

СИГНАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

АНАЛОГОВЫЙ СИГНАЛ

ДИСКРЕТНЫЙ СИГНАЛ

ЦИФРОВОЙ СИГНАЛ

ЦИФРОВОЙ ДВОИЧНЫЙ СИГНАЛ

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

УНИФИЦИРОВАННЫЙ СИГНАЛ

УНИФИЦИРОВАННЫЙ АНАЛОГОВЫЙ СИГНАЛ 4-20 мА

ЛИНЕЙНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

МАСШТАБИРОВАНИЕ

ФИЛЬТРАЦИЯ

ДАТЧИК: ПАССИВНЫЙ / ПЕРВИЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

ДАТЧИК: АКТИВНЫЙ / ВТОРИЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

ДАТЧИК: ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ

СИГНАЛЫ

АНАЛОГОВЫЙ СИГНАЛ

Аналоговый — это **непрерывный во времени сигнал**, порождаемый реальным физическим процессом, параметры которого можно измерить в любой момент.

Аналоговый сигнал является неким аналогом реальной физической величины: звука, света, температуры, влажности и т.д.

Все реальные физические величины изменяются непрерывно во времени и с какой угодно точностью, то есть число состояний физической величины стремится к бесконечности.

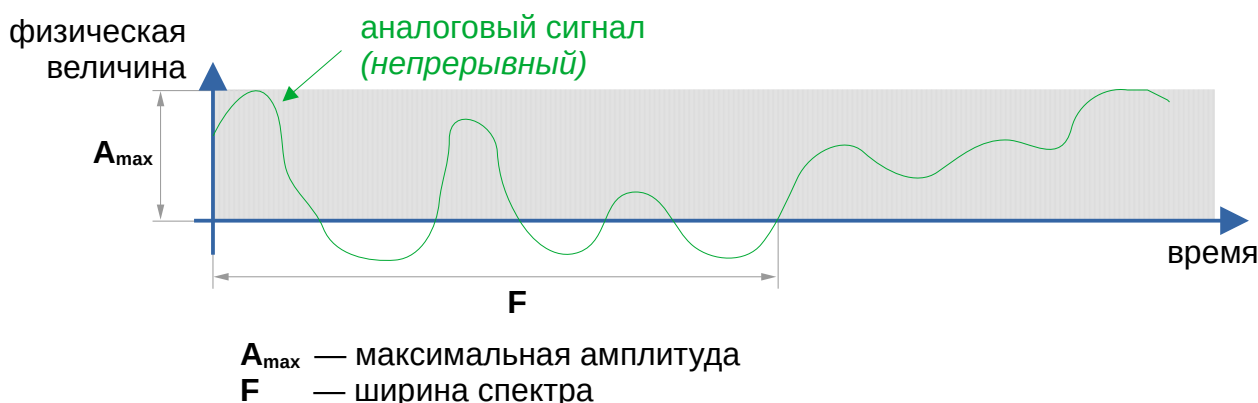
Аналоговый сигнал можно представить как массив данных (Ma) из N -элементов. Каждый элемент массива содержит значение физической величины в момент времени t . При этом разница во времени между соседними элементами (замерами) сильно мала. Поэтому, если этот массив изобразить графически, то график будет иметь вид кривой с плавными волнообразными переходами, а расстояние между вертикальными отсечками на оси «время» (время между соседними элементами / замерами) будет не видно. Размерность массива данных (Ma) — очень большая.

$Ma[0]$ = значение физической величины (в момент времени)

$Ma[1]$ = значение физической величины (в следующий момент времени)

...

$Ma[N]$ = значение физической величины (в следующий момент времени)



Характеристики аналогового сигнала:

- Амплитуда
- Частота
- Ширина спектра (часть анализируемого сигнала)
- Длительность сигнала

Аналоговый сигнал беспомощен перед помехами. Любая помеха, накладываемая на аналоговый сигнал, будет без изменений получена и воспринята приемником информации. У цифровых технологий в этом случае ситуация выглядит лучше, т. к. цифровое оборудование способно отфильтровывать «непрощенных гостей» и восстанавливать исходное состояние сигнала.

Аналоговый сигнал — избыточен, т. к. несет в себе много лишней информации.

СИГНАЛЫ

АНАЛОГОВЫЙ СИГНАЛ (продолжение)

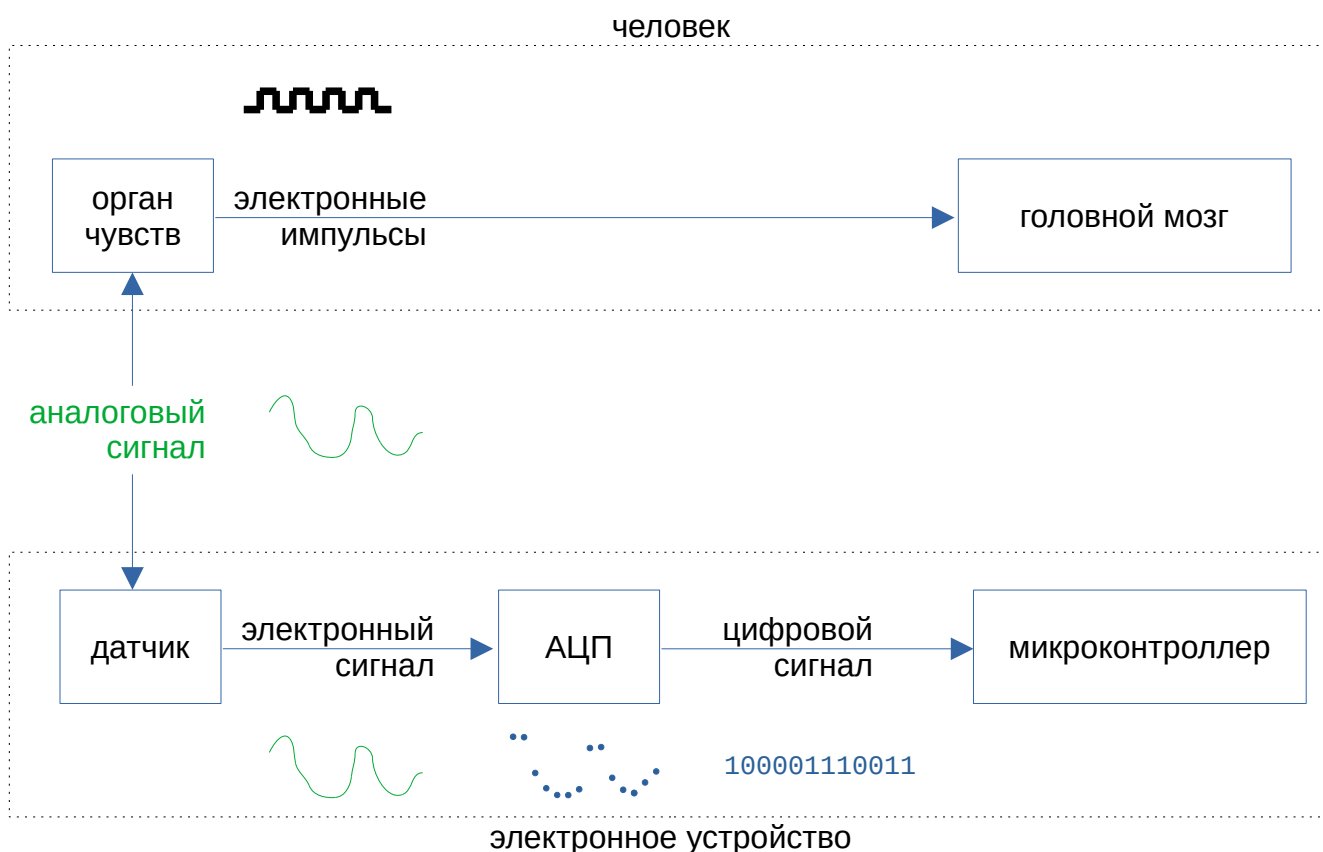
Как воспринимает аналоговый сигнал человек?

- 1) Внешний аналоговый сигнал воспринимается соответствующим органом чувств (звук — уши, свет — глаза, температура — кожный покров и т. д.).
- 2) Орган чувств преобразует аналоговый сигнал в импульсы одного формата (электрической природы), которые удобны для восприятия следующим «устройством» - головным мозгом.
- 3) Головной мозг обрабатывает полученные импульсы и формирует какие-то управляющие воздействия.

Как воспринимает аналоговый сигнал человек?

- 1) Как воспринимает аналоговый сигнал электронное устройство?
- 2) Внешний аналоговый сигнал воспринимается чувствительным элементом соответствующего датчика (звук — микрофон, свет — фотоэлемент, температура — терморезистор, термопара и т. д.).
- 3) Чувствительный элемент датчика преобразует аналоговый сигнал в электрический сигнал, который удобен для восприятия следующим устройством — аналого-цифровым преобразователем (АЦП).
- 4) АЦП преобразует полученный электрический сигнал в цифровой код, который удобен для восприятия следующим устройством — микроконтроллером.
- 5) Микроконтроллер обрабатывает полученный цифровой код и формирует какие-то управляющие воздействия.

В случае, что с человеком, что с электронным устройством — алгоритм восприятия аналогового сигнала в общем идентичен:



СИГНАЛЫ

ДИСКРЕТНЫЙ СИГНАЛ

Дискретный (discretus — прерывистый, разделенный) — это **прерывный во времени сигнал**, параметры которого можно измерить только в определенный момент времени.

Дискретный сигнал, по сути, является неполной копией аналогового сигнала — представляет собой массив из одной или нескольких выборок (замеров) значений из аналогового сигнала.

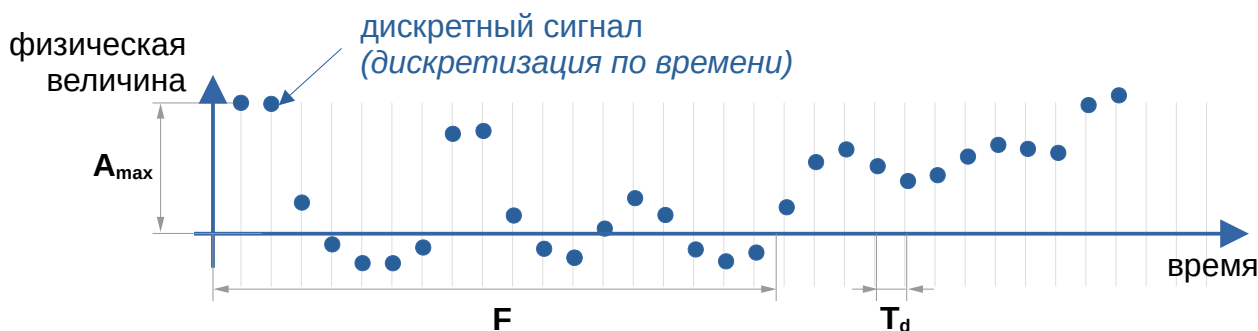
Дискретный сигнал можно представить как массив данных (Мд) из М-элементов. Каждый элемент массива содержит значение физической величины в момент времени t . При этом разница во времени между соседними элементами (замерами) четко **определена шагом дискретизации**. Поэтому, если этот массив изобразить графически, то график будет (условно) иметь вид кривой с «ломаными» переходами, а расстояние между вертикальными отсечками на оси «время» (время между соседними элементами / замерами) будет видно. Размерность массива данных (Мд) — меньше, чем у аналогичного массива аналогового сигнала (Ма).

$M_d[0]$ = значение физической величины (в момент времени)

$M_d[1]$ = значение физической величины (в следующий момент времени)

...

$M_d[M]$ = значение физической величины (в следующий момент времени)



A_{max} — максимальная амплитуда

F — ширина спектра

T_d — шаг дискретизации

f_d — частота дискретизации

• — одно значение (выборка)

$$T_d = \frac{1}{f_d}$$

Характеристики дискретного сигнала:

- Амплитуда
- Частота
- Ширина спектра (часть анализируемого сигнала)
- Длительность сигнала
- Шаг дискретизации
- Частота дискретизации

Существует путаница между понятиями дискретного и цифрового сигналов. Часто цифровой сигнал называют дискретным, потому что он состоит из дискретных (отдельных) частей (сэмплов / samples), но, при этом, цифровой сигнал не является прерывистым — группа дискрет здесь может формировать какое-то единое число и т.п.

СИГНАЛЫ

ЦИФРОВОЙ СИГНАЛ

Цифровой (digital) — это искусственный инфосигнал, представленный в виде очередных цифровых значений, которые описывают конкретные параметры передаваемой информации.

Цифровой сигнал состоит из дискретных (отдельных) частей (сэмплов / samples), но, при этом, цифровой сигнал не является прерывистым — группа дискрет здесь может формировать какую-то единую сущность (например, число).

Основой цифрового сигнала является **бит** (binarydigit — двоичный разряд), принимающий значение «0» или «1».

Один бит имеет ограниченную возможность для передачи информации, поэтому биты объединили в блоки, формирующие в итоге **число определенной разрядности** (битности).

Чем больше разрядность числа (количество бит в числе), тем больше информации оно несет.

В цифровых технологиях используют блоки битов, кратные 8:

Разрядность	Значение числа	
	десятичная система счисления	шестнадцатеричная система счисления
8 бит	$2^8 = 0 - 256$	0x00 - 0xFF
12 бит	$2^{12} = 0 - 4\,096$	0x000 - 0xFFF
16 бит	$2^{16} = 0 - 65\,536$	0x0000 - 0xFFFF
24 бит	$2^{24} = 0 - 16\,777\,216$	0x000000 - 0xFFFFFFFF
32 бит	$2^{32} = 0 - 4\,294\,967\,296$	0x00000000 — 0xFFFFFFFF

Цифровые сигналы повсеместно используются в вычислительной технике. Любой микропроцессор / микроконтроллер оперирует именно цифровыми сигналами.

СИГНАЛЫ

ЦИФРОВОЙ ДВОИЧНЫЙ СИГНАЛ

В отличие от аналогового и дискретного, цифровой сигнал обладает ограниченным набором значений (представлений): 2, 3, 4, ..., 10 — в зависимости от которых цифровой сигнал приобретает название: двоичный, троичный, четверичный, ..., десятичный.

Чаще всего применяется **двоичное представление**, в котором сигнал может принимать только два значения:

- Высокий уровень (логическая «1» или лог.1 или 1 или TRUE)
- Низкий уровень (логический «0» или лог.0 или 0 или FALSE)

Каждому логическому значению сопоставим определенный уровень электрического сигнала или граница диапазона уровней.

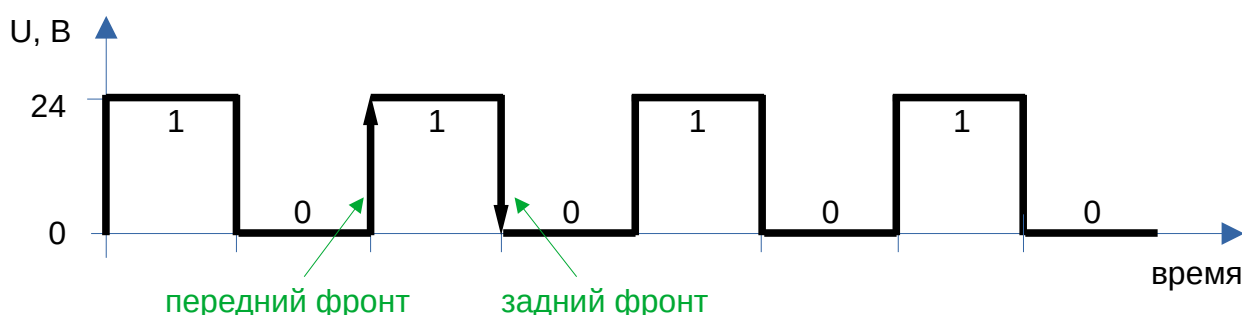
Например:

лог.0 — когда напряжение 0 В

лог.1 — когда напряжение 24 В

Все значения двоичного сигнала, которые находятся между логическими «0» и «1», являются переходными (абстрактными) - они могут быть детектированы и использованы в реализации определенных алгоритмов:

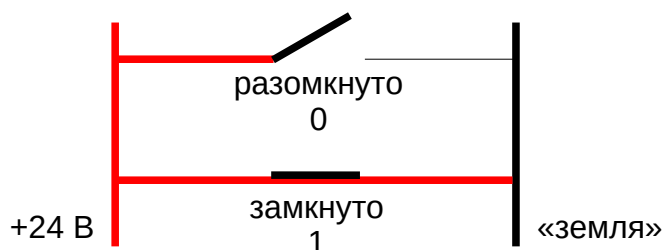
- Передний / Восходящий фронт (rising edge)
- Задний / Нисходящий фронт (falling edge)



Цифровые сигналы повсеместно используются в вычислительной технике. Любой микропроцессор / микроконтроллер оперирует именно цифровыми сигналами.

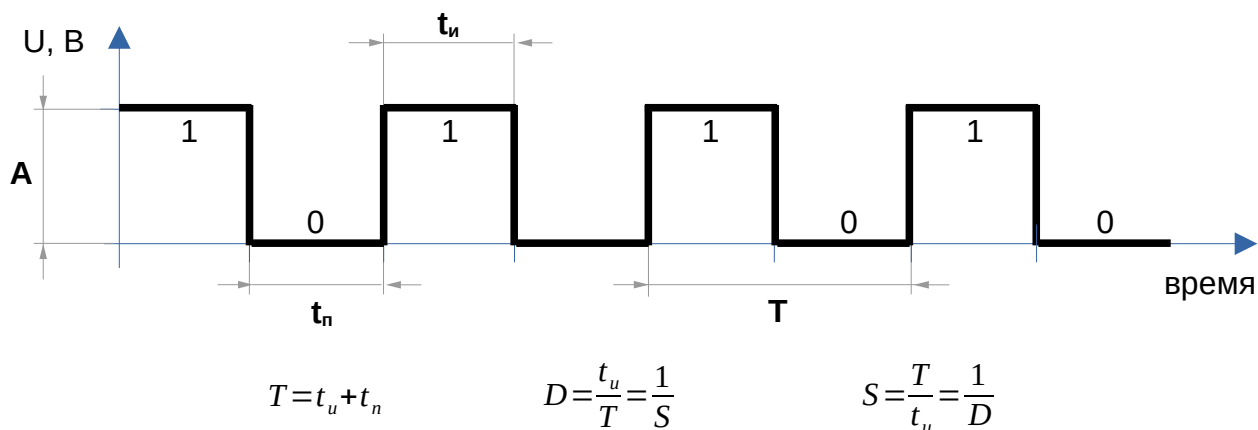
Примеры сигналов, которые могут быть представлены в цифровом двоичном виде:

- Состояние электрического контакта (выключатель, кнопка, реле, транзистор)
разомкнуто / замкнуто
- Состояние заряда электрической емкости (конденсатор, аккумулятор)
разряжено / заряжено
- Состояние электрического сигнала
низкий уровень / высокий уровень



СИГНАЛЫ

ЦИФРОВОЙ ДВОИЧНЫЙ СИГНАЛ (продолжение)



Характеристики цифрового двоичного сигнала:

- Амплитуда импульса (**A**)
- Длительность импульса (**t_u**)
- Пауза импульса (**t_n**)
- Скважность (**S**)
- Коэффициент заполнения импульса (**D**)
- Период импульсов (**T**)

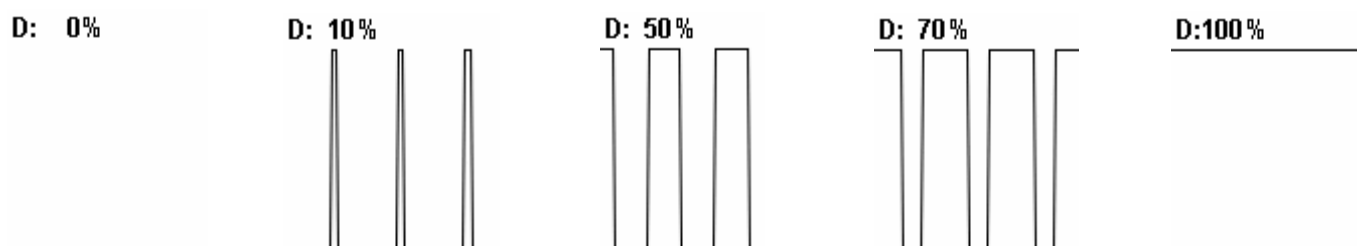
Амплитуда (**A**) — это высота импульса, соответствующая наибольшему значению электрического сигнала (напряжения или тока). Выражается в единицах соответствующего электрического сигнала (Вольты или Амперы).

Длительность импульса (**t_u**) — это временной интервал, на протяжении которого электрический сигнал имеет наибольшее значение. Выражается в единицах времени (например, микросекунды, миллисекунды, секунды и т. д.).

Длительность импульса (**t_n**) — это временной интервал, на протяжении которого электрический сигнал имеет наименьшее значение или не имеет сигнала вообще. Выражается в единицах времени (например, микросекунды, миллисекунды, секунды и т. д.).

Скважность (**S**) — это величина, определяющая отношение периода следования (повторения) импульсов к длительности импульса. Величина — безразмерная и изменяется в диапазоне от 0 до бесконечности (∞).

Коэффициент заполнения (**D**) или рабочий цикл (Duty cycle) — это величина, обратная скважности. Величина — безразмерная и изменяется от 0 до 1. Часто переводят в %, умножая полученное значение на 100.



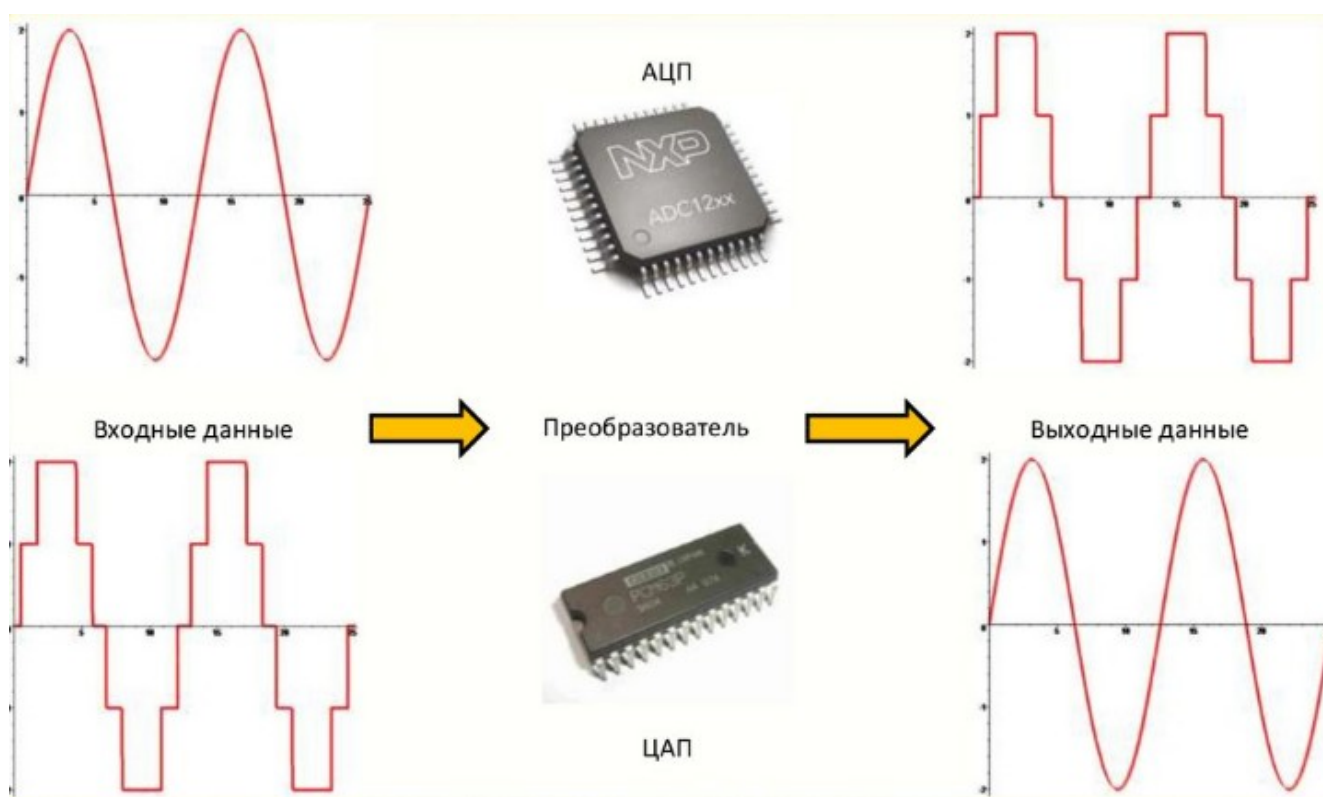
СИГНАЛЫ

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Как говорилось в предыдущих разделах, все вычисления основаны на работе какого-либо микропроцессорного устройства, которое оперирует только цифровыми сигналами. Поэтому здесь возникает необходимость в преобразовании аналоговых сигналов, получаемых от различных физических систем, в цифровые сигналы.

Аналого-цифровой преобразователь / Analog-to-digital converter (АЦП / ADC) - электронное устройство, преобразующее входной аналоговый электрический сигнал (например, напряжение) в двоичный цифровой код.

Обратную функцию — преобразование цифрового сигнала в аналоговый — выполняет **Цифро-аналоговый преобразователь / Digital-to-Analog Converter (ЦАП / DAC)** — точнее электронная схема с ЦАП.



АЦП на вход принимает только аналоговый электрический сигнал (обычно по напряжению). Поэтому, подачей на вход АЦП, измеряемая физическая величина сначала с помощью специальных электрических схем приводится к требуемому электрическому сигналу (в зависимости от АЦП) - например, сигнал с датчика термосопротивления (сопротивление — Омы) с помощью специальной схемы преобразуется в напряжение, эквивалентное сопротивлению, и далее это напряжение подается на вход АЦП.

СИГНАЛЫ

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ (продолжение)

Цифровой код на выходе АЦП — это последовательность дискретных / битовых значений (значений «0» и «1»). Чем длиннее последовательность, тем больше приближен результат преобразования к исходному аналоговому сигналу (выше точность).

Разрядность АЦП - характеристика, определяющая количество дискретных значений (шагов квантования), которое может выдать на выходе АЦП. Разрядность измеряется в битах. Значение данной характеристики можно найти в техническом описании конкретного АЦП.

Разрешение АЦП (разрешающая способность или шаг квантования) — минимальное изменение величины входного аналогового сигнала, которое может преобразовать АЦП. Является минимальной единицей разрядности. Значение данной характеристики можно также найти в техническом описании конкретного АЦП, а также вычислить по формуле:

$$U_q = \frac{(U_{\max} - U_{\min})}{2^n}$$

U_q — разрешение АЦП (В)

U_{\max} — напряжение, соответствующее максимальному входному значению (В)

U_{\min} — напряжение, соответствующее минимальному входному значению (В)

n — разрядность (бит)

Разрядность	Количество дискретных значений / уровней квантования
8 бит	$2^8 = 256$
12 бит	$2^{12} = 4\,096$
16 бит	$2^{16} = 65\,536$
24 бит	$2^{24} = 16\,777\,216$
32 бит	$2^{32} = 4\,294\,967\,296$

Пример

Ниже даны два АЦП с различной разрядностью. На вход каждого АЦП подается одинаковый аналоговый сигнал (в диапазоне от 0 до 10 В). Определить разрешающую способность данных АЦП.

АЦП (1)

$$U_{\max} = 10 \text{ В}$$

$$U_{\min} = 0 \text{ В}$$

$$n = 12 \text{ бит}$$

$$U_q = \frac{(10 \text{ В} - 0 \text{ В})}{2^{12}} = \frac{(10 \text{ В})}{4096} = 0,00244 \text{ В} = 2,44 \text{ мВ}$$

АЦП (2)

$$U_{\max} = 10 \text{ В}$$

$$U_{\min} = 0 \text{ В}$$

$$n = 24 \text{ бит}$$

$$U_q = \frac{(10 \text{ В} - 0 \text{ В})}{2^{24}} = \frac{(10 \text{ В})}{16\,777\,216} = 0,0005960 \text{ мВ}$$

СИГНАЛЫ

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ (продолжение)

Рассмотрим алгоритм оцифровки физической величины (один цикл).

Дано:

- Термосопротивление
выход: 0-100 Ом (что соответствует температуре от -40 до +180°C)
- АЦП
вход: 0-10 В
разрядность: 12 бит
количество выборок входного сигнала: 100
шаг дискретизации: 10 мкс

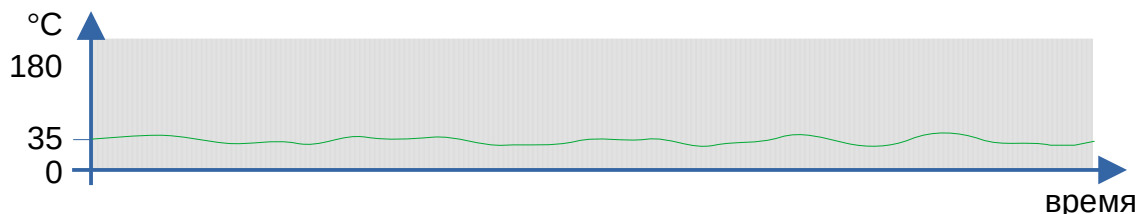


СИГНАЛЫ

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ (продолжение)

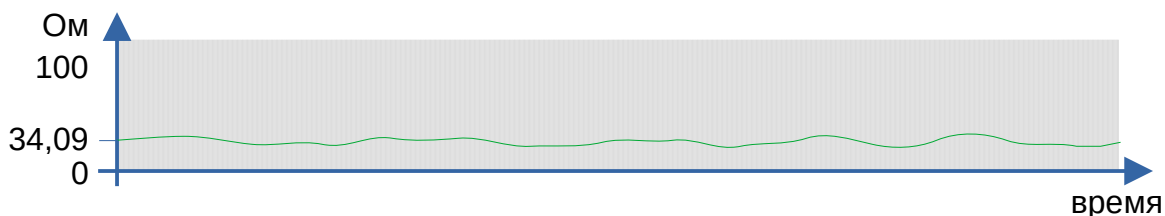
Этап 1

Физическая величина (температура) воздействует (подается) на чувствительный элемент термосопротивления.



Этап 2

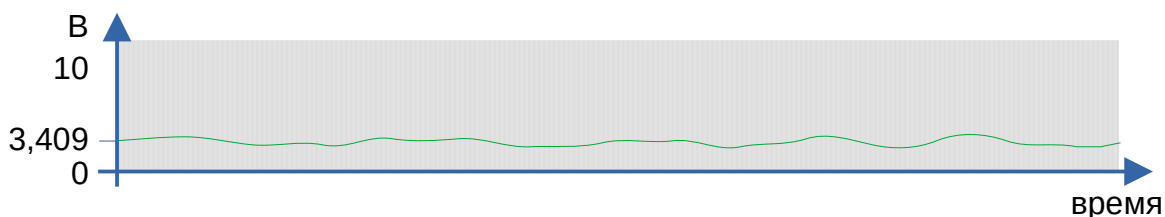
Чувствительный элемент термосопротивления воспринимает температуру в градусах и преобразует ее в эквивалентное значение сопротивления (физическая особенность работы термосопротивления).



Значение сопротивления от термосопротивления далее передается на вход специальной электрической схемы преобразования (приведения).

Этап 3

Схема приведения полученное от термосопротивления значение сопротивления преобразует в эквивалентное значение напряжения (по уровню, с которым работает АЦП).



Полученное значение напряжения далее передается на вход АЦП.

СИГНАЛЫ

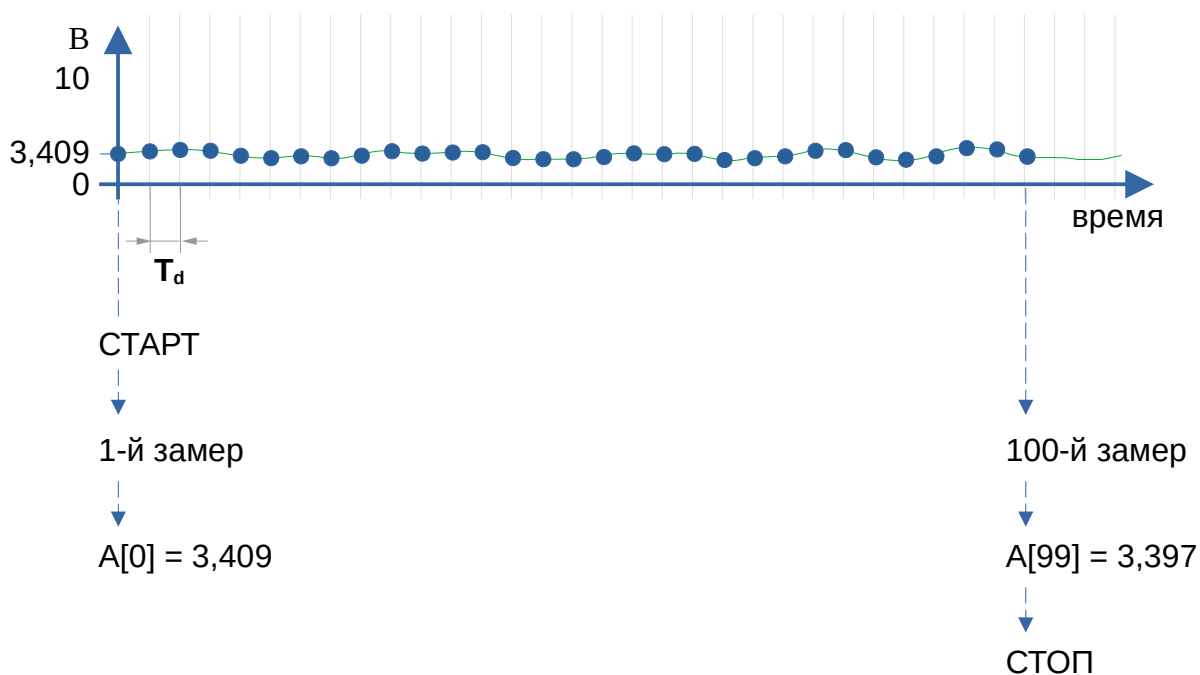
АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ (продолжение)

Этап 4

АЦП запускает алгоритм дискретизации по времени входного аналогового сигнала (по напряжению):

- 1) В памяти АЦП создается пустой массив **A** с количеством элементов, равным 100.
- 2) Выполняется 1-й замер:
в ячейку массива **A[0]** заносится измеренное значение аналогового сигнала.
- 3) Пауза на 10 мкс (шаг дискретизации T_d).
- 4) Выполняется 2-й замер:
в ячейку массива **A[1]** заносится измеренное значение аналогового сигнала.
- 5) Пауза на 10 мкс (шаг дискретизации T_d).
- 6) Выполняется 3-й замер:
в ячейку массива **A[2]** заносится измеренное значение аналогового сигнала.
- 7) Пауза на 10 мкс (шаг дискретизации T_d).
- 8) ...
- 9) Выполняется 100-й замер:
в ячейку массива **A[99]** заносится измеренное значение аналогового сигнала.
- 10) Алгоритм дискретизации завершается.

Полученный массив **A** далее передается на вход алгоритма квантования АЦП.



СИГНАЛЫ

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ (продолжение)

Этап 5

АЦП запускает алгоритм квантования по уровню полученного массива **A**:

1) В постоянной памяти АЦП хранится массив-справочник **B** с количеством элементов, равным 4 096 (2^{12}).

Каждый элемент массива **B** содержит два значения:

+ эталонное значение ($= N \cdot U_q$, где N — индекс элемента, U_q — разрешение)

+ цифровой код, соответствующий этому напряжению

2) Для значения 1-го элемента массива **A** выполняется поиск наиболее подходящего эталонного значения из массива **B**:

в ячейку массива **A[0]** заносится соответствующий цифровой код из массива **B**.

3) Для значения 2-го элемента массива **A** выполняется поиск наиболее подходящего эталонного значения из массива **B**:

в ячейку массива **A[1]** заносится соответствующий цифровой код из массива **B**.

4) Для значения 3-го элемента массива **A** выполняется поиск наиболее подходящего эталонного значения из массива **B**:

в ячейку массива **A[2]** заносится соответствующий цифровой код из массива **B**.

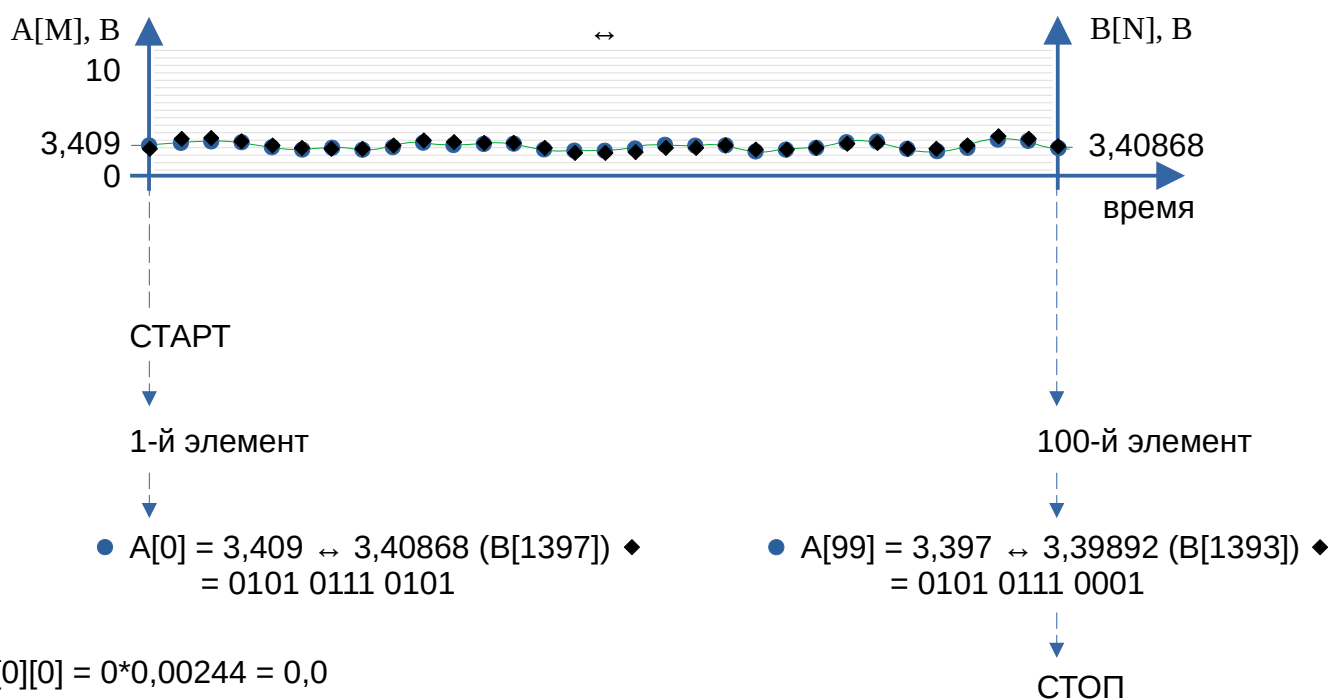
5) ...

6) Для значения 100-го элемента массива **A** выполняется поиск наиболее подходящего эталонного значения из массива **B**:

в ячейку массива **A[99]** заносится соответствующий цифровой код из массива **B**.

7) Алгоритм квантования завершается.

Обновленный массив **A** далее передается на вход алгоритма усреднения АЦП.



$$B[0][0] = 0 \cdot 0,00244 = 0,0$$

$$B[0][1] = 0000\ 0000\ 0000\ (\text{bin})$$

$$B[1][0] = 1 \cdot 0,00244 = 0,00244$$

$$B[1][1] = 0000\ 0000\ 0001\ (\text{bin})$$

...

$$B[4095][0] = 4095 \cdot 0,00244 = 999,18$$

$$B[4095][1] = 1111\ 1111\ 1111\ (\text{bin})$$

$$U_q = \frac{(10\ B - 0\ B)}{2^{12}} = \frac{(10\ B)}{4096} = 0,00244\ B = 2,44\ \text{mB}$$

СИГНАЛЫ

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ (продолжение)

Этап 6

АЦП запускает алгоритм усреднения обновленного массива **A**:

$$ADC_{out} = \frac{\sum_{M=0}^{100} A[M]}{100} \approx 010101110001$$

Где, **ADC_{out}** — цифровой код, который передается непосредственно на выход АЦП.

Пример: Звук — аналоговый сигнал. Что происходит в мобильных телефонах, которые передают информацию по цифровым каналам связи?

- 1) Звук попадает на вход микрофона.
- 2) Микрофон преобразует физический звуковой сигнал в электрический.
- 3) Выполняется выборка отдельных значений электрического сигнала через одинаковые отрезки времени (дискретизация).
- 4) Выполняется округление всех выбранных значений (квантование).
Чем выше разрядность АЦП, тем более точнее будет оцифрован исходный сигнал.
- 5) Выполняется кодирование и выдача цифрового сигнала микроконтроллеру телефона.
- 6) Микроконтроллер передает цифровой сигнал по беспроводной связи на базовую станцию сотового оператора и далее на телефон целевого абонента.
- 7) Микроконтроллер телефона целевого абонента принимает цифровой сигнал и передает его в ЦАП.
- 8) ЦАП целевого абонента выполняет обратную процедуру — переводит сигнал из цифрового вида в аналоговый.
- 9) Аналоговый сигнал от ЦАП целевого абонента передается на динамик его телефона.

СИГНАЛЫ

УНИФИЦИРОВАННЫЙ СИГНАЛ

Чувствительные элементы измерительных приборов обычно выдают так называемый неунифицированный вид сигнала по типу и значению.

Чтобы избежать такого разнообразия типов среди каналов ввода/вывода конечных приборов (измерителей, регуляторов, контроллеров и т. п.), датчики оснащают специальными нормирующими преобразователями.

Задача нормирующего преобразователя — получить неунифицированный сигнал от чувствительного элемента и с помощью специальных электрических схем привести его к стандартному (унифицированному) виду.

Унифицированные сигналы применяют не только для датчиков, но и для любых других устройств (например, исполнительных механизмов, устройств пуска двигателей).

Среди унифицированных сигналов можно выделить следующие (основные):

- Аналоговые
 - постоянный ток
 $0 — 20\text{ мА}$
 $4 — 20\text{ мА}$
 - постоянное напряжение
 $0 — 10\text{ В}$
- Цифровые
 - постоянный ток
 $0 — 20\text{ мА}$
 - постоянное напряжение
 $0 — 24\text{ В}$
 - переменное напряжение
 $0 — 220\text{ В}$

Приведение значения унифицированного сигнала к значению физической величины (и обратно) осуществляется с помощью специальных математических формул — **формула Масштабирования**.

СИГНАЛЫ

УНИФИЦИРОВАННЫЙ АНАЛОГОВЫЙ СИГНАЛ 4-20 мА

Сигнал 4-20 мА постоянного тока (также называется как интерфейс «**Токовая петля**») - один из самых старых, и в то же время самых надежных и помехоустойчивых стандартов передачи информации на большие расстояния.

В основе сигнала 4-20 мА лежит токовая петля с рабочими значениями токов в диапазоне от 4 до 20 мА. Значение тока **от 0 до 3,8 мА** сигнализирует — **обрыв линии**, а значение **выше 20,5 мА** — **короткое замыкание**.

Для передачи сигнала 4-20 мА требуется всего лишь 2 провода (или двужильный кабель).

Достоинства сигнала 4-20 мА:

- + **Высокая точность передачи данных** — ток одинаков во всех элементах системы передачи; передатчик всегда знает, какой уровень сигнала получит приемник.
- + **Высокий уровень контроля и помехозащищенности** — за счет двойного контроля тока (на стороне передатчика и на стороне приемника).
- + **Независимость качества связи от длины линии** — длина линии влияет только на максимальную скорость передачи сигнала.
- + **Теоретически неограниченная длина линии** — фактически максимальная длина соединительного кабеля ограничена лишь электрической прочностью его изоляции и скоростью передачи данных.
- + **Самодиагностика** — неисправность, обрыв и короткое замыкание линии.
- + **Искробезопасность** — уровень 4-20 мА является искробезопасным для взрывоопасных зон (т. е. в случае нарушения целостности изоляции или частичного повреждения кабеля данный уровень сигнала недостаточный для образования искры).
- + **Не требует применения специальных кабелей** (но для промышленных решений рекомендуется использовать медный экранированный кабель).
- + **Может «нести на себе» цифровой протокол** — например, HART.
- + **Поддерживает сегментирование** — наращивание, разветвление и объединение.

Недостатки сигнала 4-20 мА:

- **Возможность передачи сигнала только по одному кабелю**.
- **Низкая скорость передачи информации** (по сегодняшним меркам) — чем длиннее кабельная линия, тем ниже скорость.

Сигнал 4-20 мА нашел широкое применение на практике в промышленных системах и КИП (что является еще одним и, пожалуй, главным преимуществом).

СИГНАЛЫ

УНИФИЦИРОВАННЫЙ АНАЛОГОВЫЙ СИГНАЛ 4-20 мА (продолжение)

Ниже приведены примеры работы с аналоговым сигналом 4-20 мА.

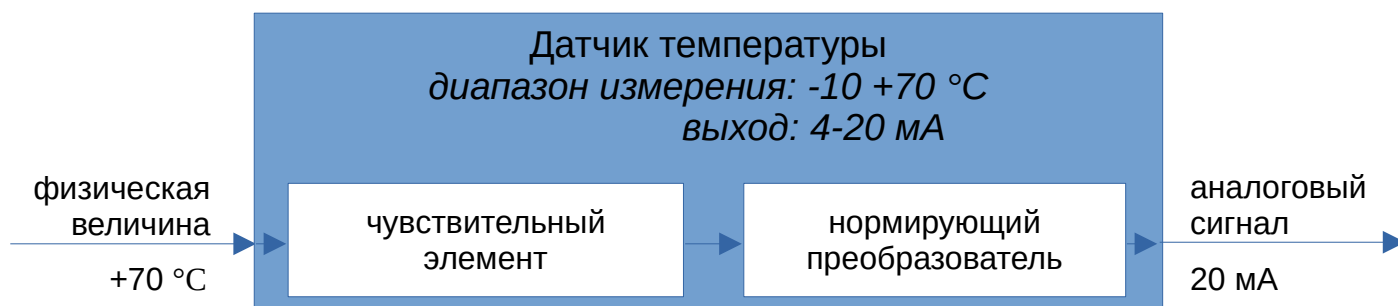
Пример 1:

Датчик температуры с диапазоном измерения $-10 + 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выходом 4-20 мА.

При температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ на выходе датчика будет значение 4 мА.

При температуре $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ на выходе датчика будет значение 20 мА.

Все промежуточные значения находятся из пропорции (формула масштабирования).



Пример 2:

Преобразователь частоты (ПЧ / VFD) управляет двигателем (частотой его вращения / скоростью).

ПЧ имеет каналы ввода:

- VIN — исходное питающее напряжение двигателя (380 В 50 Гц AC),
- AIN — аналоговый сигнал 4-20 мА, пропорциональный частоте вращения 0-50 Гц (установка по частоте).

ПЧ имеет каналы вывода:

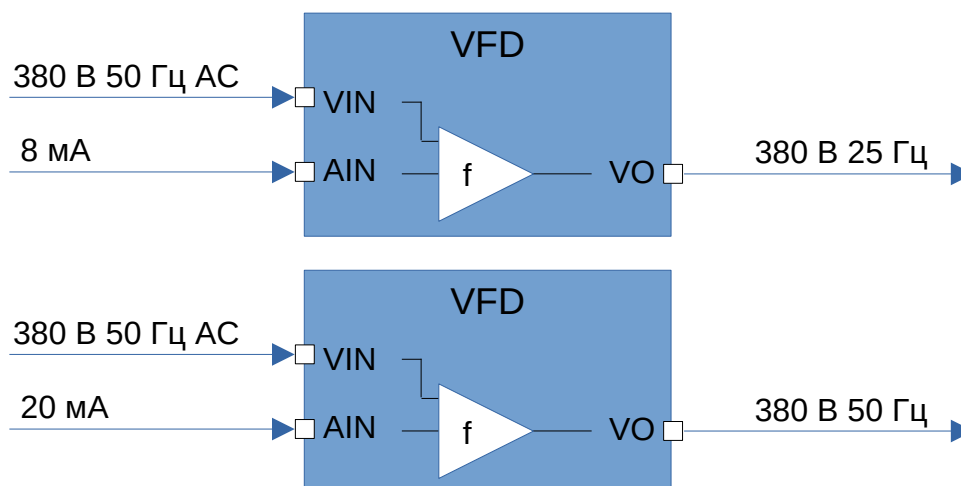
- VO — напряжение питания (380 В) на двигатель с заданной частотой,
- AO — аналоговый сигнал 4-20 мА, пропорциональный установленной частоте вращения (обратная связь по частоте).

Когда на вход AIN подается 4 мА, то на выходе:

- VO == 0 В (двигатель остановлен),
- AO == 4 мА (установлена частота 0 Гц).

Когда на вход AIN подается 20 мА, то на выходе:

- VO == 380 В 50 Гц (двигатель запущен и работает на максимальных оборотах),
- AO == 20 мА (установлена частота 50 Гц).



СИГНАЛЫ

ЛИНЕЙНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Понятие относится к аналоговым и цифровым сигналам.

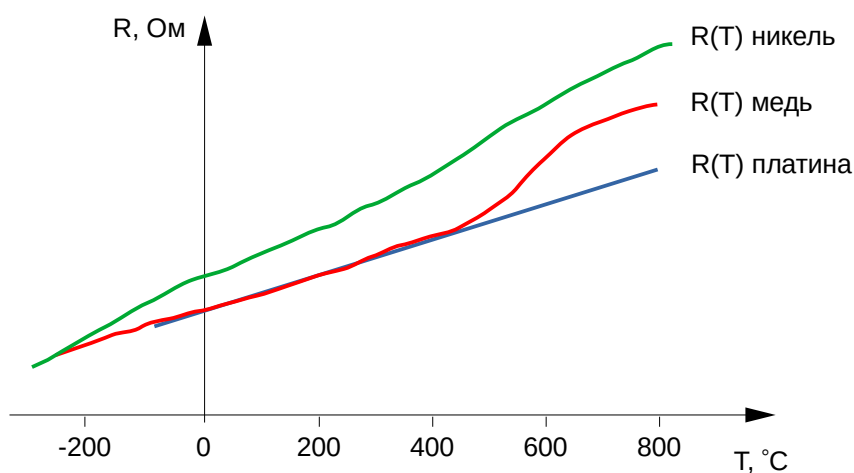
Линейная характеристика — это свойство сигнала (электрического аналогового или цифрового), когда его значение пропорционально значению реальной (физической) величины, связанной с ним (например, °С, кПа, кг и пр.). Эту зависимость схематически можно представить как прямую линию на графике, где каждому значению сигнала можно сопоставить реальное значение измеряемой величины.

Линейность характеристики сигнала является желательным свойством для многих систем управления, так как упрощает обработку данных. Например, преобразование значения сигнала с линейной характеристикой из одной величины в другую выполняется простыми методами — используется формула масштабирования, представляющая линейное уравнение первого порядка (простые математические операции: умножение и сложение).

Линейность характеристики сигнала может наблюдаться в определенных диапазонах его значений, т. е. в пределах всего этого диапазона используется одна и та же формула преобразования (с одними и теми же коэффициентами), поэтому эта характеристика также называется — **статическая линейная характеристика**. Например, характеристика чувствительных элементов термосопротивлений и термопар имеет линейность только в пределах определенных изменяемых температур

Нелинейность характеристики — это когда зависимость значения сигнала уже не является просто пропорциональной и, соответственно, описывается более сложными формулами (полиномы второго и более высшего порядков, нелинейные уравнения и т. д.). Может быть так, что один диапазон значений сигнала может иметь нелинейную характеристику, описываемую одной формулой, а следующий диапазон — нелинейной характеристикой с другой формулой (т. е. характеристика не просто нелинейная, но и не является статической).

При нелинейности сигнала стремятся сделать линейным участок хотя бы в пределах требуемого диапазона — делается это с помощью специальных устройств (или методов) коррекции — **линеаризация**.



пример линейных характеристик термосопротивлений

СИГНАЛЫ

МАСШТАБИРОВАНИЕ

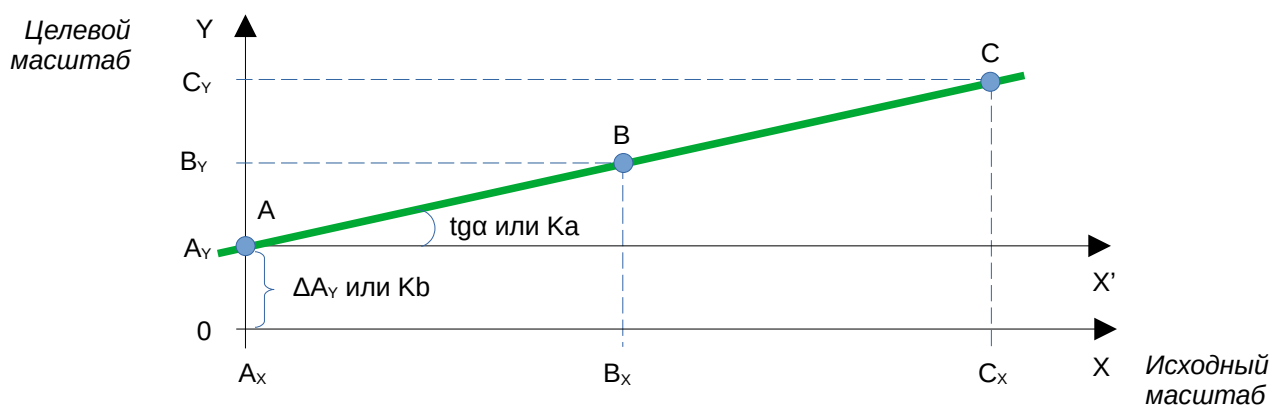
Масштабирование — это функция, которая преобразует число из одной системы измерения (исходный масштаб) в другую систему (целевой масштаб) путем сопоставления их диапазонов измерения (минимум и максимум шкалы).

Варианты преобразований (масштабирования):

- код АЦП > Вольты (В, милли-Вольты, мВ)
- код АЦП > Амперы (А, милли-Амперы, мА)
- мВ > кг (и обратно)
- мВ > код ЦАП
- мА > °C (и обратно)
- мА > кПа (и обратно)
- мА > обороты/сек (и обратно)
- мА > pH (и обратно)
- мА > м³/час (и обратно)
- мА > % открытия клапана (и обратно)
- мА > код ЦАП
- и пр.

Функция масштабирования имеет наиболее понятный и простой вид для сигналов с линейной характеристикой.

Визуально линейную характеристику можно представить как прямую линию, которая может быть смещена вниз или вверх относительно вертикальной оси (Y), а также может быть наклонена на определенный угол относительно горизонтальной оси (X):



где,

X — ось со значениями исходного масштаба

Y — ось со значениями целевого масштаба

A и C — точки, по которым строится линейная характеристика - определяются коэффициенты для функции масштабирования (угловой коэффициент и коэффициент смещения).

B — точка текущего значения (взята произвольно).

СИГНАЛЫ

МАСШТАБИРОВАНИЕ (продолжение)

Каждая точка линейной характеристики описывается двумя значениями (координатами):

A_x	Исходный масштаб / Исходная шкала - значение нижней границы (минимум) - известное, паспортизованное, калибровочное
A_y	Исходный масштаб / Исходная шкала - значение верхней границы (максимум) - известное, паспортизованное, калибровочное
C_x	Целевой масштаб / Целевая шкала - значение нижней границы (минимум) - известное, паспортизованное, калибровочное
C_y	Целевой масштаб / Целевая шкала - значение верхней границы (максимум) - известное, паспортизованное, калибровочное
B_x	Исходный масштаб / Исходная шкала - текущее значение - известное (например, значение с датчика — код АЦП, мВ, мА и т.п.)
B_y	Целевой масштаб / Целевая шкала - текущее значение - неизвестное - вычисляется через функцию масштабирования с учетом известных значений

A_x, **A_y**, **C_x**, **C_y** — известные величины (условно постоянные), которые определяют минимум и максимум исходного и целевого масштаба (шкалы); эти значения можно найти двумя способами: теоретически или практически.

Теоретический способ

Здесь значения **A_x**, **A_y**, **C_x**, **C_y** являются постоянными (константами), т.е. они были кем-то заранее определены, вычислены, утверждены и зафиксированы документально.

Найти эти значения, обычно, можно в следующих источниках:

- техническая документация
 - паспорт прибора или системы, спецификация на протокол передачи данных
- технологическая документация
 - описание технологического процесса, технологические карты, инструкции
- иная документация

Этот способ является наиболее простым (не требует дополнительного оборудования), но, в то же время, может не учитывать ряд погрешностей (например, погрешность от износа / «старения» оборудования, от наводимых помех, некачественного монтажа или внесения изменений в конструкцию рабочего оборудования по прошествии определенного времени).

СИГНАЛЫ

МАСШТАБИРОВАНИЕ (продолжение)

Практический способ

Здесь значения A_X , A_Y , C_X , C_Y определяются методом калибровки.

Процесс калибровки выполняется единоразово или с определенной периодичностью (например, один раз в год).

Для калибровки потребуются средства (или оборудование), предоставляющие функции:

- подключение к целевому (рабочему) оборудованию,
- установка эталонных мер (B_Y , минимум и максимум исходного масштаба),
- измерение значения B_X (сопоставимо установленной эталонной мере),
- фиксация A_X , C_X (приравнивание измеренного значения B_X по команде),
- ручной ввод A_Y , C_Y .

Под эталонной мерой понимается:

- эталонный прибор,
- эталонный груз, датчик давления, датчик температуры,
- датчик электрического сигнала (например, унифицированного 4-20 мА, 0-10 В).

Калибровка точки А:

- установить эталонную меру — минимум исходной шкалы (B_Y),
- измерить значение B_X для установленной B_Y ,
- зафиксировать A_X , (равно значению B_X),
- ввести вручную значение A_Y (равно значению B_Y).

Калибровка точки В:

- установить эталонную меру — максимум исходной шкалы (B_Y),
- измерить значение B_X для установленной B_Y ,
- зафиксировать C_X , (равно значению B_X),
- ввести вручную значение C_Y (равно значению B_Y).

Определенные таким образом значения A_X , A_Y , C_X , C_Y учитывают погрешности, недоступные при теоретическом способе.

Функция масштабирования

Линейная характеристика:

- имеет наклон к оси X - **угловой коэффициент** ($K_A = \operatorname{tg} \alpha$, формула 1)
- имеет сдвиг по оси Y от нуля - **коэффициент смещение нуля** (K_B , формула 2)
- **уравнение прямой с угловым коэффициентом** (формула 3)

$$K_A = \frac{C_Y - A_Y}{C_X - A_X} = \frac{Y_{MAX} - Y_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}} \quad (1)$$

$$K_B = \frac{A_Y \cdot C_X - C_Y \cdot A_X}{C_X - A_X} = \frac{Y_{MIN} \cdot X_{MAX} - Y_{MAX} \cdot X_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}} \quad (2)$$

$$B_Y = (K_A \cdot B_X) + K_B \quad \text{или} \quad Y = (K_A \cdot X) + K_B \quad (3)$$

СИГНАЛЫ

МАСШТАБИРОВАНИЕ (продолжение)

Формулы 1-3 можно свести в одну (4):

$$B_Y = (B_X - A_X) \cdot \frac{C_Y - A_Y}{C_X - A_X} + C_Y \quad \text{или} \quad Y = (X - X_{MIN}) \cdot \frac{Y_{MAX} - Y_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}} + Y_{MIN} \quad (4)$$

Формула 4 не требует дополнительного вычисления коэффициентов 1 и 2, но в ней имеется операция деления, которая, в случае выполнения на вычислительном устройстве, требует дополнительное процессорное время (вычисление будет дольше).

Если коэффициенты 1 и 2 вычислять «единоразово» на этапе калибровки, то формула масштабирования 3 будет более эффективнее в плане затрат процессорного времени, так как она состоит из простых операций сложения и умножения (затратная операция деления здесь отсутствует).

Пример

Дано:

- датчик температуры
 - со вторичным преобразователем
 - подключен к каналу аналогового ввода (AI, разрядность АЦП = 12 бит)
- шкала температурного диапазона датчика
 - -40 ... 120°C
- шкала выходного сигнала датчика
 - 4 ... 20 мА
- шкала канала аналогового ввода
 - 0 ... 4095 ($2^{12} = 4096$)
- текущее показание датчиком
 - 11 мА

Определить:

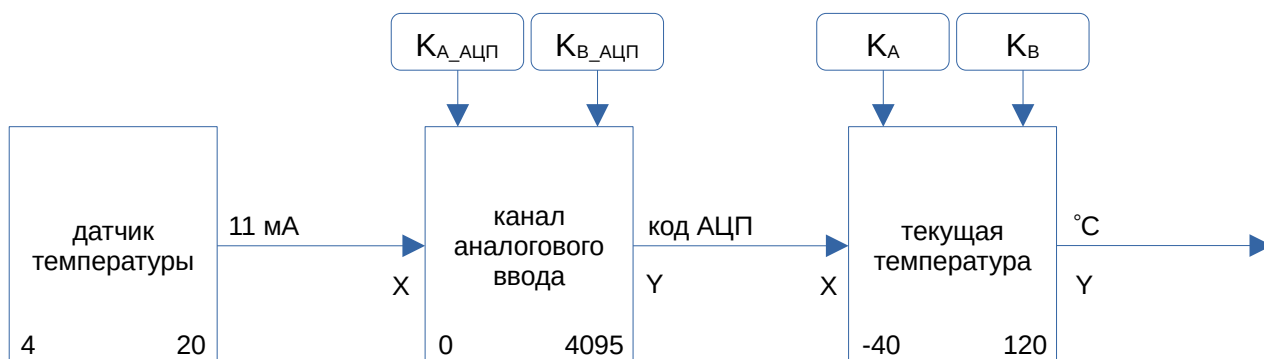
- код АЦП, соответствующий текущему показанию датчика
- температуру, соответствующую текущему показанию датчика

Решение:

1. Сначала необходимо вычислить коэффициенты масштабирования:
 - для преобразования «мА в код АЦП» ($K_{A_АЦП}$, $K_{B_АЦП}$)
 - для преобразования «код АЦП в °C» (K_A , K_B)
2. Далее выполнить масштабирование с использованием полученных коэффициентов:
 - преобразование «мА в код АЦП»
 - преобразование «код АЦП в °C»

СИГНАЛЫ

МАСШТАБИРОВАНИЕ (продолжение)



$$K_A = \frac{Y_{MAX} - Y_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}}$$

$$K_B = \frac{Y_{MIN} \cdot X_{MAX} - Y_{MAX} \cdot X_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}}$$

$$Y = (K_A \cdot X) + K_B$$

Масштабирование «мА в код АЦП»:

	X	Y
min	4	0
max	20	4095

$$K_{A_АЦП} = 255.9375$$

$$K_{B_АЦП} = -1023.75$$

X	Y
4	0
20	4095
11	1792

для Xmin (проверка)

для Xmax (проверка)

для Xтекущего

Масштабирование «код АЦП в °C»:

	X	Y
min	0	-40
max	4095	120

$$K_A = 0.039072$$

$$K_B = -40.0$$

X	Y
0	-40
4095	120
1792	30.17

для Xmin (проверка)

для Xmax (проверка)

для Xтекущего

Результат:

- код АЦП, соответствующий текущему показанию датчика = 1792
- температуру, соответствующую текущему показанию датчика = 30.17°C

СИГНАЛЫ

ФИЛЬТРАЦИЯ

Аналоговый сигнал, помимо полезной информации, несет в себе составляющую различных наведенных помех, которые будут негативно влиять на точность измерений и качество управления.

Для устранения помех применяют различные аппаратные (схмотехнические) и программные решения — от простых до самых сложных.

Аппаратные фильтры в модулях ввода/вывода, как правило, предусматриваются и устанавливаются на заводе-изготовителе (т. е. это часть схемы — конструкции модуля). Также изготовитель может предусмотреть и программную фильтрацию.

Часто бывает недостаточно фильтрующих средств, предусмотренных заводом-изготовителем. Поэтому, может появиться необходимость дополнительно фильтровать аналоговый сигнал своими «силами» (например, в управляющей программе ПЛК). Рассмотрим самый простой программный фильтр — **фильтр Калмана (первого порядка)**, формула 5). В формуле этого фильтра задействуется результат предыдущего вычисления (формула 6). Т.е., сначала вычисляется формула 5, а потом 6.

$$Y_F = (X \cdot (1 - K)) + (K \cdot Y_F^{-1}) \quad (5)$$

$$Y_F^{-1} = Y_F \quad (6)$$

где,

Y_F - значение после фильтрации

Y_F^{-1} - значение после фильтрации на предыдущем цикле (по-умолчанию, 0)

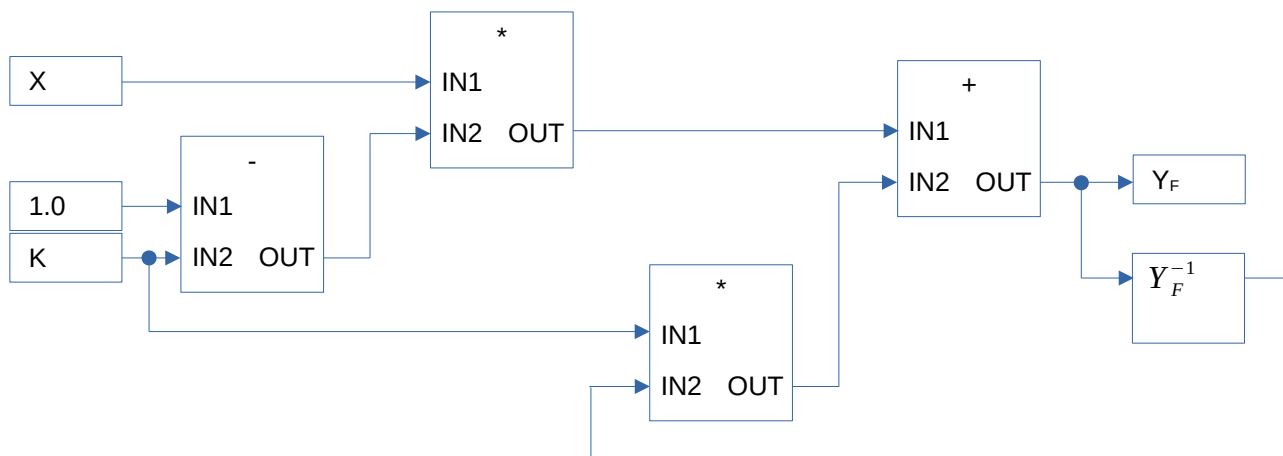
X - исходное значение, которое необходимо отфильтровать

K - коэффициент в диапазоне от 0.0 до 1.0 (чем больше, тем сильнее фильтрация)

При $K=0.0$ — исключается фильтрация, $Y_F = X$

При $K=1.0$ — исключается исходное значение X , $Y_F = Y_F^{-1}$

Обычно, фильтрация оцифрованного аналогового сигнала выполняется перед его масштабированием (т. е. сразу после АЦП).



СИГНАЛЫ

ДАТЧИК

Датчик (sensor) — простейшее устройство, измеряющее некоторые физические качества среды (температура, влажность, давление, свет и пр.).

Датчик конструктивно состоит из двух компонентов:

- Первичный элемент (пассивный чувствительный элемент)
- Вторичный элемент (активный нормирующий преобразователь)

ДАТЧИК: ПАССИВНЫЙ / ПЕРВИЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Пассивный (первичный) элемент представляет собой чувствительный элемент (например, кристалл или спай двух разнородных металлов), который воспринимает сигнал от какого-то физического процесса и преобразует его в эквивалентный аналоговый электрический сигнал.

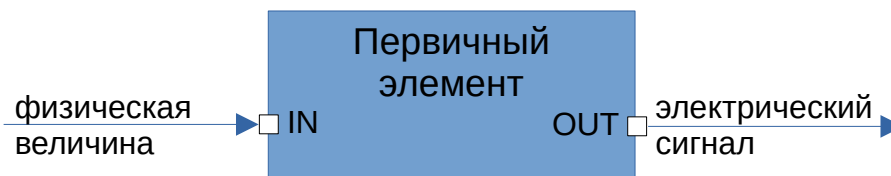
Первичный элемент является источником тока (сам генерирует электрический ток определенного номинала) и, поэтому, не требует дополнительного внешнего питания (отсюда и название — пассивный — не требующий питания).

Выходной аналоговый электрический сигнал первичного элемента — **неунифицированный**, что накладывает дополнительные требования:

- Принимающая сторона (канал ввода) должен иметь нормирующий преобразователь (активный вторичный элемент), который будет унифицировать сигнал.
- Кабельная линия для передачи сигнала должна быть определенного типа, длины и защищена от влияния помех.

Пример пассивного / первичного элемента:

- Термосопротивление — воспринимает температуру и генерирует эквивалентный электрический сигнал в виде изменения сопротивления.
- Термопара — воспринимает температуру и генерирует эквивалентный электрический сигнал в виде напряжения (милливольты).
- Тензодатчик — воспринимает весовую нагрузку и генерирует эквивалентный электрический сигнал в виде напряжения (милливольты).
- И т.д.



термосопротивление



тензодатчик

СИГНАЛЫ

ДАТЧИК: АКТИВНЫЙ / ВТОРИЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

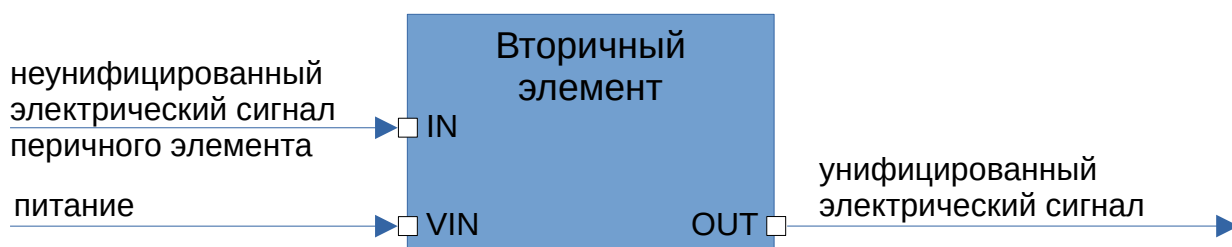
Активный (вторичный) элемент представляет собой электронную схему, которая принимает неунифицированный аналоговый электронный сигнал от пассивного первичного элемента и преобразует его в унифицированный аналоговый.

Вторичный элемент требует внешнего питания — обычно 24 В постоянного тока (отсюда и название — активный).

Вторичный элемент конструктивно может быть представлен в следующем виде:

- Отдельное самостоятельное устройство (**нормирующий преобразователь**)
- Непосредственно в составе какого-то датчика.

Нормирующий преобразователь как отдельное самостоятельное устройство выпускается для определенного типа чувствительного элемента и с определенным выходным сигналом. Например, нормирующий преобразователь 4-20 мА для термосопротивления с чувствительным элементом типа Pt100, который может быть установлен отдельно или непосредственно в головной части датчика термосопротивления. При данном исполнении, в случае неисправности, первичный и вторичный элементы могут заменяться независимо друг от друга.



нормирующий преобразователь 4-20 мА
для термосопротивления Pt100



нормирующий преобразователь
4-20 мА, встроенный в датчик
термосопротивления

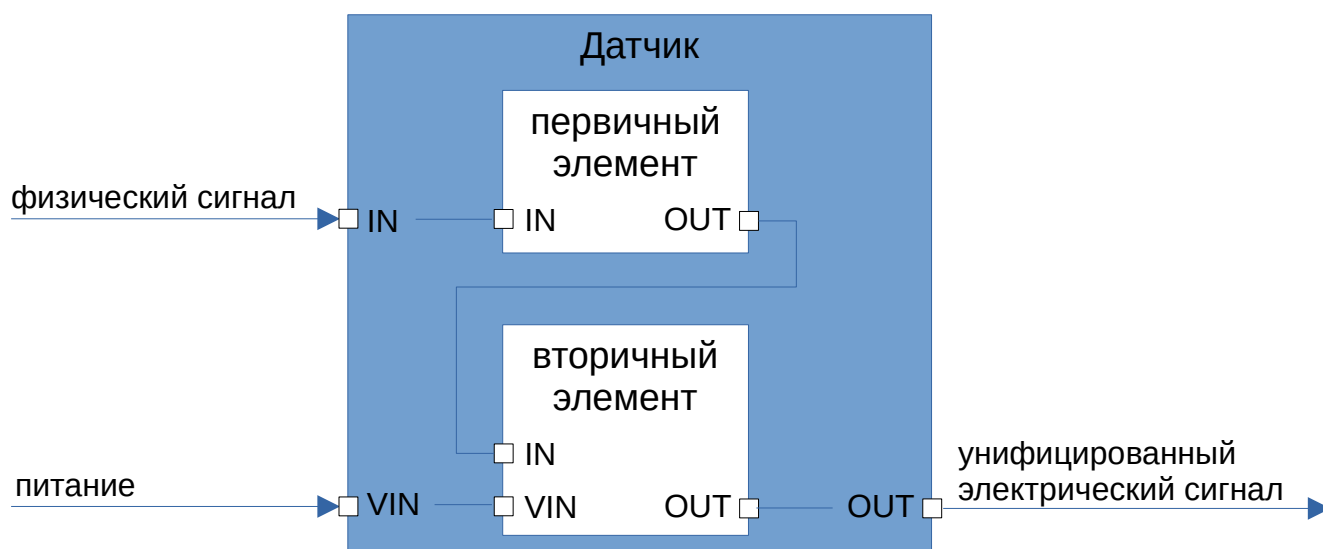


внешний нормирующий
преобразователь 4-20 мА

СИГНАЛЫ

ДАТЧИК: АКТИВНЫЙ / ВТОРИЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ (продолжение)

Нормирующий преобразователь в составе датчика представляет собой: пассивный и вторичный элемент — единое устройство (в одном корпусе). Например, датчик давления, датчик разрежения, уровнемер мембранный, плотномер, датчик влажности, рН-метр, расходомер, газоанализатор). При данном исполнении, в случае неисправности, заменяется весь датчик в целом.



*преобразователь давления с
выходным сигналом 4-20 мА*



*преобразователь влажности и
температуры с двумя выходами
4-20 мА*

СИГНАЛЫ

ДАТЧИК: ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ

Интеллектуальный датчик — это датчик, конструктивно включающий в себя:

- пассивный первичный чувствительный элемент
- активный вторичный нормирующий преобразователь
- сетевой интерфейс с поддержкой промышленного протокола передачи данных
- ЖК-экран
- кнопки или сенсорная клавиатура (могут отсутствовать)

Интеллектуальные датчики могут быть многопараметрическими — рабочий диапазон измерения задается в настройках.

Универсальные аналоговые выходы:

- один или несколько (настраиваемые индивидуально)
- один тип выходного сигнала или универсальный (тип задается в настройках)

Сетевой интерфейс с поддержкой промышленного протокола передачи данных: один или несколько (настраиваемые индивидуально)

- RS-485 / MODBUS RTU
- ETHERNET / MODBUS TCP
- PROFIBUS
- PROFINET
- USB (для настройки по месту)

ЖК-экран с кнопками или сенсорной клавиатурой:

- Многофункциональный многострочный ЖК-индикатор с подсветкой с отображением как текстово-числовой информации, так и для вывода символьной графики.
- Экран предоставляет всю необходимую информацию оператору непосредственно по месту установки датчика (в «поле»): измеренные величины, настройки.
- Кнопки или сенсорная клавиатура позволяет оператору выполнять настройку, калибровку, установку нуля прибора — непосредственно по месту установки датчика (в «поле»).



интеллектуальный датчик давления



интеллектуальный расходомер