного датчика температуры.

- Прочитать все АЦП в библии все про встроенный датчик температуры на странице 225
- Включить измерение датчика температуры
- Сконфигурировать АЦП
 - 12 бит
 - Одиночное преобразование
 - Регулярные каналы
 - Время дискретизации 84 цикла
 - Установка EOC после каждого измерения регулярного канала
 - Установить первое измерение с канала куда подключен датчик температуры