

# Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)

Все сигналы, с которыми мы работали до настоящего момента — являлись цифровыми, т.е. описывались абстрактным понятием логического уровня. Реальный мир немного сложнее; сигнал может принимать не только 0 В и 3,3 В, но и промежуточные значения. Так многие датчики имеют не цифровой, а аналоговый выход. Встаёт вопрос — «Как такой сигнал обрабатывать?». Микроконтроллер не может работать с такими сигналами напрямую, его нужно преобразовать в цифровой вид при помощи аналого-цифрового преобразователя (англ. Analog to Digital Converter), или просто АЦП (ADC).

*Аналого-цифровой преобразователь — устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в дискретный код (цифровой сигнал). // [Википедия](#)*

Существуют разные топологии таких преобразователей и каждая имеет свои достоинства и недостатки. Основными характеристиками АЦП являются: разрядность/разрешение; отношение сигнал-шум (англ. signal/noise ratio, SNR); скорость выборки (англ. sampling rate, отсюда транслитерация семплирование).

## Разрядность

Аналоговый сигнал представляется в виде последовательности 0 и 1. Чем длиннее последовательность, тем больше приближен результат конвертации к реальному значению. Говоря о разрядности часто употребляют словосочетание «разрешающая способность» (англ. resolution). Это не одно и то же, но эти величины связаны. Допустим напряжение некоторого сигнала меняется от 0 В до 5 В, а длина последовательности 8 бит (разрядность АЦП). Тогда 0 В в бинарном виде можно представить так (число 0):

```
0x0000 0000
```

Соответственно 5 В (число  $2^8 - 1 = 255$ ):

```
0x1111 1111
```

Реальное напряжение линейно проецируется на бинарное представление. Т.е. шаг квантования можно найти по формуле:

$$Q = \frac{V_{max}}{2^{bits}} = \frac{5}{2^8} = 0,01953125 \frac{\text{Вольт}}{\text{Деление}}$$

Разрядность	Уровней квантования	Вольт/Деление, $V_{ref} = 3,3 \text{ В}$
8	256	0,012890625
10	1024	0,00322265625
12	4096	0,0008056640625
16	65536	0,00005035400390625
24	16777216	0,0000001966953277587890625

Если на входе 2,55 В (АЦП запитано так же от 5 В), тогда в бинарном виде мы получим:

```
0x1000 0010 // 2,55859375 В
```

Как видите погрешность преобразования ( $\delta$ ) равна 0,00859375 В. Такая разница называется ошибкой квантования (англ. quantization error).

## Отношение сигнал-шум

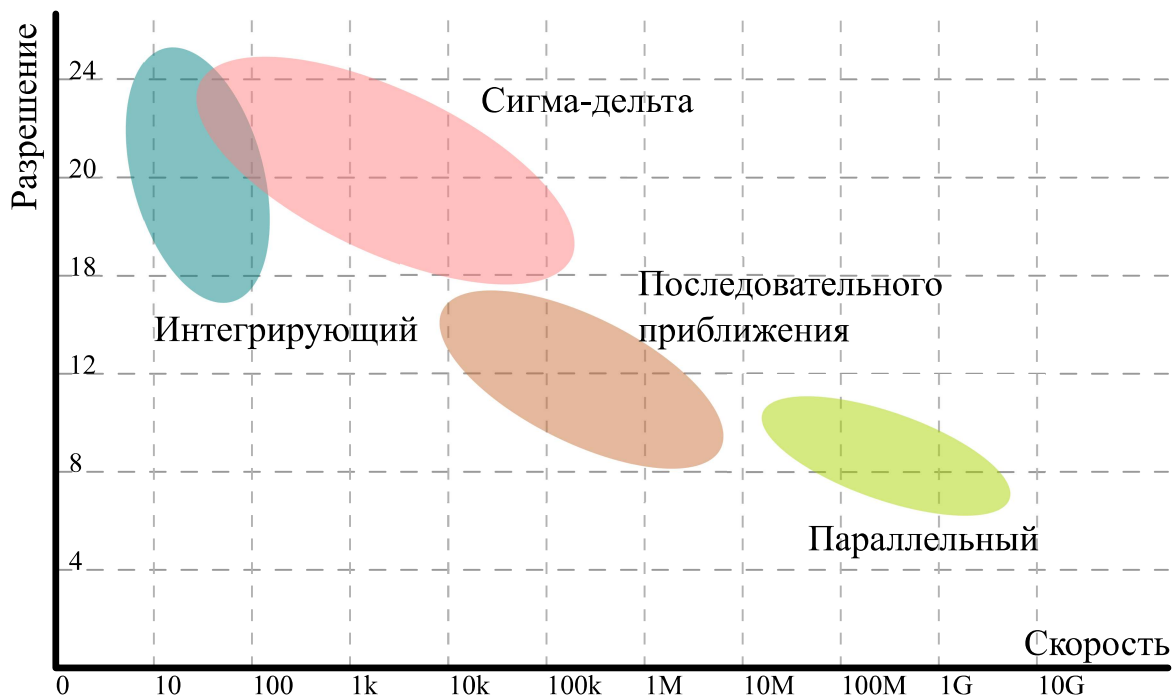
Существуют и другие факторы вносящие ошибки в измерения <sup>1</sup>: нестабильность опорного напряжения модуля АЦП; условия окружающей среды (температура); и даже разводка печатной платы (паразитные ёмкости и индуктивности дорожек, близость к силовым линиям и т.д.).

Подробно на этом останавливаться не будем.

## Быстродействие

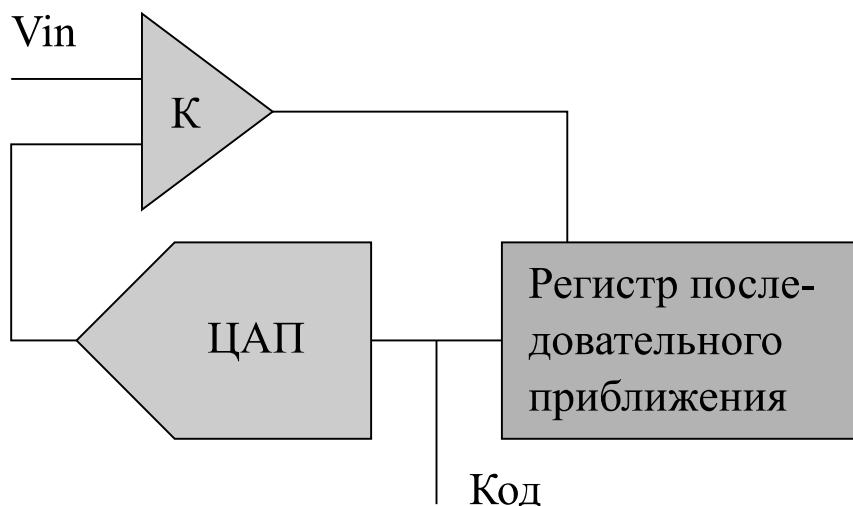
АЦП используется для разных задач: в осциллографе важна большая скорость оцифровки сигналов, а точностью можно пренебречь; в измерительном приборе скорость не сильно важна, важна точность. В общем виде правило такое: чем выше скорость выборки, тем меньше точность измерения. Для тех или иных задач были придуманы разные топологии. Вот некоторые из них:

- Параллельные, прямого преобразования — обычно не превышают разрядности в 8 бит;
- Последовательные, например последовательного приближения (англ. successive approximation, или просто SAR) — как раз такие применяются в STM32F10x;
- Сигма-Дельта АЦП — применяются в STM32F3x серии (эти микроконтроллеры созданы больше для задач цифровой обработки сигналов).
- и другие.



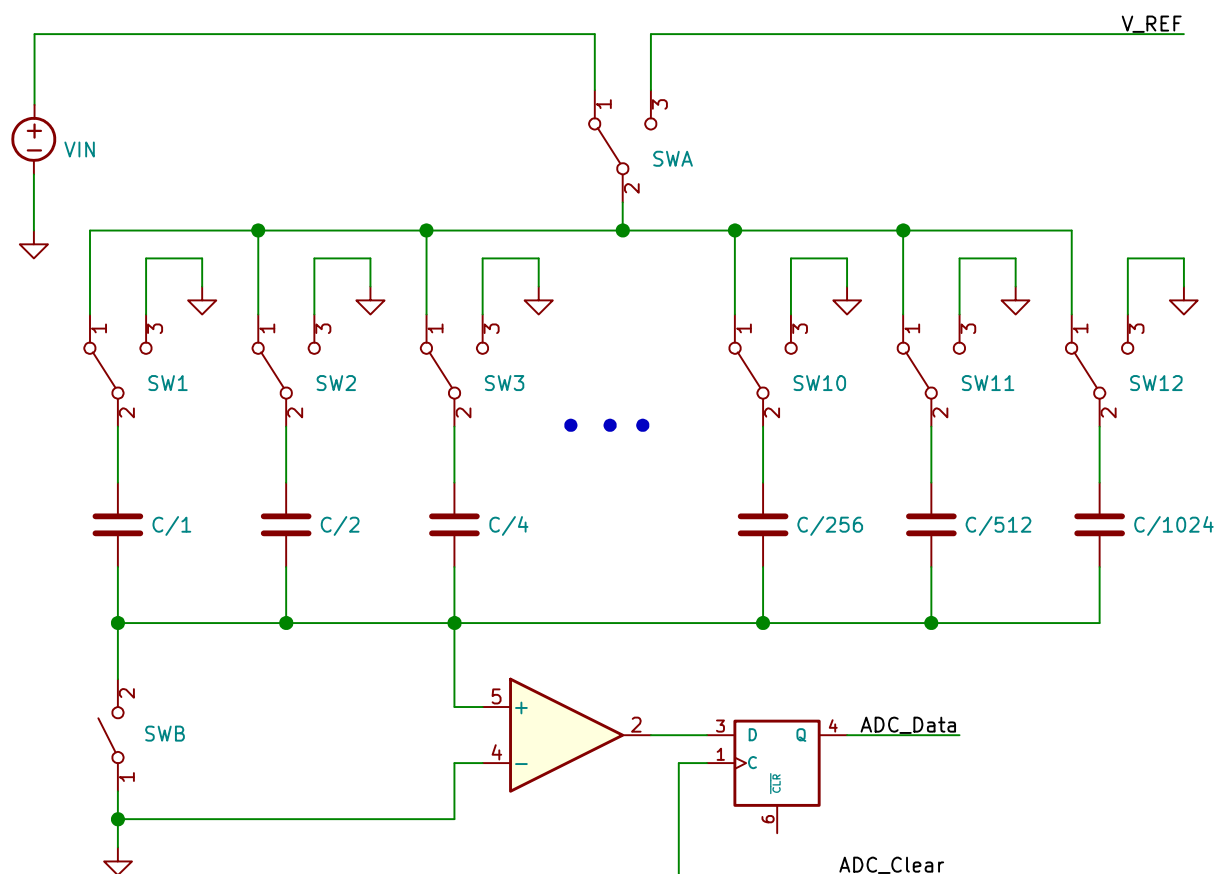
## АЦП последовательного приближения

В нашем МК используется АЦП последовательного приближения; рассмотрим данную топологию.



Принцип её действия основан **дихотомии**, последовательного деления на два и последующего сравнения. Для работы требуется три основных элемента: компаратор, регистр последовательного приближения и цифро-аналоговый преобразователь <sup>2</sup>. ЦАП формирует напряжение, которое далее сравнивается на компараторе. На первом шаге в регистр записывается половина от максимального значения, т.е. ЦАП формирует напряжение равное  $\frac{1}{2}$  шкалы (для 5 В это 2,5 В). Если напряжение окажется выше чем сравниваемое (на выходе компаратора 1), то на втором шаге ЦАП понизит напряжение на  $\frac{1}{4}$  (от максимального значения) и снова сравнит. Так будет продолжаться, пока все разряды не будут проверены. По такому же принципу работает алгоритм **бинарного поиска**. Легко догадаться: выше разрядность, меньше скорость.

Сама топология может быть реализована по-разному. Конкретно в stm32 используются ёмкости.



Описание работы других топологий можно найти в статье на Хабре: « [Аналого-цифровое преобразование для начинающих](#) ».

## АЦП в STM32F1 и режимы работы

Модулей АЦП в микроконтроллере может быть несколько. Соответственно работать они могут независимо друг от друга (англ. Independent mode) и совместно (англ. dual mode). Каждый модуль в свою очередь имеет несколько каналов, которые делятся на *регулярные* (англ. regular) и *инжекторные* (англ. injected). Но они чуть позже. Сами каналы могут быть выведены к ножкам МК (внешние), а могут быть подсоединены к внутренним цепям (внутренние), например к датчику температуры МК <sup>3</sup> или источнику опорного напряжения.

Микроконтроллер STM32 позволяет настраивать скорость преобразования, например 1.5, 7.5, 13.5, 28.5, 41.5, 55.5, 71.5, 239.5 такта АЦП. Ниже приведены макросы из стандартной библиотеки.

```
#define ADC_SampleTime_1_5Cycles      ((uint32_t)0x00000000)
#define ADC_SampleTime_7_5Cycles      ((uint32_t)0x00000001)
#define ADC_SampleTime_13_5Cycles     ((uint32_t)0x00000002)
#define ADC_SampleTime_28_5Cycles     ((uint32_t)0x00000003)
#define ADC_SampleTime_41_5Cycles     ((uint32_t)0x00000004)
#define ADC_SampleTime_55_5Cycles     ((uint32_t)0x00000005)
#define ADC_SampleTime_71_5Cycles     ((uint32_t)0x00000006)
#define ADC_SampleTime_239_5Cycles    ((uint32_t)0x00000007)
```

Так как АЦП построена на конденсаторах, то вход обладает ёмкостным свойством, т.е. для их заряда нужен ток. Если входной сигнал не может отдать много тока (например он снимается через делитель напряжения с большими сопротивлениями), то стоит выбрать время выборки побольше.

Все режимы работы АЦП описаны в документе [AN3116](#).

## Незасисимые режимы работы

Так как каналов несколько, то работать с ними можно как по одному, так и группами. Следовательно, можно выделить одноканальный (англ. single channel) и многоканальный (англ. multichannel).

Производить измерения можно однократно (англ. single conversion) или непрерывно (англ. continuous). В общей сложности 4 комбинации.

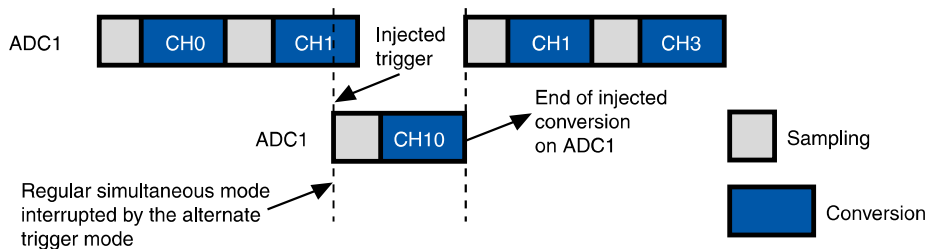
- *Одноканальный однократный* (англ. single-channel, single conversion) — используется один канал, по завершению преобразования результат сохраняется в регистре **DR** и АЦП останавливается. Данный режим удобно использовать, когда нужно проверить напряжение питания и принять решение включать устройство или нет.
- *Одноканальный непрерывный* (англ. single channel, continuous) — работа также осуществляется с одним каналом, но после сохранения результата в регистр, АЦП перезапускается и производит новое измерение. Данный режим удобно использовать, когда нужно непрерывно отслеживать какой-нибудь параметр, например уровень заряда батарейки или, как в нашем случае, световой поток (хотя на самом деле можно делать это не так часто).
- *Многоканальный одноразовый* — выбирается несколько каналов, затем последовательно (по порядковому номеру) АЦП производит измерение в каждом из них. Стоит помнить, что у АЦП всего один регистр для хранения результата (**DR**), поэтому значения будут перезаписываться.
- *Многоканальный непрерывный* — работает по аналогии: последовательно собираются значения и после последнего канала, преобразование начинается заново, с первого.

По завершению преобразования происходит событие **4** и в соответствующий бит регистра статуса (**SR**) записывается **1**. Бит сбрасывается в **0** либо при чтении результата конвертации, либо его можно сбросить вручную. По событию можно настроить прерывание, что бы у обработчике как-то обрабатывать данные (например просто сохранять их в оперативную память), однако это не самый эффективный способ. Если приходится собирать много данных, то лучше вместо прерываний подключить модуль прямого доступа к памяти (DMA), который разгрузит процессор и самостоятельно будет копировать данные из регистра **DR** в какую-нибудь переменную или массив.

Как и с прерываниями, некоторые параметры системы могут быть важнее других. Для этого существует ещё один режим работы.

- *Инжекторный* — данный режим для преобразований запускаемых от внешних событий (от таймера, модуля EXTI или программного). Группа инжекторных каналов (до четырёх) имеет приоритет над

регулярными, поэтому они могут прерывать работу регулярных каналов.



Сканирование деругяльных и инжектированных каналов, изображение из AN3116

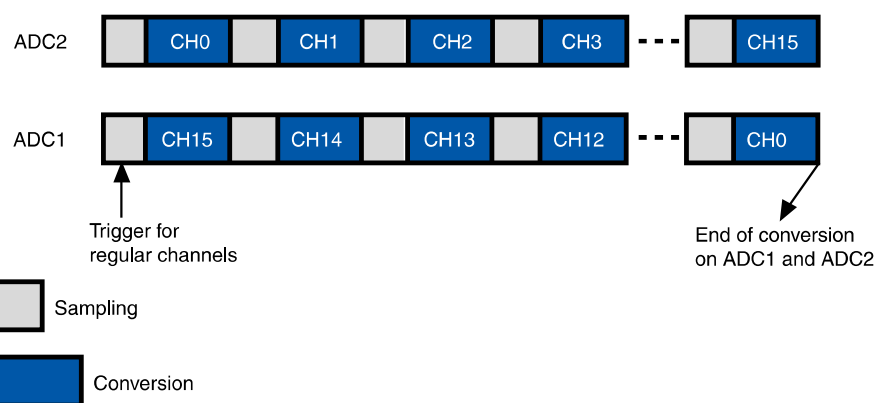
Так же один из каналов может быть настроен как аналоговый сторожевой (англ. analog watchdog), его задача следить за состоянием напряжения на линии. Если напряжение падает ниже порогового, сработает прерывание по событию **AWD**, если оно настроено. Это полезно в тех случаях, когда устройство работает от батарейки и перед выключением нужно сохранить/отправить какие-нибудь данные.

## Совместный режим работы

В микроконтроллерах может быть более одного модуля АЦП. В некоторых МК от ST может быть до трёх штук. Первые два могут работать совместно, а третий только независимо. В совместном режиме (или парном, dual mode) модуль **ADC1** принимает роль ведущего (англ. master), а **ADC2** ведомого (англ. slave). Данная возможность полезна, когда нужно ускорить считывание показаний.

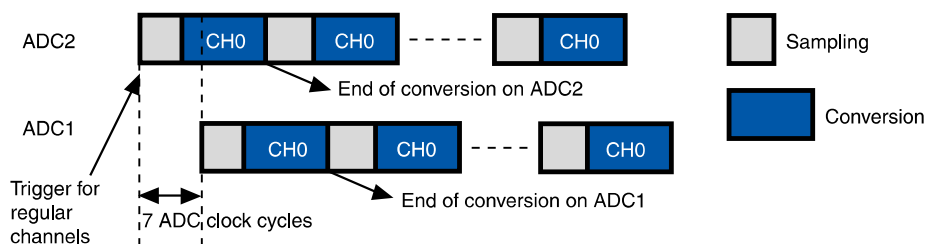
Ситуации когда оба модуля пытаются работать с одинаковым каналом не желательна, это может вызвать ошибки при конвертации значения.

- *Парное, одновременное, считывание группы регулярных каналов* (англ. dual regular simultaneous mode, DRS) — работают сразу два модуля, первый в прямом порядке следования каналов, второй в обратном.



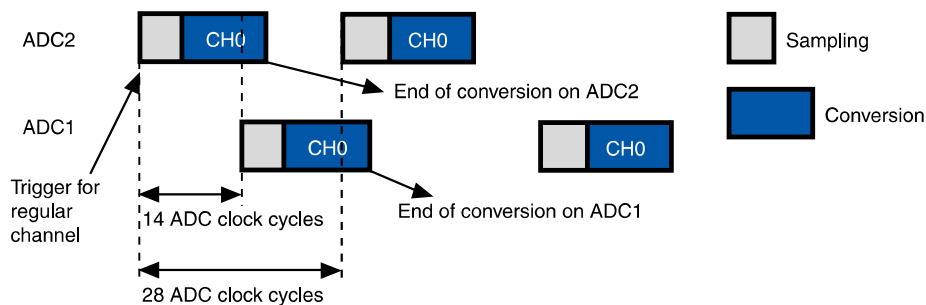
Парное, одновременное считывание группы регулярных каналов, изображение из AN3116

- *Парный, быстрый режим с захлестом* (англ. dual fast interleaved mode, DFI) — предназначен для считывания одного канала обоими модулями с задержкой в 7 тактов АЦП <sup>5</sup>. Возможно достичь скорости в 2 мегавыборки <sup>6</sup>.



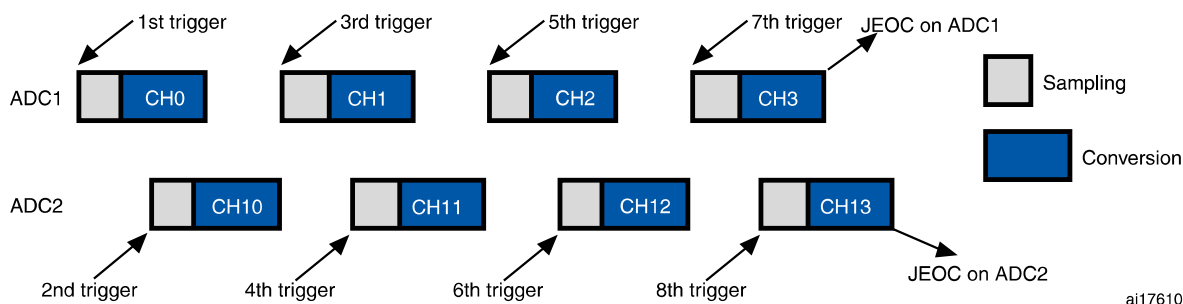
Парный, быстрый режим с захлестом, изображение из AN3116

- *Парный, медленный режим с захлестом* (англ. dual slow interleaved mode, DSI) — работает схожим образом, но задержка между опросами равна 14 тактам АЦП.



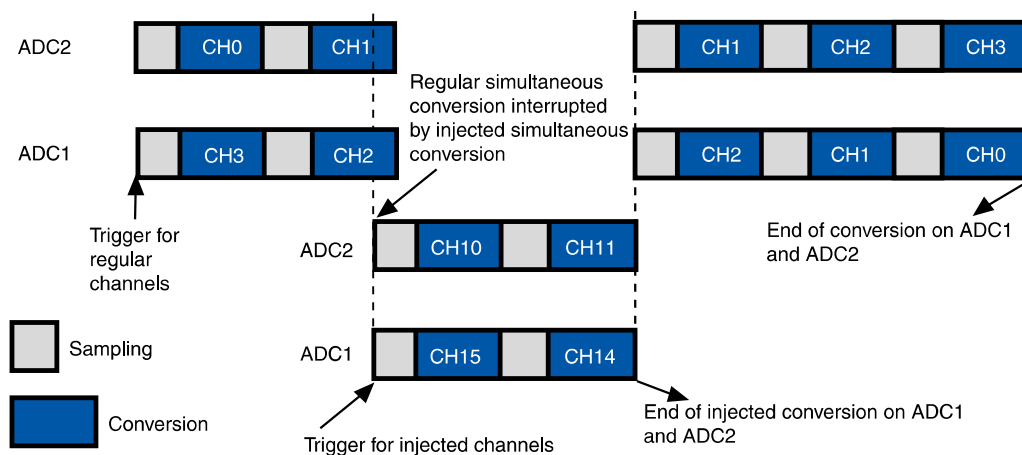
Парный, медленный режим с захлестом, изображение из AN3116

- *Парное, попеременное преобразование по триггеру* (англ. dual alternate trigger mode, DAT) — может работать только с инжектированными каналами. Когда приходит сигнал от триггера, один из модулей совершает преобразование. По приходу следующего сигнала, преобразование выполняет другой модуль.



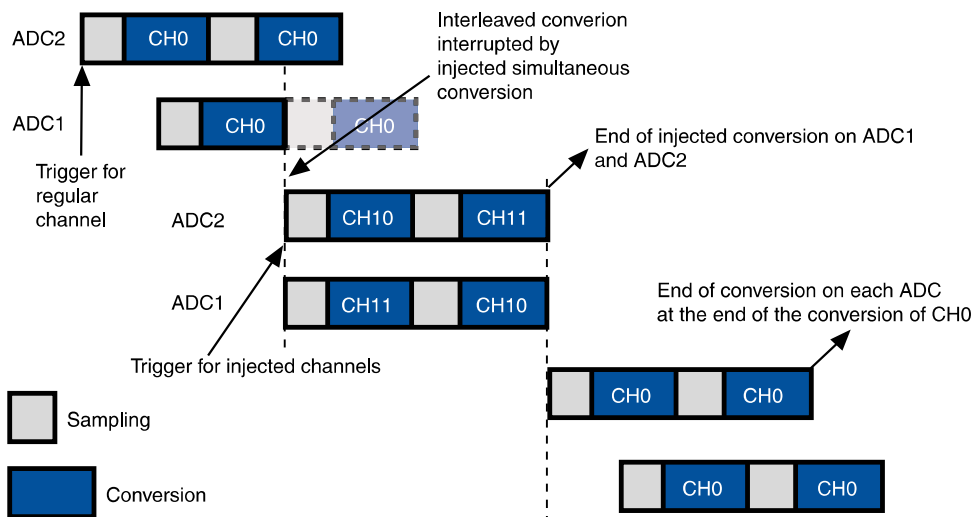
Парный, попеременный режим по триггеру, изображение из AN3116

- *Парный, совместный, одновременный режим* (англ. dual combined regular/injected simultaneous mode, DCRIS) — данный режим схож с парным считыванием регулярных каналов, за тем исключением, что по триггеру могут быть вызвано преобразование инжекторных каналов.



Парный, совместный, одновременный режим, изображение из AN3116

- *Парный, совместный с инжекцией* (англ. dual combined: injected simultaneous + interleaved mode) — данный режим это комбинация DFI/DSI и DCRIS режимов. Когда запускается регулярный канал, начинается парное чередование: модуль **ADC2** делает первое преобразование, затем запускается **ADC1** и так далее. Когда инжекторный канал запускается, он прерывает преобразования с захлёстом и оба модуля (**ADC1** и **ADC2**) начинают преобразовывать группу инжекторных каналов. По завершению преобразования возобновляется работа прерванного преобразования.



Парный, совместный режим с инжекцией, изображение из AN3116

## Регистры модуля ADC

Завершая изучение модуля ADC нужно поговорить о его регистрах. Ниже представлены все регистры **Reference Manual** для **stm32f103c8** с кратким описанием нужных в этом курсе бит. Тем не менее, обязательно откройте документацию и изучите каждый регистр самостоятельно; в других МК они могут отличаться (название и поведение).

Шаблон работы с модулем примерно следующий:

1. включить тактирование АЦП (RCC);
2. настраиваем ножки на вход, аналоговый режим;
3. настраиваем регистры нужного модуля АЦП на нужный режим работы;
4. включаем АЦП;



5. настраиваем каналы;
6. запускаем и ждем конца калибровки.

## Регистр статуса **SR**

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											STRT	JSTRT	JEOC	EOC	AWD
											rc_w0	rc_w0	rc_w0	rc_w0	rc_w0

- **0 бит:** флаг **AWD** (Analog Watchdog), выставляется **1** если выходной сигнал пересек значение в регистрах **LTR** / **HTR**. Сбрасывается программно.
- **1 бит:** флаг **EOC** (End Of Conversion), выставляется **1** по окончании преобразования (любого типа канала). Сбрасывается автоматически при считывании регистра **DR**, либо программно (записью в регистр).
- **2 бит:** флаг **JEOC** (Injected End Of Conversion), выставляется **1** по окончании преобразования группы инжекторных каналов. Сбрасывается автоматически при считывании регистра **DR**, либо программно.
- **3 бит:** флаг **JSTRT** (Injected Start), выставляется **1** когда группа инжекторных каналов начинает преобразование, сбрасывается программно.
- **4 бит:** флаг **STRT** (Start), выставляется **1** когда группа регулярных каналов начинает преобразование, сбрасывается программно.

## Регистры настроек **CR1** и **CR2**

Модуль АЦП, как вы видите, довольно сильно нашпигован разнообразной функциональностью, поэтому регистр настройки разбит на две части. Описывать все биты мы не будем, затронем лишь те, которые нам необходимы для работы.

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved								AWDEN	JAWDEN	Reserved		DUALMOD[3:0]			
								rw	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	AWDGL	SCAN	JEOCIE	AWDIE	EOCIE	AWDCH[4:0]				
rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw

- **8 бит:** **SCAN** (Scan mode), включает ( **1** ) или отключает ( **0** ) многоканальный режим, согласно списку каналов в регистрах **SQR1**, **SQR2**, **SQR3**.
- **11 бит:** **DISCEN** (Discontinuous mode Enabled). АЦП включается по внешнему триггеру.
- **13 ...15 биты:** **DISCNUM** (Discontinuous mode Number of channels). Задают количество каналов в поочередном режиме.
- **16 ... 19 биты:** **DUALMOD** (Dual Mode selection). Конфигурация парного режима.

Второй регистр настроек **CR2**.

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Reserved								TSVREFE	SWSTART	JSWSTART	EXTTRIG	EXTSEL[2:0]			Res.
								rw	rw	rw	rw	rw	rw	rw	
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
JEXTTRIG	JEXTSEL[2:0]			ALIGN	Reserved	DMA	Reserved					RSTCAL	CAL	CONT	ADON
rw	rw	rw	rw	rw	Res.	rw						rw	rw	rw	rw

- **0 бит:** `ADON` запускает ( `1` ) или останавливает ( `0` ) преобразование.
- **1 бит:** `CONT` задаёт одиночный ( `0` ) или многоканальный ( `1` ) режим.
- **2 бит:** `CAL` регистр запуска калибровки.
- **3 бит:** `RSTCAL` регистр сброса калибровки.
- **11 бит:** `ALIGN` устанавливает выравнивание данных по правому ( `0` ) или по левому ( `1` ) краю.
- **20 бит:** `EXTTRIG` разрешает или запрещает преобразование по сигналу от триггера.

## Регистры скорости выборки

Регистры `ADC_SMPR1` и `ADC_SMPR2` задают индивидуальную скорость преобразования для каждого отдельного канала, каждому из которых отводится три бита. Доступны следующие скорости: 1.5 ( `000` ), 7.5, 13.5, 28.5, 41.5, 55.5, 71.5, 239.5 ( `111` ) тайта АЦП.

## Остальные регистры

С помощью группы регистров `SQR1` , `SQR2` и `SQR3` можно настроить последовательность и количество ( `1` ) регулярных каналов преобразования. Инжекторным каналам соответствуют регистры `JSQR1` , `JSQR2` и `JSQR3` .

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	rw	rw	rw

С помощью регистров `HTR` и `LTR` задаются верхние и нижние пороги для сторожевого канала.

И последние два регистра `DR` и `JDR` предназначены для сохранения результатов преобразований регулярных и инжекторных каналов соответственно **7** .

[Назад](#) | [Оглавление](#) | [Дальше](#)

1. Изучите документ «AN2834. How to get the best ADC accuracy in STM32Fx Series and STM32L1 Series devices». [↗](#)
2. Противоположностью АЦП является ЦАП, Цифро-Аналоговый Преобразователь (англ. Digital to Analog Converter, DAC). Его внутреннее устройство мы рассматривать не будем, т.к. это выходит за рамки курса (к тому же ЦАП отсутствует в нашем микроконтроллере как периферия). [↗](#)
3. Данные с внутреннего датчика не годятся для измерения абсолютных значений, но полезен для оценки динамики изменения температуры, скажем, в корпусе. [↗](#)
4. EOC (сокр. End Of Conversion) для регулярных каналов или JEOC (сокр. End Of Conversion Injected) для инжекторных каналов. [↗](#)
5. Преобразование возможно только за 1.5 такта. [↗](#)
6. Следует использовать модуль DMA, чтобы не потерять данные. [↗](#)
7. На все каналы отводится только один регистр. [↗](#)