

# Аналого-цифровой преобразователь

Материал из Википедии — свободной энциклопедии



Четырёхканальный аналого-цифровой преобразователь

**Аналого-цифровой преобразователь** (*АЦП*, англ.<sup>ⓘ</sup> *Analog-to-digital converter*, *ADC*) — устройство, преобразующее входной [аналоговый сигнал](#) в дискретный код ([цифровой сигнал](#)). Обратное преобразование осуществляется при помощи [ЦАП](#) (цифро-аналогового преобразователя, DAC).

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](#).

## Содержание

- [1 Разрешение](#)
- [2 Типы преобразования](#)
  - [2.1 Линейные АЦП](#)
  - [2.2 Нелинейные АЦП](#)
- [3 Точность](#)
  - [3.1 Ошибки квантования](#)
  - [3.2 Нелинейность](#)
  - [3.3 Апертурная погрешность \(джиттер\)](#)
- [4 Частота дискретизации](#)
- [5 Наложение спектров \(алиасинг\)](#)
- [6 Подмешивание псевдослучайного сигнала \(dither\)](#)
- [7 Передискретизация](#)
- [8 Типы АЦП](#)
  - [8.1 Коммерческие АЦП](#)
- [9 Применение АЦП в звукозаписи](#)
- [10 Исторический аспект](#)
- [11 Другие применения](#)
- [12 Примечания](#)
- [13 См. также](#)
- [14 Ссылки](#)
- [15 Литература](#)

## Разрешение

Разрешение АЦП — минимальное изменение величины аналогового сигнала, которое может быть преобразовано данным АЦП — связано с его разрядностью. 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](#), в троичных АЦП измеряется в [тритах](#). Например, двоичный АЦП, способный выдать 256 дискретных значений (0...255), имеет разрядность 8 бит, поскольку  $2^8 = 256$ , троичный АЦП, имеющий разрядность 8 трит, способен выдать 6 561 дискретное значение, поскольку  $3^8 = 6561$ .

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

- Пример 1
  - Диапазон входных значений = от 0 до 10 вольт
  - Разрядность двоичного АЦП 12 бит:  $2^{12} = 4096$  уровней квантования
  - Разрешение двоичного АЦП по напряжению:  $(10-0)/4096 = 0,00244$  вольт = 2,44 мВ
  - Разрядность троичного АЦП 12 трит:  $3^{12} = 531\,441$  уровень квантования
  - Разрешение троичного АЦП по напряжению:  $(10-0)/531441 = 0,0188$  мВ = 18,8 мкВ
  
- Пример 2
  - Диапазон входных значений = от -10 до +10 вольт
  - Разрядность двоичного АЦП 14 бит:  $2^{14} = 16\,384$  уровней квантования
  - Разрешение двоичного АЦП по напряжению:  $(10-(-10))/16384 = 20/16384 = 0,00122$  вольт = 1,22 мВ
  - Разрядность троичного АЦП 14 трит:  $3^{14} = 4\,782\,969$  уровней квантования
  - Разрешение троичного АЦП по напряжению:  $(10-(-10))/4782969 = 0,00418$  мВ = 4,18 мкВ

На практике разрешение АЦП ограничено [отношением сигнал/шум](#) входного сигнала. При большой интенсивности шумов на входе АЦП различение соседних уровней входного сигнала становится невозможным, то есть ухудшается разрешение. При этом реально достижимое разрешение описывается **эффективной разрядностью (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 С/Ш входного сигнала должно быть примерно 6 дБ на каждый бит разрядности [\[источник не указан 81 день\]](#).

## Типы преобразования

### Линейные АЦП

Большинство АЦП считаются [линейными](#), хотя аналого-цифровое преобразование по сути является нелинейным процессом (поскольку операция отображения непрерывного пространства в дискретное — операция нелинейная).

Термин *линейный* применительно к АЦП означает, что диапазон входных значений, отображаемый на выходное цифровое значение, связан по линейному закону с этим выходным значением, то есть выходное значение  $k$  достигается при диапазоне входных значений от

$$m(k + b)$$

до

$$m(k + 1 + b),$$

где  $m$  и  $b$  — некоторые константы. Константа  $b$ , как правило, имеет значение 0 или  $-0.5$ . Если  $b = 0$ , АЦП называют *квантователь с ненулевой ступенью (mid-rise)*, если же  $b = -0,5$ , то АЦП называют *квантователь с нулём в центре шага квантования (mid-tread)*.

## Нелинейные АЦП

Если бы [плотность вероятности](#) амплитуды входного сигнала имела [равномерное распределение](#), то отношение сигнал/шум (применительно к шуму квантования) было бы максимально возможным. По этой причине обычно перед квантованием по амплитуде сигнал пропускают через безынерционный преобразователь, передаточная функция которого повторяет [функцию распределения](#) самого сигнала. Это улучшает достоверность передачи сигнала, так как наиболее важные области амплитуды сигнала квантуются с лучшим разрешением. Соответственно, при цифро-аналоговом преобразовании потребуется обработать сигнал функцией, обратной функции распределения исходного сигнала.

Это тот же принцип, что и используемый в [компандерах](#), применяемых в магнитофонах и различных коммуникационных системах, он направлен на максимизацию [энтропии](#). (Не путать [компандер](#) с [компрессором](#)!)

Например, голосовой сигнал имеет [лапласово распределение](#) амплитуды. Это означает, что окрестность нуля по амплитуде несёт больше информации, чем области с большей амплитудой. По этой причине логарифмические АЦП часто применяются в [системах передачи голоса](#) для увеличения динамического диапазона передаваемых значений без изменения качества передачи сигнала в области малых амплитуд.

8-битные логарифмические АЦП с [а-законом](#) или [μ-законом](#) обеспечивают широкий [динамический диапазон](#) и имеют высокое разрешение в наиболее критичном диапазоне малых амплитуд; линейный АЦП с подобным качеством передачи должен был бы иметь разрядность около 12 бит.

## Точность

Имеется несколько источников погрешности АЦП. [Ошибки квантования](#) и (считая, что АЦП должен быть [линейным](#)) [нелинейности](#) присущи любому аналого-цифровому преобразованию. Кроме того, существуют так называемые *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. В приведённом выше примере 8-битного двоичного АЦП ошибка в 1 МЗР составляет 1/256 от полного диапазона сигнала, то есть 0,4 %, в 8-битном троичном АЦП ошибка в 1 МЗР составляет 1/6561, то есть 0,015 %.

## Ошибки 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.

Как правило, амплитуда входного сигнала много больше, чем МЗР. В этом случае ошибка квантования не коррелирована с сигналом и имеет равномерное распределение. Её среднеквадратическое значение совпадает с среднеквадратичным отклонением

$$\frac{1}{\sqrt{12}} \text{LSB} \approx 0.289 \text{ LSB}$$

распределения, которое равно . В случае 8-битного АЦП это составит 0,113 % от полного диапазона сигнала.

## 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). Ошибки могут быть уменьшены путём калибровки.

Важным параметром, описывающим нелинейность, является **интегральная нелинейность (INL)** и **дифференциальная нелинейность (DNL)**.

## Апертурная погрешность (джиттер)

Пусть мы оцифровываем синусоидальный сигнал  $x(t) = A \sin 2\pi f_0 t$ . В идеальном случае отсчёты берутся через равные промежутки времени. Однако в реальности время момента взятия отсчёта подвержено флуктуациям из-за дрожания фронта синхросигнала (*clock jitter*). Полагая, что неопределённость момента времени взятия отсчёта порядка  $\Delta t$ , получаем, что ошибка, обусловленная этим явлением, может быть оценена как

$$\bullet \quad E_{ap} \leq |x'(t)\Delta t| \leq 2A\pi f_0 \Delta t.$$

Легко видеть, что ошибка относительно невелика на низких частотах, однако на больших частотах она может существенно возрасти.

Эффект апертурной погрешности может быть проигнорирован, если её величина сравнительно невелика по сравнению с ошибкой квантования. Таким образом, можно установить следующие требования к дрожанию фронта сигнала синхронизации:

$$\bullet \quad \Delta t < \frac{1}{2^q \pi f_0},$$

где  $q$  — разрядность АЦП.

Разрядность АЦП	Максимальная частота входного сигнала				
	44,1 кГц	192 кГц	1 МГц	10 МГц	100 МГц
8	28,2 нс	6,48 нс	1,24 нс	124 пс	12,4 пс
10	7,05 нс	1,62 нс	311 пс	31,1 пс	3,11 пс
12	1,76 нс	405 пс	77,7 пс	7,77 пс	777 фс
14	441 пс	101 пс	19,4 пс	1,94 пс	194 фс
16	110 пс	25,3 пс	4,86 пс	486 фс	48,6 фс
18	27,5 пс	6,32 пс	1,21 пс	121 фс	12,1 фс
24	430 фс	98,8 фс	19,0 фс	1,9 фс	190 ас

Из этой таблицы можно сделать вывод о целесообразности применения АЦП определённой разрядности с учётом ограничений, накладываемых дрожанием фронта синхронизации (*clock jitter*). Например, бессмысленно использовать прецизионный 24-битный АЦП для записи звука, если система распределения синхросигнала не в состоянии обеспечить ультрамалой неопределённости.

## 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 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 по крайней мере 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 в [конденсаторе](#), который соединён со входом через аналоговый ключ: при замыкании ключа происходит выборка входного сигнала (конденсатор заряжается до входного напряжения), при [размыкании](#) — хранение. Многие АЦП, выполненные в виде [интегральных микросхем](#) содержат встроенное УВХ.

## Наложение спектров (алиасинг)

Все АЦП работают путём выборки входных значений через фиксированные интервалы времени. Следовательно, выходные значения являются неполной картиной того, что подаётся на вход. Глядя на выходные значения, нет никакой возможности установить, как вёл себя входной сигнал *между* выборками. Если известно, что входной сигнал меняется достаточно медленно относительно частоты дискретизации, то можно предположить, что

промежуточные значения между выборками находятся где-то между значениями этих выборок. Если же входной сигнал меняется быстро, то никаких предположений о промежуточных значениях входного сигнала сделать нельзя, а следовательно, невозможно однозначно восстановить форму исходного сигнала.

Если последовательность цифровых значений, выдаваемая АЦП, где-либо преобразуется обратно в аналоговую форму цифро-аналоговым преобразователем, желательно, чтобы полученный аналоговый сигнал был максимально точной копией исходного сигнала. Если входной сигнал меняется **быстрее**, чем делаются его отсчёты, то точное восстановление сигнала невозможно, и на выходе ЦАП будет присутствовать ложный сигнал. Ложные частотные компоненты сигнала (отсутствующие в спектре исходного сигнала) получили название *alias* (ложная частота, побочная низкочастотная составляющая). Частота ложных компонент зависит от разницы между частотой сигнала и частотой дискретизации. Например, синусоидальный сигнал с частотой 2 кГц, дискретизованный с частотой 1.5 кГц был бы воспроизведён как синусоида с частотой 500 Гц. Эта проблема получила название *наложение частот (aliasing)*.

Для предотвращения наложения спектров сигнал, подаваемый на вход АЦП, должен быть пропущен через фильтр низких частот для подавления спектральных компонент, частота которых превышает половину частоты дискретизации. Этот фильтр получил название *anti-aliasing* (антиалиасинговый) фильтр, его применение чрезвычайно важно при построении реальных АЦП.

Хотя наложение спектров в большинстве случаев является нежелательным эффектом, его можно использовать во благо. Например, благодаря этому эффекту можно обойтись без преобразования частоты вниз при оцифровке узкополосного высокочастотного сигнала (смотри смеситель). Для этого, однако, входные аналоговые каскады АЦП должны иметь значительно более высокие параметры, чем это требуется для стандартного использования АЦП на основной (видео или низшей) гармонике.

## Подмешивание псевдослучайного сигнала (dither)

Некоторые характеристики АЦП могут быть улучшены путём использования методики подмешивания псевдослучайного сигнала (англ. dither). Она заключается в добавлении к входному аналоговому сигналу случайного шума (белый шум) небольшой амплитуды. Амплитуда шума, как правило, выбирается на уровне половины МЗР. Эффект от такого добавления заключается в том, что состояние МЗР случайным образом переходит между состояниями 0 и 1 при очень малом входном сигнале (без добавления шума МЗР был бы в состоянии 0 или 1 долговременно). Для сигнала с подмешанным шумом вместо простого округления сигнала до ближайшего разряда происходит случайное округление вверх или вниз, причём среднее время, в течение которого сигнал округлён к тому или иному уровню зависит от того, насколько сигнал близок к этому уровню. Таким образом, оцифрованный сигнал содержит информацию об амплитуде сигнала с разрешающей способностью лучше, чем МЗР, то есть происходит увеличение эффективной разрядности АЦП. Негативной стороной методики является увеличение шума в выходном сигнале. Фактически, ошибка квантования **размазывается** по нескольким соседним отсчётам. Такой подход является более желательным, чем простое округление до ближайшего дискретного уровня. В результате использования методики подмешивания псевдослучайного сигнала мы имеем более точное воспроизведение сигнала во времени. Малые изменения сигнала могут быть восстановлены из псевдослучайных скачков МЗР путём фильтрации. Кроме того, если шум детерминирован (амплитуда добавляемого шума точно известна в любой момент времени), то его можно вычесть из оцифрованного

сигнала, предварительно увеличив его разрядность, тем самым почти полностью избавиться от добавленного шума.

Звуковые сигналы очень малых амплитуд, оцифрованные без псевдослучайного сигнала, воспринимаются на слух очень искажёнными и неприятными. При подмешивании псевдослучайного сигнала истинный уровень сигнала представлен средним значением нескольких последовательных отсчётов.

Однако, в последнее время ([2009 год](#)), в связи с удешевлением 24-битных АЦП, имеющих даже без *dither*'а динамический диапазон более 120 дБ, что на несколько порядков превышает полный воспринимаемый человеком диапазон слуха, данная технология потеряла актуальность в звукотехнике. При этом, она используется в ВЧ и СВЧ технике, где битность АЦП обычно мала из-за высокой частоты дискретизации.

Очень похожий процесс, также называемый *dither* или [диффузия ошибок](#), применяется для представления полутонов изображений в [компьютерной графике](#) при малом количестве бит на пиксел. При этом изображение становится зашумленным, но визуально воспринимается реалистичнее чем то же изображение полученное простым квантованием.

## Передискретизация

Как правило, сигналы оцифровываются с минимально необходимой частотой дискретизации из соображений экономии, при этом шум квантования является белым, то есть его спектральная плотность мощности равномерно распределена во всей полосе. Если же оцифровать сигнал с частотой дискретизации, гораздо большей, чем по [теореме Котельникова-Шеннона](#), а затем подвергнуть цифровой фильтрации для подавления спектра вне частотной полосы исходного сигнала, то [отношение сигнал/шум](#), будет лучше, чем при использовании всей полосы. Таким образом можно достичь эффективного разрешения большего, чем разрядность АЦП.

Передискретизация также может быть использована для смягчения требований к крутизне перехода от полосы пропускания к полосе подавления антиалиасингового фильтра. Для этого сигнал оцифровывают, например, на вдвое большей частоте, затем производят цифровую фильтрацию, подавляя частотные компоненты вне полосы исходного сигнала, и, наконец, понижают частоту дискретизации путём [децимации](#).

## Типы АЦП

Ниже перечислены основные способы построения электронных АЦП:

- **АЦП прямого преобразования** или **параллельный АЦП**<sup>[1]</sup> содержит по одному [компаратору](#) на каждый дискретный уровень входного сигнала. В любой момент времени только компараторы, соответствующие уровням ниже уровня входного сигнала, выдадут на своём выходе сигнал превышения. Сигналы со всех компараторов поступают на [логическую схему](#), которая выдаёт цифровой код, зависящий от того, сколько и какие компараторы показали превышение. Параллельные АЦП очень быстры, но обычно имеют разрешение не более 8 бит (256 компараторов), так как имеют большую и дорогую схему. АЦП этого типа имеют очень большой размер кристалла [микросхемы](#), высокую входную [ёмкость](#), и могут выдавать кратковременные ошибки на выходе. Часто используются для [видео](#) или других высокочастотных сигналов.

- **Последовательно-параллельные АЦП**<sup>[2]</sup> сохраняя высокое быстродействие позволяет значительно уменьшить количество компараторов, требуемое для преобразования аналогового сигнала в цифровой. Содержат в своем составе два — три параллельных АЦП. Второй АЦП служит для уменьшения ошибки квантования первого АЦП путем оцифровки этой ошибки. Для увеличения скорости выходного оцифрованного потока данных в последовательно-параллельных АЦП применяется конвейерная работа параллельных АЦП.
- **АЦП последовательного приближения**<sup>[3]</sup> или **АЦП с поразрядным уравниванием** содержит компаратор, вспомогательный ЦАП и регистр последовательного приближения. АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой за  $N$  шагов, где  $N$  — разрядность АЦП. На каждом шаге определяется по одному биту искомого цифрового значения, начиная от СЗР и заканчивая МЗР. Последовательность действий по определению очередного бита заключается в следующем. На вспомогательном ЦАП выставляется аналоговое значение, образованное из битов, уже определённых на предыдущих шагах; бит, который должен быть определён на этом шаге, выставляется в 1, более младшие биты установлены в 0. Полученное на вспомогательном ЦАП значение сравнивается с входным аналоговым значением. Если значение входного сигнала больше значения на вспомогательном ЦАП, то определяемый бит получает значение 1, в противном случае 0. Таким образом, определение итогового цифрового значения напоминает [двоичный поиск](#). АЦП этого типа обладают одновременно высокой скоростью и хорошим разрешением. Однако при отсутствии устройства выборки хранения погрешность будет значительно больше (представьте, что после оцифровки самого большого разряда сигнал начал меняться).
- **АЦП дифференциального кодирования** ([англ. delta-encoded ADC](#)) содержат [реверсивный счётчик](#), код с которого поступает на вспомогательный ЦАП. Входной сигнал и сигнал со вспомогательного ЦАП сравниваются на компараторе. Благодаря [отрицательной обратной связи](#) с компаратора на счётчик код на счётчике постоянно меняется так, чтобы сигнал со вспомогательного ЦАП как можно меньше отличался от входного сигнала. По прошествии некоторого времени разница сигналов становится меньше, чем МЗР, при этом код счётчика считывается как выходной цифровой сигнал АЦП. АЦП этого типа имеют очень большой диапазон входного сигнала и высокое разрешение, но время преобразования зависит от входного сигнала, хотя и ограничено сверху. В худшем случае время преобразования равно  $T_{max}=(2^q)/f_c$ , где  $q$  — разрядность АЦП,  $f_c$  — частота [тактового генератора](#) счётчика. АЦП дифференциального кодирования обычно являются хорошим выбором для оцифровки сигналов реального мира, так как большинство сигналов в физических системах не склонны к скачкообразным изменениям. В некоторых АЦП применяется комбинированный подход: дифференциальное кодирование и последовательное приближение; это особенно хорошо работает в случаях, когда известно, что высокочастотные компоненты в сигнале относительно невелики.
- **АЦП сравнения с пилообразным сигналом** (некоторые АЦП этого типа называют **Интегрирующие АЦП**) содержат генератор пилообразного напряжения, компаратор и счётчик времени. [Пилообразный сигнал](#) линейно нарастает до некоторого уровня, затем быстро спадает до нуля. В момент начала нарастания запускается счётчик времени. Когда пилообразный сигнал достигает уровня входного сигнала, компаратор срабатывает и останавливает счётчик; значение считывается со счётчика и подаётся на выход АЦП. Данный тип АЦП является



наиболее простым по структуре и содержит минимальное число элементов. Вместе с тем простейшие АЦП этого типа обладают довольно низкой точностью и чувствительны к температуре и другим внешним параметрам. Для увеличения точности генератор пилообразного сигнала может быть построен на основе счётчика и вспомогательного ЦАП, однако такая структура не имеет никаких преимуществ по сравнению с *АЦП последовательного приближения* и *АЦП дифференциального кодирования*.

- **АЦП с уравниванием заряда** (к ним относятся АЦП с двухстадийным интегрированием, АЦП с многостадийным интегрированием и некоторые другие) содержат [генератор стабильного тока](#), [компаратор](#), [интегратор тока](#), тактовый генератор и счётчик импульсов. Преобразование происходит в два этапа (*двухстадийное интегрирование*). На первом этапе значение входного напряжения преобразуется в ток (пропорциональный входному напряжению), который подаётся на интегратор тока, заряд которого изначально равен нулю. Этот процесс длится в течение времени  $TN$ , где  $T$  — период тактового генератора,  $N$  — константа (большое целое число, определяет время накопления заряда). По прошествии этого времени вход интегратора отключается от входа АЦП и подключается к генератору стабильного тока. Полярность генератора такова, что он уменьшает заряд, накопленный в интеграторе. Процесс разряда длится до тех пор, пока заряд в интеграторе не уменьшится до нуля. Время разряда измеряется путём счёта тактовых импульсов от момента начала разряда до достижения нулевого заряда на интеграторе. Посчитанное количество тактовых импульсов и будет выходным кодом АЦП. Можно показать, что количество импульсов  $n$ , посчитанное за время разряда, равно:  $n = U_{\text{вх}} N (RI_0)^{-1}$ , где  $U_{\text{вх}}$  — входное напряжение АЦП,  $N$  — число импульсов этапа накопления (определено выше),  $R$  — сопротивление резистора, преобразующего входное напряжение в ток,  $I_0$  — значение тока от генератора стабильного тока, разряжающего интегратор на втором этапе. Таким образом, потенциально нестабильные параметры системы (прежде всего, ёмкость конденсатора интегратора) не входят в итоговое выражение. Это является следствием *двухстадийности* процесса: погрешности, введённые на первом и втором этапах, взаимно вычитаются. Не предъявляются жёсткие требования даже к долговременной стабильности тактового генератора и напряжению смещения компаратора: эти параметры должны быть стабильны лишь кратковременно, то есть в течение каждого преобразования (не более  $2TN$ ). Фактически, принцип двухстадийного интегрирования позволяет напрямую преобразовывать отношение двух аналоговых величин (входного и образцового тока) в отношение числовых кодов ( $n$  и  $N$  в терминах, определённых выше) практически без внесения дополнительных ошибок. Типичная разрядность АЦП этого типа составляет от 10 до 18 двоичных разрядов. Дополнительным достоинством является возможность построения преобразователей, нечувствительных к периодическим помехам (например, помеха от сетевого питания) благодаря точному интегрированию входного сигнала за фиксированный временной интервал. Недостатком данного типа АЦП является низкая скорость преобразования. АЦП с уравниванием заряда используются в измерительных приборах высокой точности.
- **Конвейерные АЦП** используют два или более шага-поддиапазона. На первом шаге производится грубое преобразование (с низким разрешением). Далее определяется разница между входным сигналом и аналоговым сигналом, соответствующим результату грубого преобразования (со вспомогательного ЦАП, на который подаётся грубый код). На втором шаге найденная разница подвергается преобразованию, и полученный код объединяется с грубым кодом для получения

полного выгодного цифрового значения. АЦП этого типа быстры, имеют высокое разрешение и небольшой размер корпуса.

- [Сигма-дельта-АЦП<sup>\[4\]</sup>](#) (называемые также дельта-сигма АЦП) производит аналого-цифровое преобразование с частотой дискретизации, во много раз превышающей требуемую и путём фильтрации оставляет в сигнале только нужную спектральную полосу.

Неэлектронные АЦП обычно строятся на тех же принципах.

## Коммерческие АЦП

Как правило, выпускаются в виде [микросхем](#).

Для большинства АЦП разрядность составляет от 6 до 24 [бит](#), частота дискретизации до 1 МГц. Мега- и гигагерцовые АЦП также доступны (февраль 2002). Мегагерцовые АЦП требуются в цифровых [видеокамерах](#), [устройствах видеозахвата](#) и цифровых [ТВ-тюнерах](#) для оцифровки полного видеосигнала. Коммерческие АЦП обычно имеют выходную ошибку от  $\pm 0,5$  до  $\pm 1,5$  МЗР.

Один из факторов увеличивающих стоимость [микросхем](#) — это количество [выводов](#), поскольку они вынуждают делать корпус микросхемы больше, и каждый вывод должен быть присоединён к кристаллу. Для уменьшения количества выводов часто АЦП, работающие на низких частотах дискретизации, имеют [последовательный интерфейс](#). Применение АЦП с [последовательным интерфейсом](#) зачастую позволяет увеличить плотность монтажа и создать плату с меньшей площадью.

Часто микросхемы АЦП имеют несколько аналоговых входов, подключённых внутри микросхемы к единственному АЦП через аналоговый [мультиплексор](#). Различные модели АЦП могут включать в себя устройства выборки-хранения, [инструментальные усилители](#) или высоковольтный дифференциальный вход и другие подобные цепи.

## Применение АЦП в звукозаписи

АЦП встроены в большую часть современной звукозаписывающей аппаратуры, поскольку обработка звука делается, как правило, на компьютерах; даже при использовании аналоговой записи АЦП необходим для перевода сигнала в [PCM](#)-поток, который будет записан на [компакт-диск](#).

Современные АЦП, используемые в звукозаписи, могут работать на частотах дискретизации до 192 [кГц](#). Многие люди, занятые в этой области, считают, что данный показатель избыточен и используется из чисто маркетинговых соображений (об этом свидетельствует [теорема Котельникова-Шеннона](#)). Можно сказать, что звуковой аналоговый сигнал не содержит столько информации, сколько может быть сохранено в цифровом сигнале при такой высокой частоте дискретизации, и зачастую для [Hi-Fi](#)-аудиотехники используется частота дискретизации 44,1 кГц (стандартная для компакт-дисков) или 48 кГц (типична для представления звука в компьютерах). Однако широкая полоса упрощает и удешевляет реализацию антиалиасинговых фильтров, позволяя делать их с меньшим числом звеньев или с меньшей крутизной в полосе заграждения, что положительно сказывается на фазовой характеристике фильтра в полосе пропускания.

Аналого-цифровые преобразователи для звукозаписи имеют широкий диапазон цен — от 100 до 10 000 долл. и выше за двухканальный АЦП.

АЦП для звукозаписи, используемые в компьютерах, бывают внутренние и внешние. Также существует [свободный](#) программный комплекс PulseAudio для Linux, позволяющий использовать вспомогательные компьютеры как внешние ЦАП/АЦП для основного компьютера с гарантированным временем запаздывания.

## Исторический аспект

Итальянский математик [Фибоначчи](#) сформулировал задачу наименьшего числа гирь для взвешивания грузов наибольшего диапазона на рычажных весах, которая стала известна под названием «задача о гирях». Фибоначчи пришёл к выводу, что наименьшее число гирь получается при выборе весов гирь в позиционной симметричной [троичной системе счисления](#). Возможно ли, что наиболее оптимальными аналого-цифровыми преобразователями являются АЦП, работающие в позиционной симметричной троичной системе счисления?

## Другие применения

Аналого-цифровое преобразование используется везде, где требуется обрабатывать, хранить или передавать сигнал в цифровой форме.

- АЦП являются составной частью [систем сбора данных](#).
- Быстрые видео АЦП используются, например, в [ТВ-тюнерах](#).
- Медленные встроенные 8, 10, 12 или 16-битные АЦП часто входят в состав [микроконтроллеров](#).
- Очень быстрые АЦП необходимы в цифровых [осциллографах](#).
- Современные весы используют АЦП с разрядностью до 24 бит, преобразующие сигнал непосредственно от [тензометрического датчика](#).
- АЦП входят в состав радиомодемов и других устройств радиопередачи данных, где используются совместно с процессором [ЦОС](#) в качестве [демодулятора](#).
- Сверхбыстрые АЦП используются в антенных системах базовых станций (в так называемых [SMART-антеннах](#)) и в [антенных решётках РЛС](#).

## Примечания

1. ↑ <http://digital.sibsutis.ru/dsp/ADC/flashADC.htm>
2. ↑ <http://digital.sibsutis.ru/dsp/ADC/pipeADC.htm>
3. ↑ [http://digital.sibsutis.ru/dsp/ADC/SAR\\_ADC.htm](http://digital.sibsutis.ru/dsp/ADC/SAR_ADC.htm)
4. ↑ <http://digital.sibsutis.ru/dsp/ADC/sigmaADC.htm>

## См. также

- [Цифровая обработка сигналов](#)
- [Модем](#)
- [Теорема Котельникова](#)
- [Шум квантования](#)
- [Устройство выборки и хранения](#)
- [Дельта-модуляция](#)

## Ссылки

- Вольфганг Райс. [Устройство и принципы действия аналого-цифровых преобразователей различных типов](#) WBC GmbH Журнал «Компоненты и технологии» № 3 2005
- [Аналого-цифровые преобразователи, теория и принципы работы](#) с сайта Рынок Микроэлектроники
- [Learning by Simulations](#) A simulation showing the effects of sampling frequency and ADC resolution.
- [«Understanding analog to digital converter specifications»](#) article by Len Staller 2005-02-24.
- [Understanding Flash ADCs](#) Tutorial on how flash analog-to-digital converters (ADCs) work.
- [Платы и модули АЦП российского производства.](#)
- [Виртуальные измерительные приборы на базе АЦП.](#)
- [АЦП: решения, схемотехника, поставщики. Подборка ссылок.](#)

## Литература

- Хоровиц П., Хилл У. *Искусство схемотехники*. В 3-х томах: Т. 2. Пер. с англ. — 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Мир, 1993. — 371 с. [ISBN 5-03-002338-0](#).
- S. Norsworthy, R. Schreier, G. Temes. *Delta-Sigma Data Converters*. [ISBN 0-7803-1045-4](#).
- Mingliang Liu. *Demystifying Switched-Capacitor Circuits*. [ISBN 0-7506-7907-7](#).
- Behzad Razavi. *Principles of Data Conversion System Design*. [ISBN 0-7803-1093-4](#).
- David Johns, Ken Martin. *Analog Integrated Circuit Design*. [ISBN 0-471-14448-7](#).
- Phillip E. Allen, Douglas R. Holberg. *CMOS Analog Circuit Design*. [ISBN 0-19-511644-5](#).
- Ханзел Г. Е. *Справочник по расчету фильтров*. США, 1969. / Пер. с англ., под ред. А. Е. Знаменского. М.: Сов. радио, 1974. — 288 с. УДК 621.372.541.061

Источник

«<http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%BE-%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9-%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C>»

Категории: [Сопряжение цифровых и аналоговых систем](#) | [Аппаратное обеспечение](#) | [Импульсная техника](#) | [Радиоизмерительные приборы](#)