



НАО “Карагандинский технический университет им.Абылкаса Сагинова”

Кафедра АПП им. проф. Бырьки В. Ф.



Дисциплина: “Интеллектуальные средства сбора информации”

**для студентов образовательной программы 6B07102»
– Встроенные цифровые системы управления**

Раздел №1

Тема: “Сенсорные системы, основы и принципы действия сенсоров”

Цель: ознакомиться с основами сенсорных систем и изучить физические принципы преобразования измеряемых величин в сигналы.

**Лектор: ст. преп. каф. АПП
Лисицын Дмитрий Владимирович**



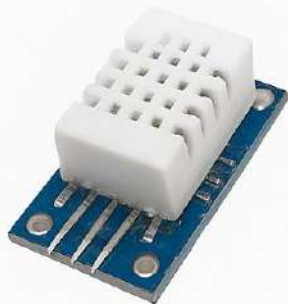
План

1. Сенсорная система, эволюция систем, архитектура интеллектуальной сенсорные системы, основные функции
2. Основные принципы сенсорики. Классификация по принципу действия.
3. Активные и пассивные датчики
4. Аналоговые сигналы и шумы, калибровка и точность.
5. Аналого-цифровые преобразователи, их назначение, описание и характеристики

Понятие сенсорной системы, эволюция сенсорных систем

Сенсорные системы — это совокупность устройств, обеспечивающих сбор, обработку и передачу информации о физических параметрах среды. Развитие таких систем прошло путь от простых аналоговых датчиков до интеллектуальных сенсоров, обладающих встроенной обработкой данных.

Примерная эволюция сенсорных систем представлена ниже:



**АНАЛОГОВЫЕ
СЕНСОРЫ**



**ЦИФРОВЫЕ
СЕНСОРЫ**



**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ
СЕНСОРЫ**



ИСС

Эволюция сенсорных систем

1. Традиционные (аналоговые) сенсоры

Период: до 1980-х годов

Характеристика: простые датчики, формирующие аналоговый сигнал (напряжение, ток, сопротивление).

Особенности:

- требуют внешних схем для усиления и обработки;
- чувствительны к шумам и помехам;
- нет встроенного «интеллекта».

Примеры: термопары, тензодатчики, потенциометрические датчики положения.

2. Цифровые сенсоры

Период: 1980–2000-е годы

Характеристика: интеграция аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и цифрового интерфейса (I²C, SPI).

Особенности:

- улучшенная точность и стабильность;
- возможность прямого подключения к микроконтроллерам;
- минимизация внешней электроники.

Примеры: цифровые датчики температуры (DS18B20), давления (BMP180).

Эволюция сенсорных систем

3. Интеллектуальные сенсоры

Период: с 2000-х годов

Характеристика: наличие встроенного микроконтроллера или процессора.

Особенности:

- локальная обработка и фильтрация данных;
- калибровка, самодиагностика;
- возможность обмена данными по стандартным цифровым протоколам.

Примеры: BME280, MPU6050, сенсоры с встроенным DSP.

4. Интеллектуальные сенсорные системы (Smart Sensor Systems)

Период: с 2010-х годов по настоящее время

Характеристика: сенсоры объединяются в распределённые сети и взаимодействуют с облачными и управляющими системами.

Особенности:

- встроенные алгоритмы машинного обучения и прогнозирования;
- адаптация к условиям среды;
- взаимодействие с IoT-платформами и киберфизическими системами.

Примеры: сенсорные узлы на базе ESP32, промышленные сенсоры с поддержкой MQTT, OPC UA.

Эволюция сенсорных систем

5. Будущее поколение — когнитивные сенсоры

Период: формируется (2020-е и далее)

Характеристика: сенсоры с элементами искусственного интеллекта и самообучения.

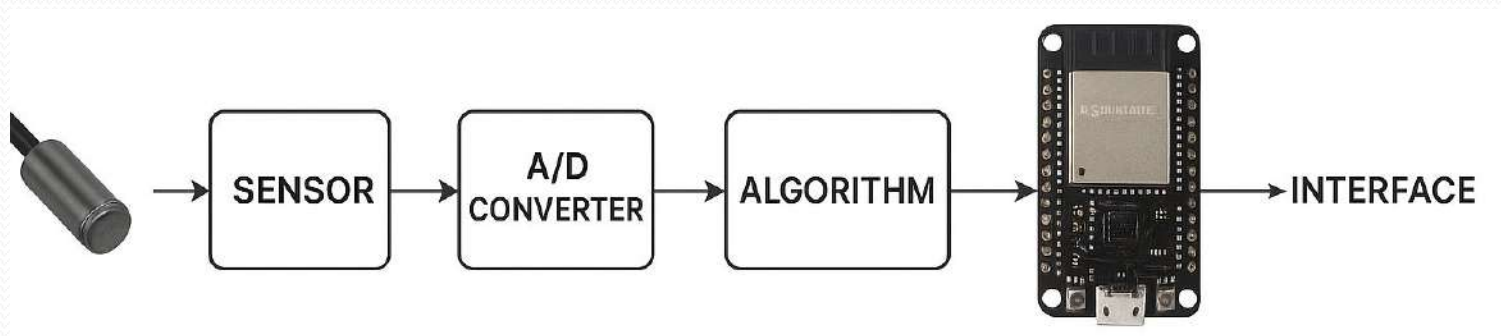
Особенности:

- автономное принятие решений;
- распределённое обучение (edge AI);
- минимальная передача «сырых» данных — только значимая информация.

Примеры: сенсоры на нейроморфных чипах, интегрированные в системы предиктивного обслуживания.



Архитектура интеллектуальной сенсорной системы



Интеллектуальный сенсор включает в себя чувствительный элемент, аналого-цифровой преобразователь, микроконтроллер и интерфейсы связи. Он способен не только измерять параметры, но и анализировать данные, выполнять фильтрацию, коррекцию и самокалибровку.

В распределённых ИСС данные могут собираться от множества сенсоров и передаваться в общий вычислительный узел.

Интеллектуальные сенсорные системы применяют цифровые фильтры и методы машинного обучения для повышения точности измерений. Часто используется слияние данных (sensor fusion), позволяющее объединять сигналы от разных сенсоров для получения более надёжной информации.

Основные функции интеллектуальных сенсорных систем

1. Измерение параметров среды — получение данных о физических, химических или биологических величинах (температура, давление, вибрация и т.д.).

2. Предварительная обработка данных — фильтрация, нормализация, компенсация помех и калибровка сигналов.

3. Самодиагностика и самокалибровка — контроль исправности сенсора, автоматическая корректировка чувствительности и нулевых уровней.

3. Анализ и интерпретация данных — использование встроенных алгоритмов (в том числе ИИ) для выявления закономерностей и аномалий.

4. Принятие решений на локальном уровне — выполнение простых управляющих действий без участия внешнего контроллера.

5. Обмен данными — передача информации по проводным или беспроводным каналам (Wi-Fi, BLE, ZigBee, LoRa и др.).

6. Интеграция с системами управления и IoT-платформами — работа в составе распределённых сетей и «умных» производственных систем.

Принципы сенсорики

Сенсорика — это область науки и техники, изучающая принципы измерения физических, химических и биологических параметров, их преобразование в электрические сигналы и передачу информации для последующей обработки.

Цель сенсорики — **получение достоверной информации о состоянии объекта, среды или процесса** в форме, пригодной для цифровой обработки.



Принципы сенсорики

Основные принципы сенсорики следующие:

1. Принцип физического преобразования

Каждый сенсор основан на **физическом эффекте**, связывающем измеряемую величину с изменением электрических параметров:

- пьезоэлектрический эффект (давление → напряжение),
- термоэлектрический эффект (температура → ЭДС),
- фотоэффект (свет → ток),
- магниторезистивный эффект (магнитное поле → сопротивление),
- емкостный, индуктивный, оптический и др.

2. Принцип преобразования сигнала

Измеряемая величина (неэлектрическая) → преобразуется в **электрический сигнал**.

Преобразование может быть:

- **аналоговым** — непрерывный сигнал (напряжение, ток),
- **цифровым** — дискретное представление данных.

3. Принцип селективности

Сенсор должен быть **чувствителен только к нужной величине**, минимизируя влияние посторонних факторов (температуры, вибрации, помех).

Принципы сенсорики

4. Принцип чувствительности

Определяет, насколько сильно изменяется выходной сигнал при изменении измеряемого параметра.

Высокая чувствительность позволяет фиксировать слабые изменения среды.

5. Принцип стабильности и повторяемости

Результаты измерений должны быть **устойчивыми во времени** и повторяться при одинаковых условиях.

6. Принцип интеллектуализации

Современные сенсоры включают встроенные микроконтроллеры и алгоритмы для:

- самокалибровки,
- фильтрации шумов,
- компенсации температурных и нелинейных эффектов,
- диагностики неисправностей.

Классификация по принципу действия

Тип сенсора

Принцип работы

Пример

Механический

Деформация →
изменение
сопротивления

Тензодатчик



Термический

Температура → ЭДС
или сопротивление

Термопара,
терморезистор



Оптический

Интенсивность света →
ток / напряжение

Фотоэлемент, фотодиод



Магнитный

Изменение магнитного
поля → электрический
сигнал

Холловский датчик



Химический

Концентрация
вещества → изменение
потенциала

Газоанализатор



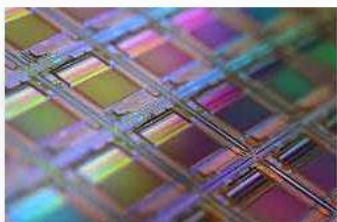
Биосенсор

Биореакция →
электрический отклик

Глюкометр



Современные принципы развития сенсорики



Интеграция и миниатюризация

МЭМС и микросистемы - компактность, низкое энергопотребление



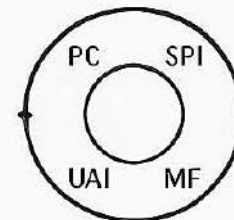
Интеллектуализация

AI - сенсоры: обработка и самокалибровка на месте



Мультисенсорность и когнитивность

Объединение разных типов сенсоров, обучение по аналогии с биосистемами



Стандартизация

Совместимость, модульность, IEEE 1451



Сетевое взаимодействие (IoT)

Объединение сенсоров в распределенные сети



Энергоэффективность

Автономность и энергоэффективность



Кибербезопасность

Безопасная передача и защита сенсорных сетей

Активные и пассивные датчики

Датчик — это элемент системы измерения, преобразующий физическую величину (температуру, давление, свет, движение и т.д.) в сигнал, удобный для дальнейшей обработки (аналоговый или цифровой).

Одним из ключевых признаков классификации датчиков является **принцип их работы — активный или пассивный.**

Пассивные датчики не создают собственного энергетического сигнала, а только изменяют свои параметры (сопротивление, ёмкость, индуктивность и т.п.) под действием измеряемой величины.

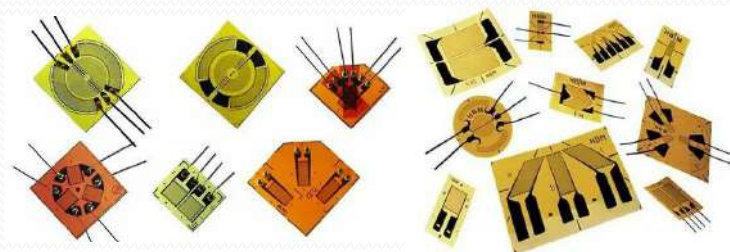
Для их работы необходим **внешний источник питания или возбуждения.**

Примеры:

Терморезисторы (RTD, NTC) — сопротивление изменяется при изменении температуры.



Тензорезисторы — сопротивление изменяется при деформации.



Активные и пассивные датчики

Датчик — это элемент системы измерения, преобразующий физическую величину (температуру, давление, свет, движение и т.д.) в сигнал, удобный для дальнейшей обработки (аналоговый или цифровой).

Одним из ключевых признаков классификации датчиков является **принцип их работы — активный или пассивный.**

Пассивные датчики не создают собственного энергетического сигнала, а только изменяют свои параметры (сопротивление, ёмкость, индуктивность и т.п.) под действием измеряемой величины.

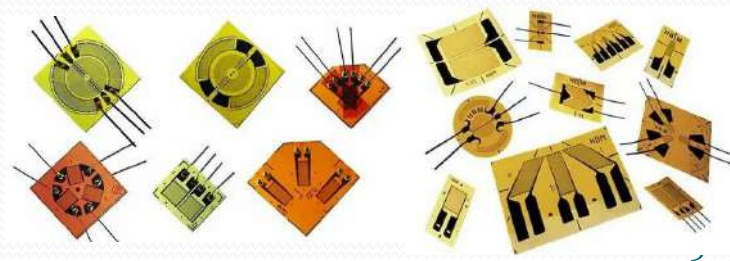
Для их работы необходим **внешний источник питания или возбуждения.**

Примеры:

Терморезисторы (RTD, NTC) — сопротивление изменяется при изменении температуры.



Тензорезисторы — сопротивление изменяется при деформации.



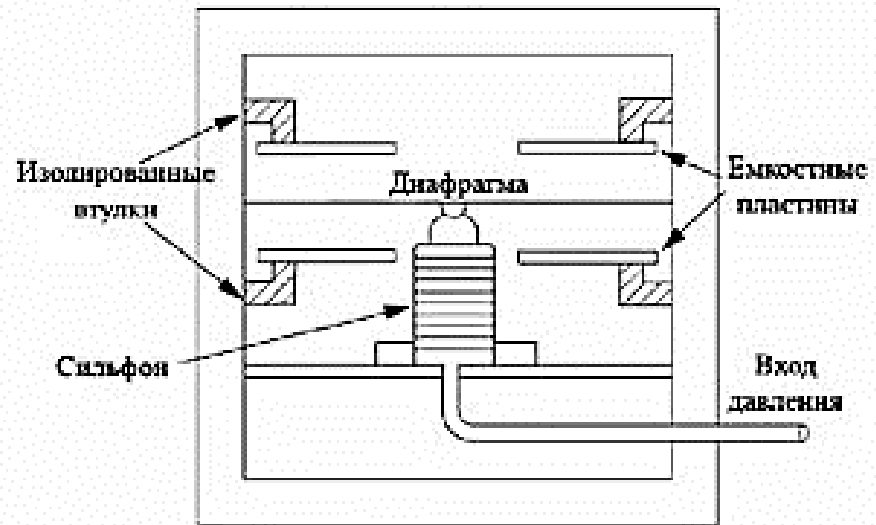
Активные и пассивные датчики

Примеры:

Фотосопротивления (LDR) — изменение сопротивления при освещении.



Ёмкостные датчики — изменение ёмкости при изменении зазора или диэлектрической проницаемости.



Преимущества ПД:

- Простота конструкции
- Высокая надёжность
- Долговечность
- Низкое энергопотребление

Недостатки ПД:

- Необходим внешний источник питания
- Сравнительно низкая чувствительность
- Зависимость от условий среды



Активные и пассивные датчики

Активные датчики генерируют выходной сигнал самостоятельно — преобразуют энергию физического процесса в электрическую без внешнего источника.

Примеры АД:

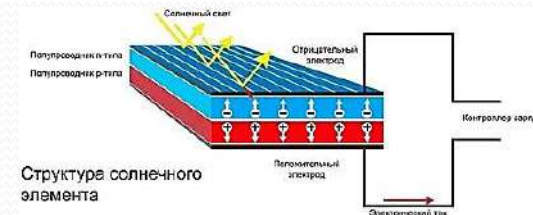
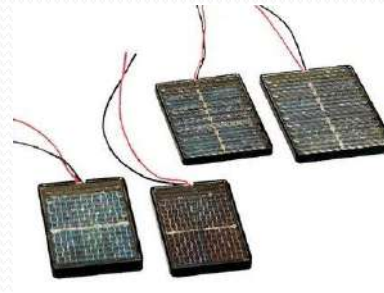
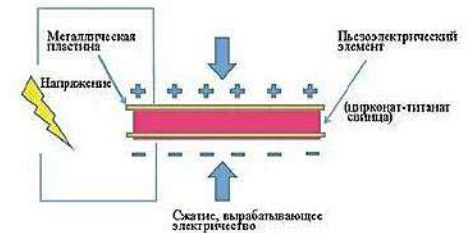
Термопары — создают ЭДС при разности температур.

Пьезоэлектрические датчики — вырабатывают заряд при механическом воздействии.

Фотоэлектрические элементы (солнечные элементы) — генерируют ток при освещении.



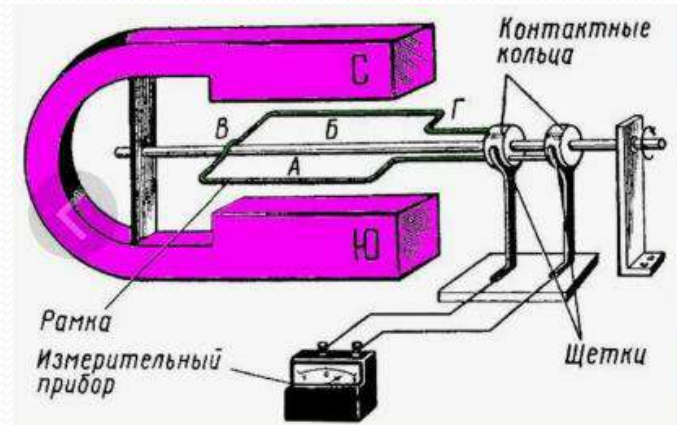
Прямой пьезоэлектрический эффект



Активные и пассивные датчики

Примеры АД:

Электромагнитные индукционные датчики — создают ЭДС при изменении магнитного потока.



Согласно закону Фарадея, в замкнутом проводящем контуре возникает электродвижущая сила (ЭДС), которая пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур. Это означает, что чем быстрее изменяется магнитное поле, тем больше создается ЭДС и индуцируемый ток.

Преимущества:

- Не требуют внешнего питания
- Высокая чувствительность
- Возможность автономной работы

Недостатки:

- Малая мощность сигнала
- Необходимость усиления
- Зависимость от частоты и внешних факторов

Активные и пассивные датчики

В современных интеллектуальных сенсорных узлах часто используются **гибридные схемы**, где:

- пассивные элементы обеспечивают **высокую точность** измерения,
- активные — **автономность и быструю реакцию**.

Пример:

Сенсорный узел с терморезистором (пассивный) и микроконтроллером с АЦП, работающим от энергии солнца или вибрации (активный компонент).

Понимание различий между активными и пассивными датчиками важно при проектировании **встроенных интеллектуальных систем сбора информации**, где баланс между **энергоэффективностью, точностью и автономностью** определяет эффективность всей системы.

Аналоговые сигналы, шумы, калибровка и точность

Современные интеллектуальные сенсорные системы обеспечивают измерение, обработку и передачу информации о состоянии объектов и процессов. Немаловажную роль в таких системах составляют **аналоговые сигналы**, которые содержат информацию о физических величинах, и процедуры **калибровки**, обеспечивающие точность измерений.

Аналоговый сигнал — это непрерывная функция времени, описывающая изменение физической величины (напряжение, ток, температура, давление и др.).

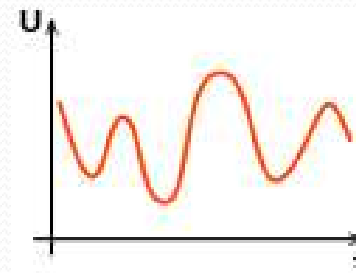
Примеры:

- напряжение на выходе термопары,
- ток, создаваемый фотодиодом,
- сопротивление тензодатчика.

Основные параметры аналогового сигнала:

- амплитуда (A) — максимальное значение сигнала.
- частота (f) — количество изменений сигнала в единицу времени.
- фаза (φ) — начальное смещение сигнала по времени.
- диапазон — отношение максимального и минимального значений.

- **полоса пропускания** — диапазон частот, в котором сигнал передаётся без существенных искажений.



Шумы аналоговых сигналов

Шум — это случайная составляющая сигнала, не несущая полезной информации, но влияющая на точность измерения.

Рассмотрим источники шумов:

- **тепловой (Джонсоновский) шум** — из-за хаотического движения электронов в проводнике.
- **шот-шум** — результат дискретности электрического заряда.
- **фликкер-шум ($1/f$ -шум)** — шум, проявляющийся на низких частотах.
- **электромагнитные наводки** — из-за внешних источников (сети питания, радиопередатчики).
- **шум квантование** — появляется при переходе от аналогового сигнала к цифровому.

Для борьбы с шумами или снижения их негативного влияния использую следующие методы:

- экранирование и заземление.
- фильтры (низких, высоких частот, полосовые).
- усреднение сигналов.
- цифровая обработка (Фурье-анализ, адаптивные фильтры).
- использование прецизионных компонентов.

Калибровка измерительных систем

Калибровка — это процесс определения и коррекции погрешностей измерительного устройства путём сравнения его показаний с эталонными значениями. Калибровка играет ключевую роль в обеспечении **точности, стабильности и доверия к измерительным данным.**

Цели калибровки:

1. Обеспечение точности измерений

Калибровка устраняет систематические ошибки, возникающие из-за особенностей сенсора, старения элементов или влияния внешней среды

Например, корректировка показаний термопары в зависимости от эталонного источника температуры.

2. Согласование характеристик разных сенсоров

Когда в системе используются несколько датчиков разного типа, их необходимо согласовать, чтобы данные были сопоставимы.

Например: одинаковая реакция всех датчиков влажности в одной климатической установке.

Калибровка измерительных систем

3. Компенсация дрейфа и старения

Со временем параметры чувствительных элементов изменяются. Регулярная калибровка позволяет компенсировать этот дрейф и сохранять стабильность.

Например, подстройка коэффициентов усиления в усилителях термопары через каждые 6 месяцев эксплуатации.

4. Повышение достоверности данных для систем управления

Системы автоматического управления принимают решения на основе данных сенсоров. Калибровка снижает риск ошибок, ложных срабатываний и аварий.

Например, в системах управления компрессорами откалиброванные датчики давления предотвращают ложное срабатывание аварийной защиты.

5. Формирование эталонных моделей и самокалибровки

В интеллектуальных сенсорных узлах калибровка часто проводится автоматически с использованием алгоритмов машинного обучения.

Например: микроконтроллер сравнивает текущие данные с эталонной моделью и корректирует коэффициенты чувствительности.

Калибровка измерительных систем

6. Соответствие стандартам и метрологическим требованиям

Для промышленных и сертифицированных измерений требуется подтверждение соответствия точности нормативам (ISO, ГОСТ и т.д.)

Например: ежегодная поверка датчиков давления в системах безопасности.

Частота калибровки определяется:

- стабильностью датчика,
- условиями эксплуатации,
- требованиями метрологических стандартов.

ЦЕЛИ КАЛИБРОВКИ



Точность измерений

Основные понятия

Точность измерения — степень соответствия результата измерения истинному значению.

Погрешность (Δ) = измеренное значение – истинное значение.

Систематическая погрешность — постоянное отклонение (устраняется калибровкой).

Случайная погрешность — изменяется случайно (уменьшается усреднением).

Влияние точности на сенсорные системы

Точность измерений определяет:

- достоверность данных;
- эффективность управления;
- надёжность интеллектуальных решений.

Интеллектуальные функции коррекции

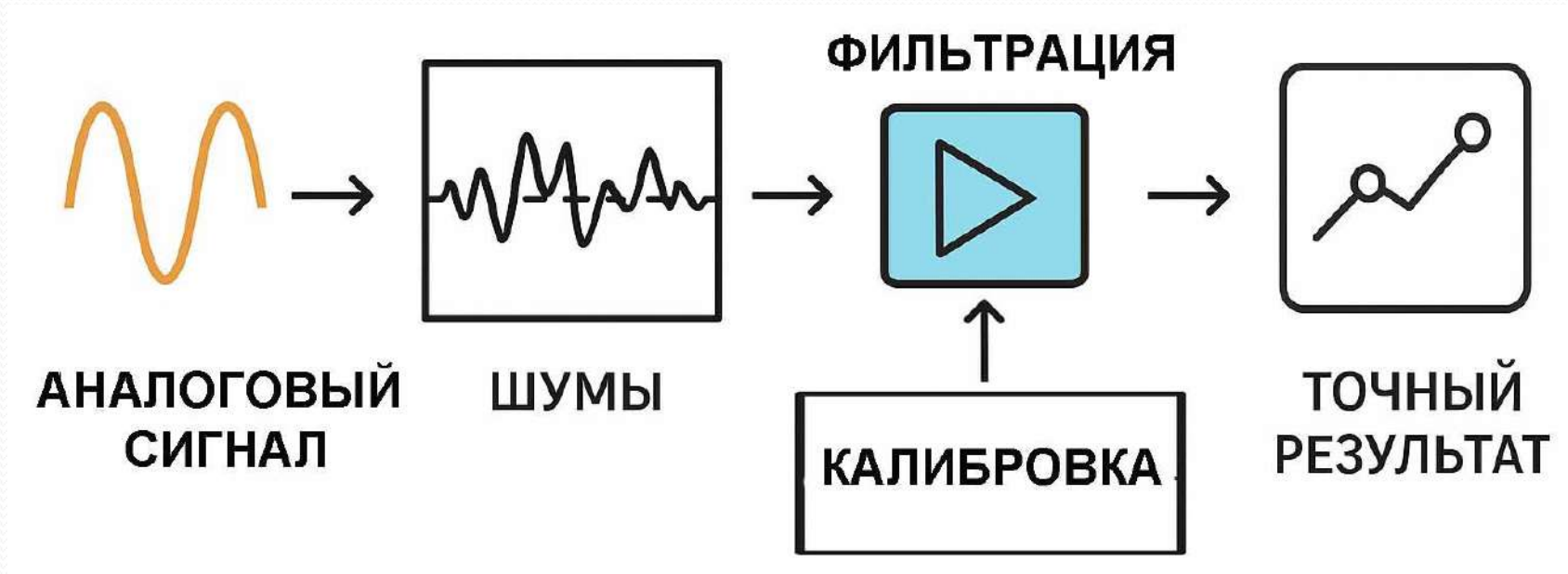
Современные сенсорные узлы включают:

- автоматическую коррекцию дрейфа нуля и коэффициента усиления;
- температурную компенсацию;
- онлайн-калибровку с использованием нормированных эталонов;
- программное обеспечение для самообучения и адаптации.

Точность измерений

Эффективность интеллектуальных систем сбора информации определяется качеством аналоговых сигналов, уровнем шумоподавления и точностью калибровки.

Современные сенсоры стремятся объединить **высокую чувствительность аналоговой части** и **точность цифровой обработки**, формируя основу для автономных измерительных сетей и Интернета вещей (IoT).



Аналого-цифровое преобразование

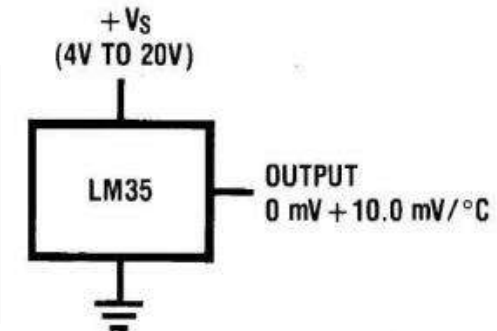
В интеллектуальных системах сбора информации большинство сенсоров выдают **аналоговые сигналы** — напряжение, ток или частоту, пропорциональные измеряемой физической величине. Чтобы эти данные можно было **обрабатывать микропроцессорами**, сигнал необходимо перевести в цифровую форму — это выполняет **аналогово-цифровое преобразование (АЦП)**.

Назначение АЦП:

- АЦП преобразует **непрерывный аналоговый сигнал** в **дискретный цифровой код**.
- обеспечивает **взаимодействие физического мира** (датчики) с **цифровыми вычислительными системами**.
- определяет **точность, скорость и качество** измерений во всей сенсорной системе.

Пример

Датчик температуры LM35 выдаёт 10 мВ/°С. АЦП микроконтроллера преобразует это напряжение в 10-битное цифровое значение, которое затем используется для анализа (1024 уровней).



Аналого-цифровое преобразование

Основные этапы аналого-цифрового преобразования:

- 1. Снятие аналогового сигнала с датчика.**
- 2. Фильтрация и усиление** — подавление шумов и приведение уровня к диапазону АЦП.
- 3. Дискретизация** — измерение сигнала через равные интервалы времени.
- 4. Квантование** — приближение к ближайшему уровню шкалы.
- 5. Кодирование** — преобразование в цифровое представление (обычно двоичный код).

Разрядность (битность) АЦП — это число двоичных разрядов, используемых для представления результата преобразования.

Количество уровней квантования : $N = 2^n$, где n — число бит.

Разрядность	Уровней	Пример точности (для диапазона 0–5 В)
8 бит	256	19,5 мВ/разряд
10 бит	1024	4,9 мВ/разряд
12 бит	4096	1,22 мВ/разряд
16 бит	65 536	76 μВ/разряд

Чем выше разрядность, тем выше точность, но дольше время преобразования и выше энергопотребление.

Аналого-цифровое преобразование

Частота дискретизации — количество измерений (отсчётов) аналогового сигнала в единицу времени.

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

где T_d — интервал между измерениями.

Согласно **теореме Найквиста–Шеннона**, частота дискретизации должна быть не менее **удвоенной частоты сигнала**, чтобы избежать искажений:

$$f_d \geq 2f_{max}$$

Пример:

Если измеряется звуковой сигнал до 20 кГц → частота дискретизации должна быть не менее 40 кГц (в аудиосистемах обычно 44,1 или 48 кГц).

Погрешности АЦП:

- **ошибка квантования** ($\pm 0,5$ LSB)
- **систематические погрешности** — смещение нуля, ошибка коэффициента усиления
- **шум и дрейф** — флуктуации сигнала, температурная нестабильность
- **нелинейность** — отклонение характеристик преобразования

Для уменьшения ошибок применяются:

- фильтрация, усреднение, экранирование;
- цифровая коррекция и самокалибровка.

Аналого-цифровое преобразование

Существующие типы АЦП их принцип, преимущества и недостатки

Тип АЦП	Принцип	Преимущества	Недостатки	Применение
Параллельный (Flash)	Одновременное сравнение с опорными уровнями	Очень высокая скорость	Высокая стоимость, много компараторов	Осциллографы, цифровое видео
Последовательного приближения (SAR)	Поиск методом двоичного деления	Хорошее сочетание точности и скорости	Средняя стоимость	Универсальные микроконтроллеры
$\Delta\Sigma$ (дельта-сигма)	Передискретизация и цифровая фильтрация	Очень высокая точность, низкий шум	Медленный	Медленные измерения, аудио
Двойного интегрирования	Интегрирование за интервал времени	Высокая стабильность, помехоустойчивость	Низкая скорость	Мультиметры, метрология

Аналого-цифровое преобразование

Практические рекомендации:

1. Использовать **стабильное опорное напряжение**;
2. Применять **антиалиасинг-фильтр** перед АЦП.
3. Подбирать разрядность под задачу:
 - 8–10 бит — бытовые сенсоры;
 - 12–16 бит — лабораторные и промышленные системы.
4. Выбирать частоту дискретизации с запасом ($\times 3$ –4 от максимальной частоты сигнала).

Современные тенденции:

1. Интегрированные АЦП в микроконтроллерах и сенсорных системах на кристалле (SoC). Кристалл (SoC) это единый чип, который объединяет множество компонентов, таких как процессор, видеокарта, память и другие, необходимые для работы устройства, например, смартфона или умных часов..
2. Энергосберегающие архитектуры SAR и $\Delta\Sigma$.
3. Самокалибрующиеся АЦП с цифровой коррекцией погрешностей.
4. Интеллектуальные сенсорные узлы, где АЦП встроен в структуру датчика.

Этапы аналого-цифрового преобразования

