

سنسورها، ترانسدیوسرها و ترانسمیترها

Sensors, Transducers & Transmitters

1

مهرداد بابازاده
گروه کنترل
دانشگاه زنجان

فهرست مطالب

1. تعاریف

- مقدمه- یک سیستم کنترل اتوماسیون صنعتی
- سنسور، ترانسدیوسر (مبدل)، ترانسمیتر

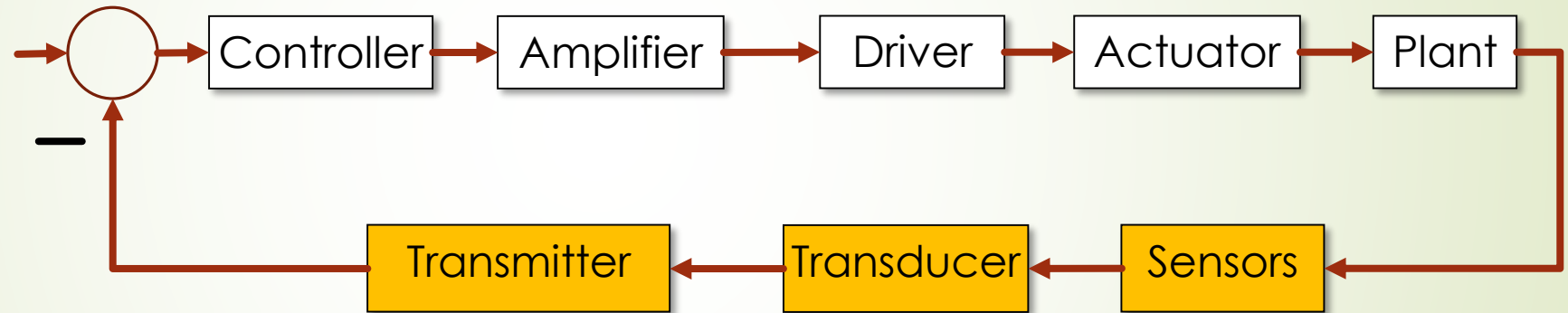
2. ویژگیهای مهم سنسورها

- رنج، اسپن، صفر اندازه گیری، انحراف صفر (Zero drift)، حساسیت، حد تفکیک (Resolution)، پاسخ دهی، خطی بودن، هیستریزیس، دقت، تکرار پذیری (Repeatability)، آمادگی برای اندازه گیری بعدی (Reproducibility)

3. مشخصات استاتیکی و دینامیکی سنسورها

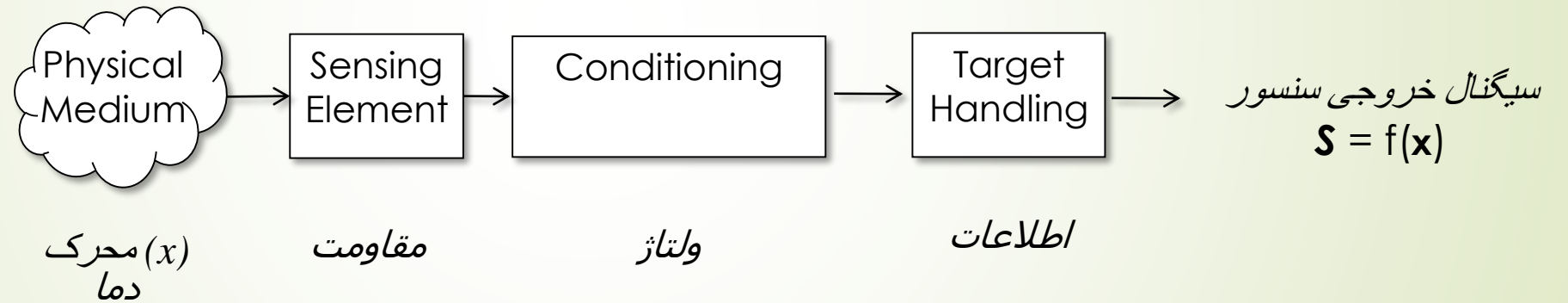
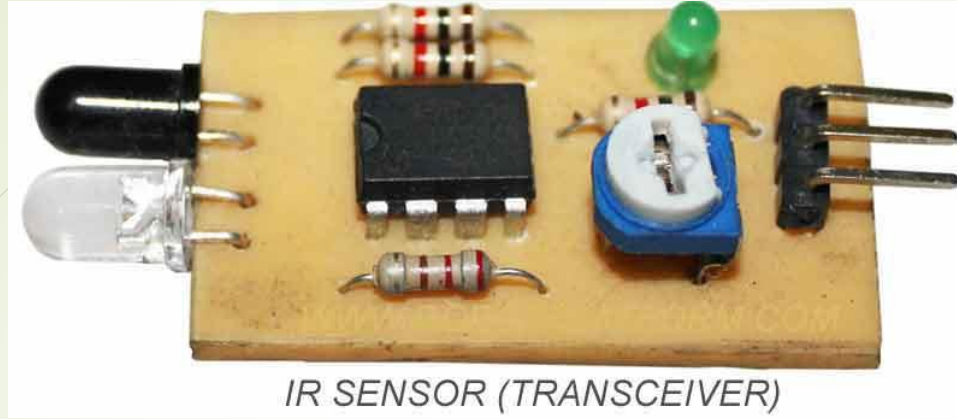
4. برخی از سنسورهای اندازه گیری پارامترهای محیطی

مقدمه - یک سیستم کنترل اتوماسیون صنعتی



تعریف و مقایسه سنسور و ترانسدیوسر

- سنسور: المان، ماژول یا سیستمی است که برای تشخیص اتفاق یا تغییر وضعیتی در محیطش استفاده می شود و اطلاعات را به بخش های الکترونیکی دیگر ارسال مینماید.
- ترانسدیوسر المانی است که برای تبدیل انرژی از یک فرم به فرم دیگر استفاده می شود. سیگنالی را از یک فرم انرژی به فرم دیگر تبدیل می کند. این المان ها معمولا در مرز اتوماسیون، اندازه گیری و سیستم های کنترل استفاده می شوند جایی که سیگنال های الکتریکی مربوط به گشتاور، نور، حرکت، موقعیت و غیره تبدیل می شوند. این تبدیل Transduction نامیده می شود.



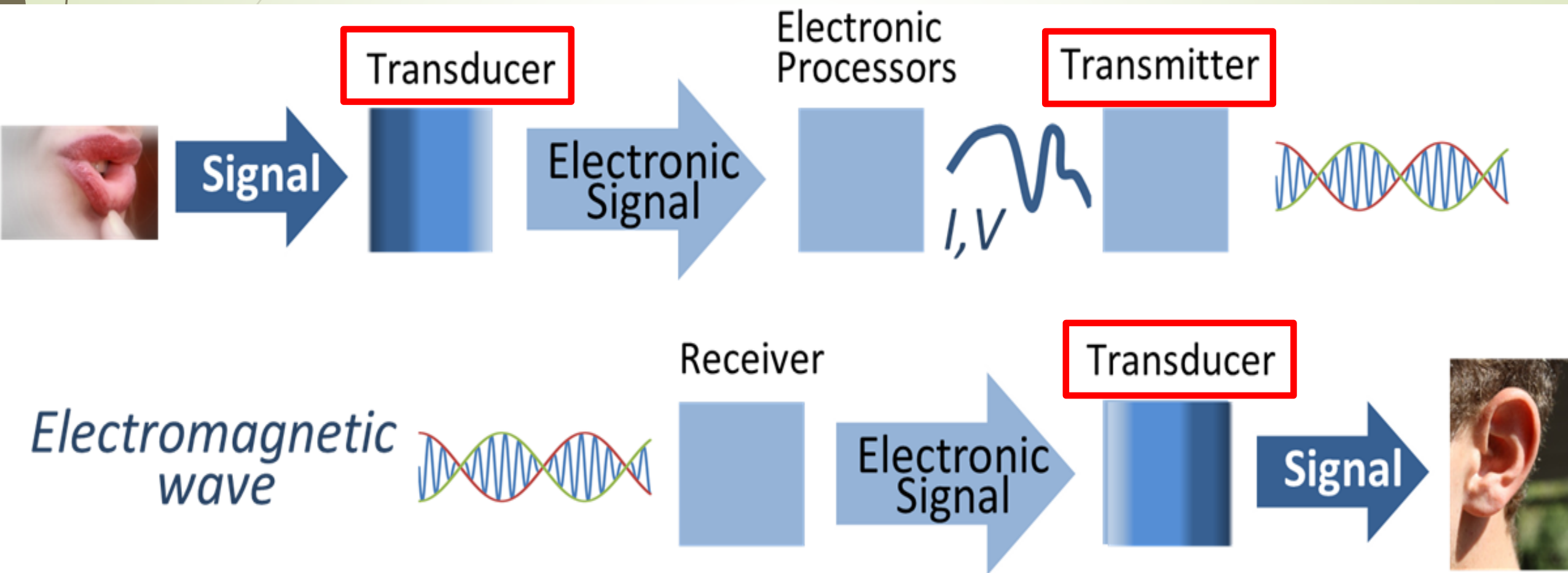
برای سنسورهای باینری: $S = 1$ if $x > 0$
 $S = 0$ if $x \leq 0$.

برای سنسورهای آنالوگ: $S = c + m.x$

در واحد هاي صنعتي بزرگ كه عمليات توليد در محوطه ي گسترده اي انجام مي گيرد ادوات و دستگاه هاي كنترل و اندازه گيري بطور متمرکز در محلي به نام اتاق فرمان يا مركز كنترل قرار دارند ب. طوري كه امکان اندازه گيري و كنترل كلي متغيرها در سراسر كارخانه و محوطه آن توسط اپراتور در هر لحظه فراهم آيد. در چنين مواردی لازم است كه سيگنال ها و فرمان ها از محوطه به اتاق كنترل و بر عكس منتقل شوند. براي اين منظور از دستگاه هايي بنام ترانسميتر ها استفاده مي شود.

در حوزه مخابرات، ترانسميتر يك المان الكترونيكي است كه امواج راديويي با آنتن ايجاد ميكند تا اطلاعات را ارسال كند.

فرایند استفاده از ترانسدیوسر و ترانسمیتر



انواع سنسور:

- ❖ زمان آنالوگ
- ❖ زمان گسسته
- ✓ باینری
- ✓ دیجیتال

انواع سنسور:

- ❖ فعال (Active)
- ❖ غیر فعال (Passive)

انواع سنسور:

- ❖ تماسی (Contact)
- ❖ مجاورتی (Non-contact)

انواع سنسور:

- ❖ Absolute
- ❖ Relative

برخی از انواع سنسورها:

- Temperature
- RFID (Radio-frequency identification)
- Barcode
- Proximity (نزدیک شدن)
- Vision
- Gyroscope (گردش نما)
- Compass (قطب نما)
- Tilt/Acceleration (شتاب)
- Etc.

سنسور غیرفعال (خود تغذیه): سنسوری که تغذیه اش را خودش تولید می کند.
مثال:

Carbon microphone, thermistors, strain gauges, capacitive and inductive sensors, etc.

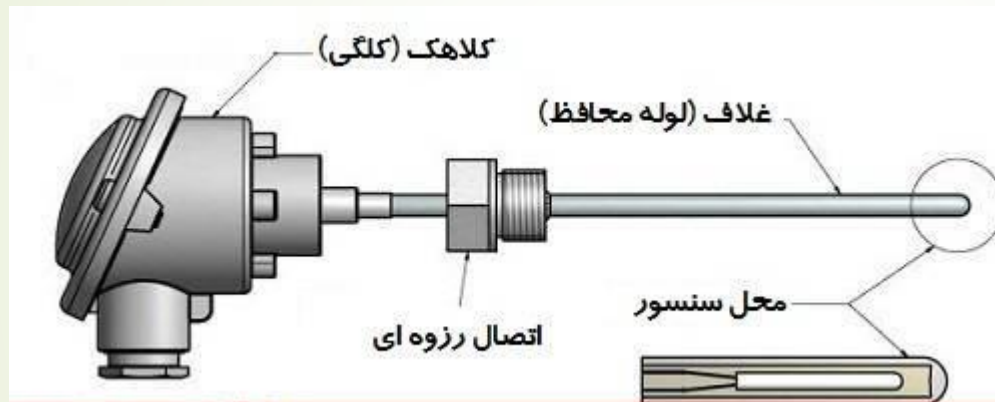
سنسور فعال (پارامتریک): سنسوری که به تغذیه خارجی نیاز دارد.
گاهی به این نوع سنسور ترانسدیوسر گفته می شود.

مثال:

thermocouples, magnetic microphones, piezoelectric sensors.

سنسور تماسی: نیاز به اتصال فیزیکی دارد. مثال:

strain gauges, most temperature sensors



سنسور مجاورتی: نیاز به اتصال فیزیکی ندارد.

مثال:

most optical and magnetic sensors, **infrared thermometers**, etc.

سنسور مطلق: به صورت مطلق سنجیده می شود.

مثال:

Thermistors, strain gauges, etc., (thermistor will always read the absolute temperature)

سنسور نسبی: نسبت به یک نقطه خاص ثابت یا متغیر سنجیده می شود.

مثال:

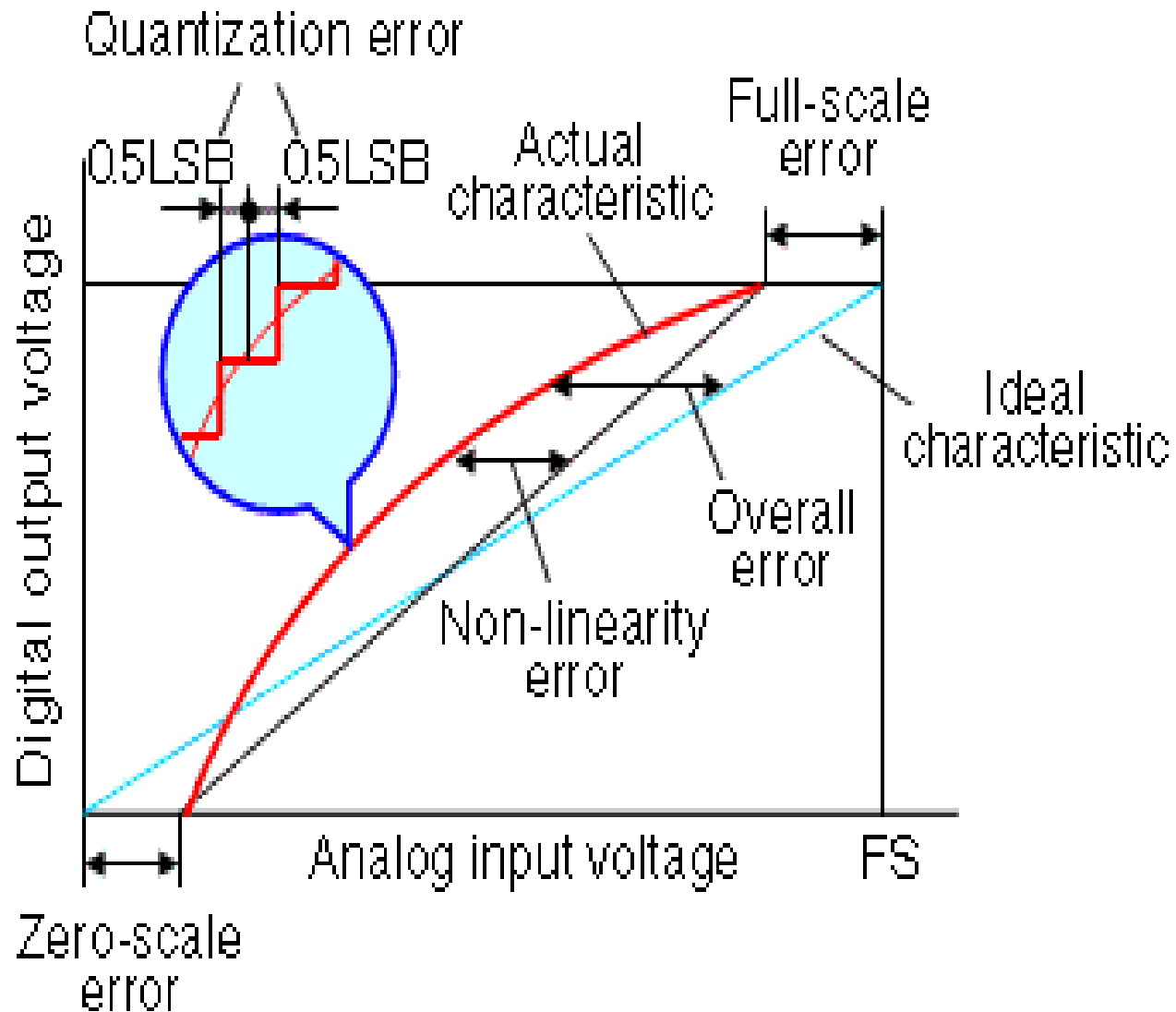
Thermocouple measures the temperature difference, pressure is often measured relative to atmospheric pressure.

Environmental Factors	Economic Factors	Sensor Characteristics
Temperature range	Cost	Sensitivity
Humidity effects	Availability	Range
Corrosion (خوردگی)	Lifetime	Stability
Size		Repeatability
Overrange protection		Linearity
Susceptibility to EM interferences		Error
Ruggedness (سختی)		Response time
Power consumption		Frequency response
Self-test capability		

▶ **صفر اندازه گیری:** نقطه مشخصی در حوزه اندازه گیری که صفر در نظر گرفته می شود. در این نقطه لزوما خروجی سنسور صفر نیست.

▶ **انحراف صفر (drift):** اندازه خروجی در نقطه صفر ممکن است جابجا شود.

▶ **حد تفکیک (Resolution):** کوچکترین اندازه تغییرات کمیت مورد نظر که بتوان توسط سنسور اندازه گرفت. رزولوشن سنسوری که خروجی دیجیتال دارد همان رزولوشن خروجی (1 LSB) است. این معیار با دقت متفاوت است گرچه به هم ربط دارند.



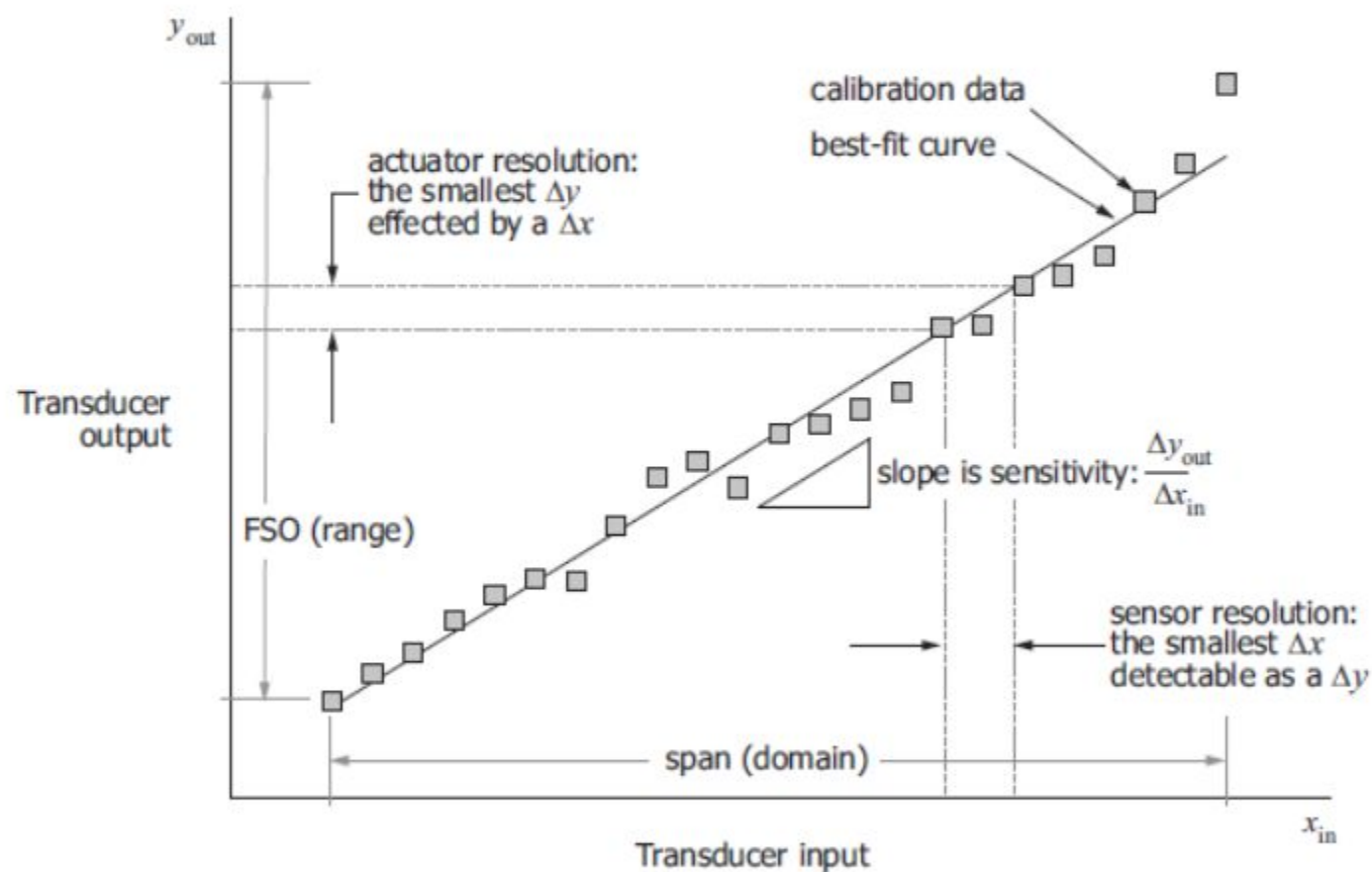
▶ **رنج:** محدوده حداقل و حداکثر پارامتر مورد اندازه گیری

▶ **اسپن (input full scale):** تفاضل ریاضی حداقل و حداکثر پارامتر مورد اندازه گیری که در محدوده اندازه گیری با خطای کم قرار دارد.

▶ **output full scale:** تفاضل ریاضی حداقل و حداکثر خروجی سنسور متناظر با اسپن ورودی.

▶ **خطی بودن:** اگر شیب ورودی-خروجی ثابت باشد سنسور خطی است. غیر خطی بودن روی دقت اثر می گذارد. حداکثر خطای منحنی غیر خطی از خطی میزان غیر خطی بودن را نشان می دهد.

Static response characteristics



Span (or full scale input)

Range of *input* values over which a transducer produces output values with acceptable accuracy

Units

Same as input. (p. ej., Pa for a pressure sensor)

Full-scale output (FSO)

Range of output values corresponding to the span.

Units

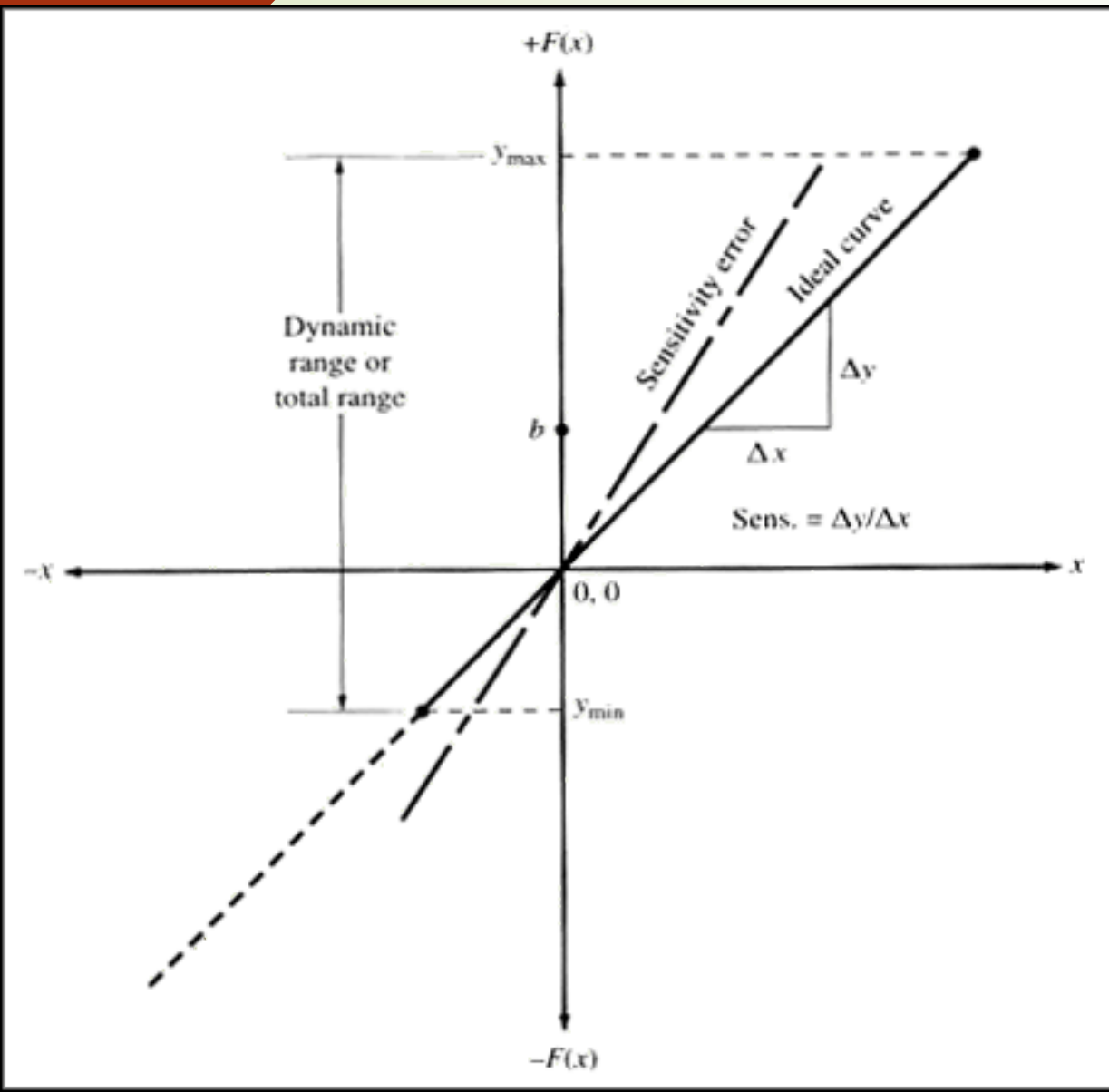
Same as output (p. ej., V for a pressure sensor)

For an actuator?

μm

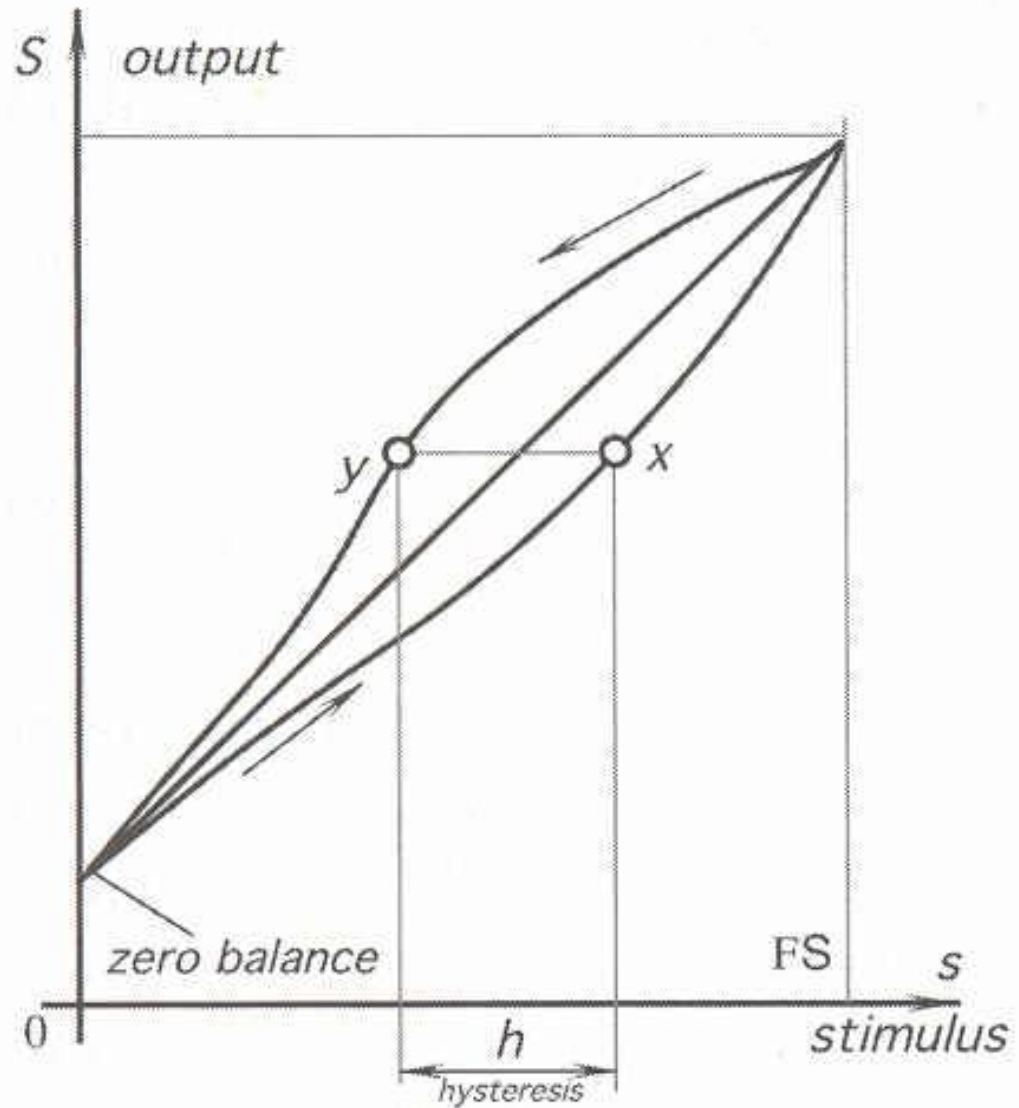
■ مثال از یک سنسور که برای اندازه گیری بین -30°C و $+80^{\circ}\text{C}$ ساخته شده است و خروجی بین 2.5V to 1.2V است.

- Range: -30°C and $+80^{\circ}\text{C}$
- Span: $80 - (-30) = 110^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Input full scale = 110°C
- Output full scale = $2.5\text{V} - 1.2\text{V} = 1.3\text{V}$



حساسیت (Sensitivity): تغییرات

خروجی به واحد تغییرات ورودی.
حساسیت شیب مشخصه عنصر اندازه گیر می باشد. اگر شیب مشخصه در حوزه اندازه گیری ثابت باشد، اندازه گیر را خطی می گوئیم.



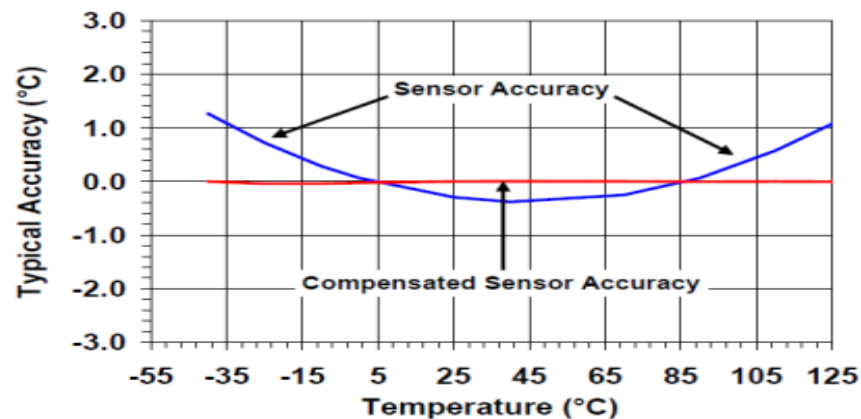
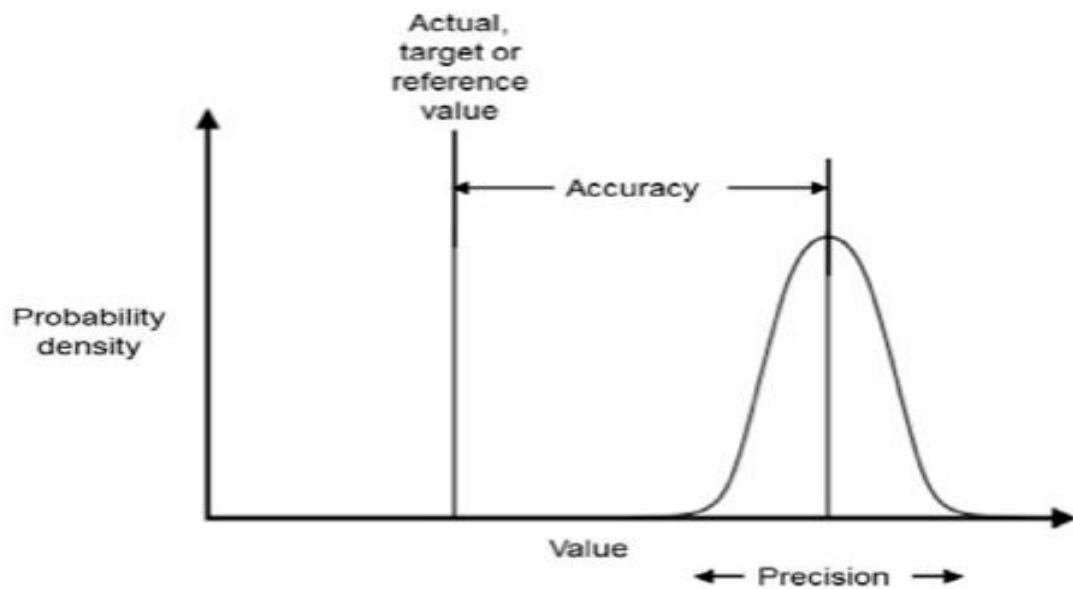
هیسترزیس: مسیر افزایش و کاهش ورودی

متفاوت است.

تکرار پذیری: خطای سنسور در نشان دادن مقدار یکسان در اندازه گیری ها در شرایط ثابت.

تولرانس:

Tolerance class	Valid range
F 0.3	-50 to +500 °C
F 0.15	-30 to +300 °C
F 0.1	0 to +150 °C



دقت (Accuracy): تطابق مقدار اندازه

گیری شده با مقدار کمیت مورد اندازه

گیری. **حداکثر اختلاف** بین مقدار واقعی

(که توسط یک سنسور ایده آل اندازه

گیری شده) با مقدار گرفته شده توسط

سنسور مورد نظر. این پارامتر می تواند

به صورت درصد full scale بیان شود یا

به صورت مطلق.

FIGURE 1: Typical Sensor Accuracy Before and After Compensation.

سنسور فشار پیزو مقاومتی (پیزورزیستیو) با قابلیت سنجش 1 مگاپاسکال

Technical performance:

Bridge resistance: $3K\Omega \sim 6K\Omega$

Power supply: constant current 1.5mA, constant voltage 10V

Operating temperature: $-45\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$

Compensation range: $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Housing and diaphragm: Stainless steel 316L

Accuracy: 0.5% FS

Zero: $\pm 2\text{mV}$

Full scale: $\geq 100\text{mV}$ (typical)

Zero drift: 0.02% FS / $^{\circ}\text{C}$

Sensitivity temperature drift: 0.02% FS / $^{\circ}\text{C}$

Insulation: $100M\Omega / 250\text{VDC}$

Sealing ring: $\phi 16 \times 1.7\text{mm}$ (NBR or fluorinated rubber)

Long term stability: 0.2% FS / year

Oil-filled: silicone oil, olive oil (hygienic)

Response time: $\leq 50\mu\text{s}$ (up to 90% FS)

Vibration: 20g / (20 ~ 5000Hz)

Durability cycle: $> 100 \times 10^6$ FS

Specifications

Specifications

Performance	
Long Term Drift	0.2% FS/YR (non-cumulative)
Accuracy	0.25% FS
Thermal Error	
31IS	±1.5% max, ±1% typical / 100°C (212°F)
32IS	±2% max
Compensated Temperatures	-20°C to +80°C (-4°F to +176°F)
Operating Temperatures	-40°C to +80°C (-40°F to +176°F)
Zero Tolerance, Max.	0.5% of span
Span Tolerance, Max.	0.5% of span
Fatigue Life	Designed for more than 100 M cycles
Mechanical Configuration	
Pressure Port	See under "How to Order," last page
Wetted Parts	17-4 PH Stainless Steel
Electrical Connection	See under "How to Order," last page
Enclosure	IP67 (IP65 for electrical codes B, R and G)
Vibration	BSEN 60068-2-6 (FC) Sine (20G) BSEN 60068-2-64 (FH) Random (14.1 Grms)
Shock	BSEN 60068-2-27 (Ea) (50G, 11ms)
Approvals	ATEX Category II 1G, Ex ia IIB T4 Ga (-40°C < Ta < +80°C)
Weight	50-150 grams (1.8 to 5.3 ounces). Configuration dependant



EMC Specifications

Emissions Tests: EN61326-1:2006 and EN61326-2-3:2006

EN55011:2007	Radiated Emissions:	30-230MHz 30dB μ V/M @10M 230-1000MHz 37dB μ V/M @10M
---------------------	---------------------	--

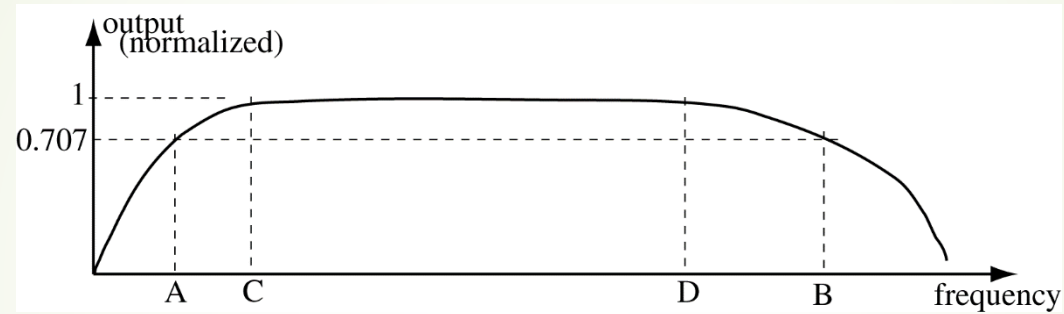
Immunity Tests: EN61326-1:2006 and EN61326-2-3:2006

EN61000-4-2:2009	Electrostatic Discharge:	\pm 4Kv contact \pm 8Kv air
EN61000-4-3:2006	Radiated Immunity:	10V/M 80-1000MHz 3V/M 1400-2000MHz 1V/M 2000-2700MHz
EN61000-4-4:2004	Fast Transients:	\pm 0.25, 0.5, 1Kv
EN61000-4-6:2007	Conducted Immunity:	3V 0.15 to 80MHz 80% 1KHz modulation

Individual Specifications

Voltage	
Output (3-wire)	0V min. to 10V max. See under "How to Order," last page
Supply Voltage	1 Volt above full scale to 30V max @ 4.5 mA
Source and Sinks	2 mA
Current	
Output (2-wire)	4-20 mA
Supply Voltage	8-24 Volts measured at the input to the transducer terminals
Maximum Loop Resistance	(Supply Voltage – 8) x 50ohms See Graph
Ratiometric	
Output	0.5 to 4.5V (Source and sink 2mA)
Supply Voltage	5 Vdc \pm 10% @ 4.5mA

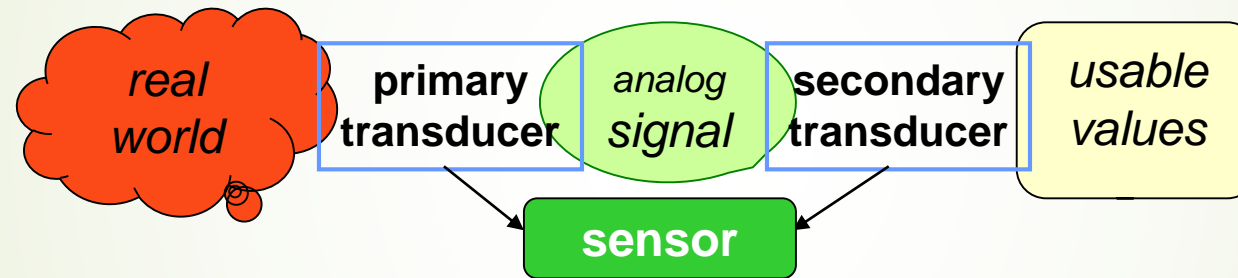
Frequency response (cont)



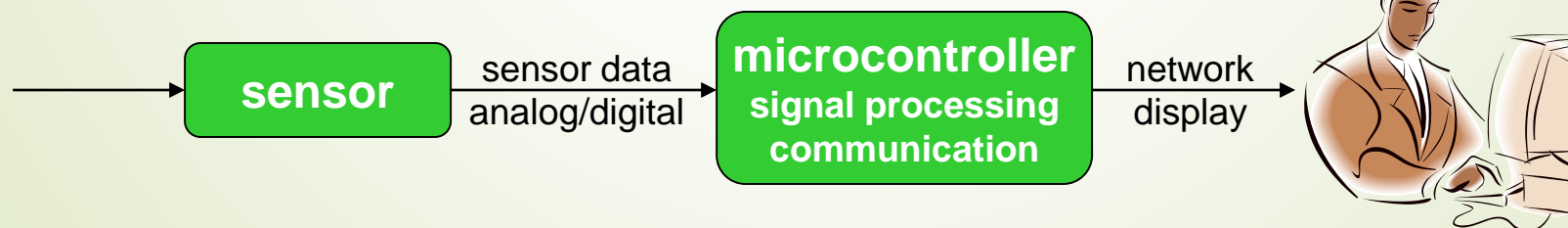
- ▶ Important design parameters
 - ▶ Bandwidth (B-A, in Hz)
 - ▶ Flat frequency range (D-C in Hz)
 - ▶ Cutoff frequencies (points A and B in Hz)
 - ▶ Resonant frequencies

■ General Electronic Sensor

- primary transducer: changes “real world” parameter into electrical signal
- secondary transducer: converts electrical signal into analog or digital values



■ Typical Electronic Sensor System

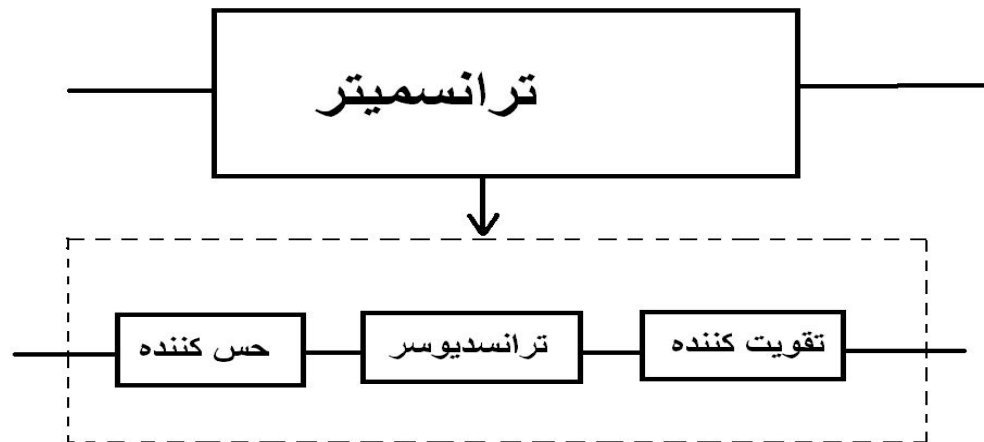


- Primary Transducer Types
 - Resistive Sensors (Potentiometers & Strain Gages)
 - Inductive Sensors
 - Capacitive Sensors
 - Piezoelectric Sensors

- Secondary Transducers
 - Wheatstone Bridge
 - Amplifiers

ترانسمیترها روی لوله ها و مخازن در سراسر محوطه در نقاط اندازه گیری نصب می شوند. ب. طور کلی ترانسمیترها از سه قسمت اصلی حس کننده ، مبدل (ترانسدیوسر) و تقویت کننده تشکیل می شود. ا.

خروجی ترانسمیترهای الکتریکی بین 4-20 میلی آمپر و ترانسمیترهای نیوماتیکی بین 3-15 PSI

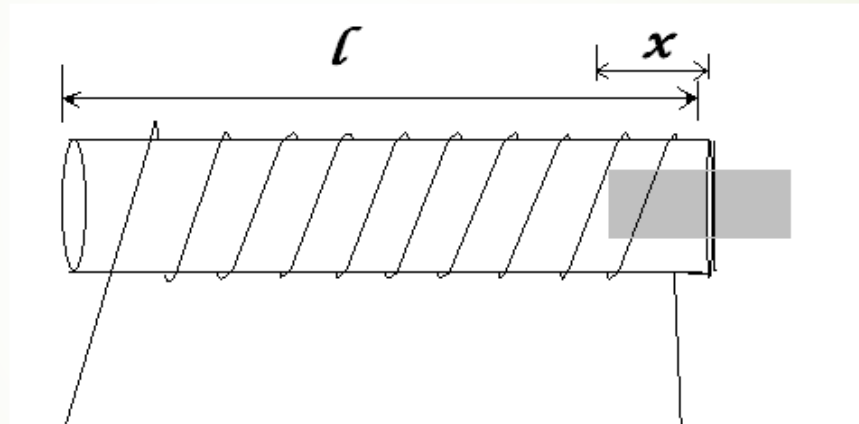


اندازه گيري هاي وضعيت(جابجايي):

اندازه گيرهاي مقاومتي: مقاومت الكتريكي يك جسم از رابطه زیر بدست مي آيد . مقاومت متناسب با طول است و بنابر اين از آن مي توان بعنوان يك اصل فيزيكي براي اندازه گير هاي وضعيت استفاده نمود. ساده ترين نوع اندازه گير هاي مقاومتي اندازه گير هاي پتانسيومتری مي باشد.

از مزايای اندازه گيرهاي مقاومتي ميتوان به سادگي ارزاني و سهولت کاربرد اشاره کرد و از معايب آن نیز استهلاك مکانیکی ومحدود بودن رنج اندازه گيري و ايزولاسيون ضعيف ورودی ، خروجي اشاره کرد.

اندازه گیرهای سلفی : مشکل اساسی اندازه گیر های مقاومتی استهلاک آنها ست چرا که لغزش سر وسط پتانسیومتر بر روی آن موجب استهلاک و سایش می شود .بعلاوه لختی سر وسط ایجاد نویز و اختلال در اندازه گیری می نماید .همچنین گرد غبار و آلودگی هایی که در محیط های صنعتی وجود دارد نیز موجب کثیف شدن پتانسیومتر و انحراف مشخصات اولیه آن می شود



اندازه گیر خازنی:

اندازه گیر های خازنی در اندازه گیری جابجایی های بسیار کوچک ، دقت و حساسیت بهتری دارند.بعلاوه میدان های مغناطیسی که در محیط های صنعتی وجود دارند تاثیری بر کار آنها نخواهد گذاشت .

Capacitance Transducers—I

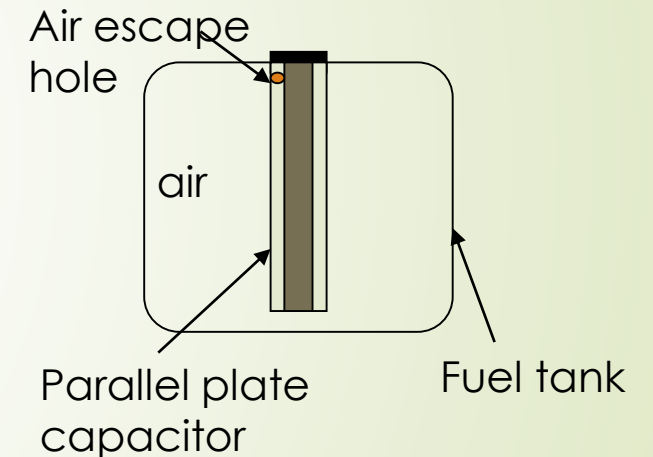
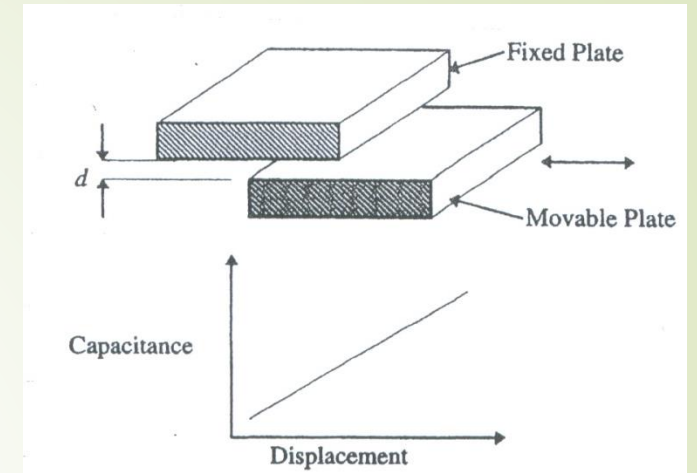
- Recall, capacitance of a parallel plate capacitor is:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

- A : overlapping area of plates (m^2)
- d : distance between the two plates of the capacitor (m)
- ϵ_0 : permittivity of air or free space 8.85pF/m
- ϵ_r : dielectric constant

- The following variations can be utilized to make capacitance-based sensors.

- Change distance between the parallel electrodes.
- Change the overlapping area of the parallel electrodes.
- Change the dielectric constant.



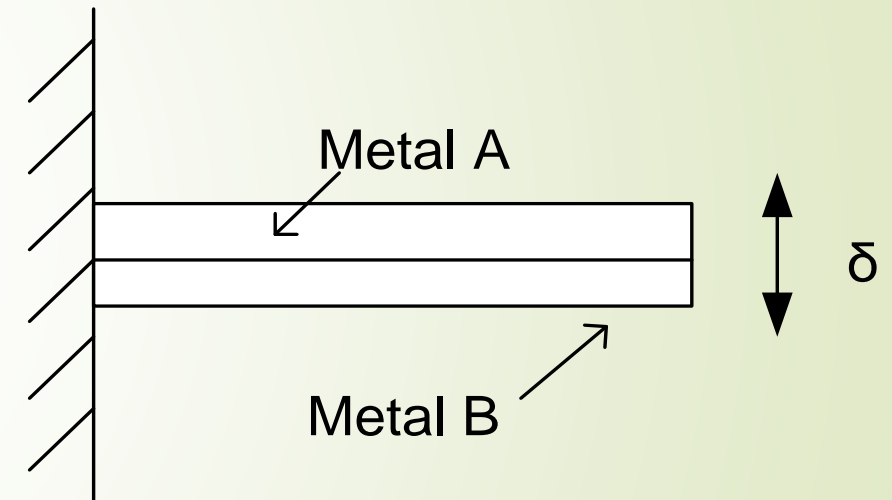
Temperature Sensor: Bimetallic Strip

► Bimetallic Strip

$$L = L_0[1 + \beta(T - T_0)]$$

► Application

- Thermostat (makes or breaks electrical connection with deflection)





استفاده از RTD (Resistance Temperature Detector) ▶

▶ پایداری زیاد

▶ دقت زیاد

▶ گران

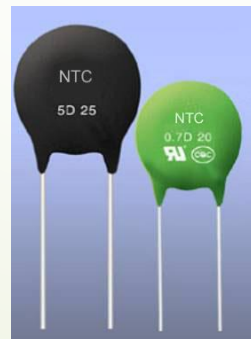
▶ خطی تر از ترموکوپل

▶ استفاده از ترمیستور

▶ غیر خطی تر از دو مورد قبل

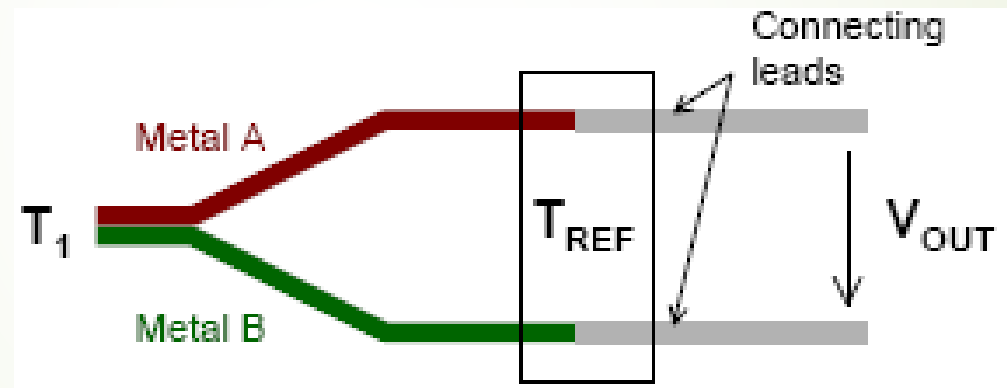
▶ رنج درجه حرارت محدود

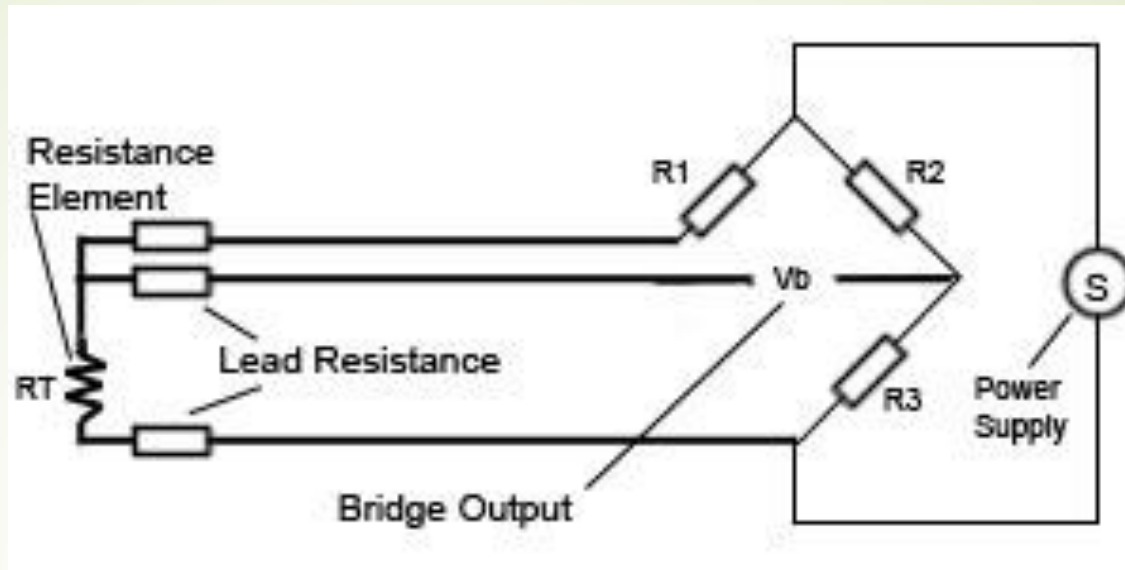
▶ سریع



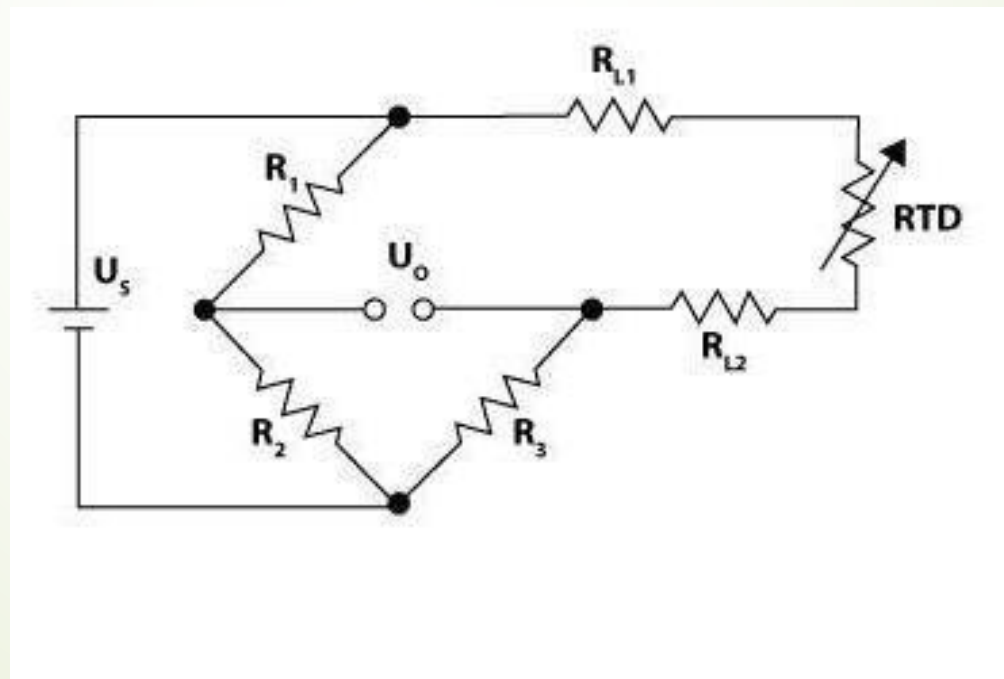
- **Thermocouples**

- based on the Seebeck effect: dissimilar metals at diff. temps. → signal





3 Wire



2 Wire

RTD: (Resistance Temperature Detector)

از انواع مهم RTD میتوان به Pt100 اشاره نمود. جنس مقاومت از پلاتینوم و در دمای صفر درجه مقاومت 100 اهم دارد.

مواد دیگر سازنده RTD: Platinum, Nickel, Copper

$$R_T = R_0 * [1 + a_1.T + a_2.T^2 + a_3.T^3 + \dots + a_n.T^n] = R_0 * (1 + a_1.T)$$



$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

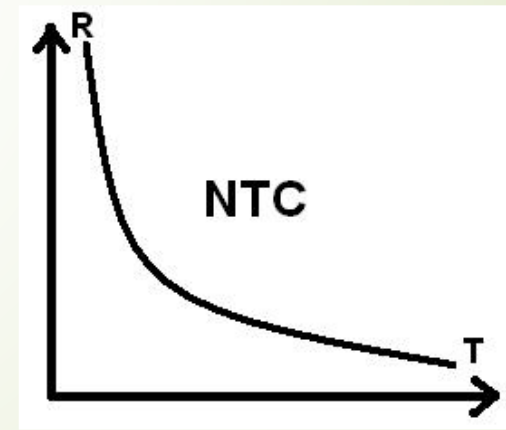
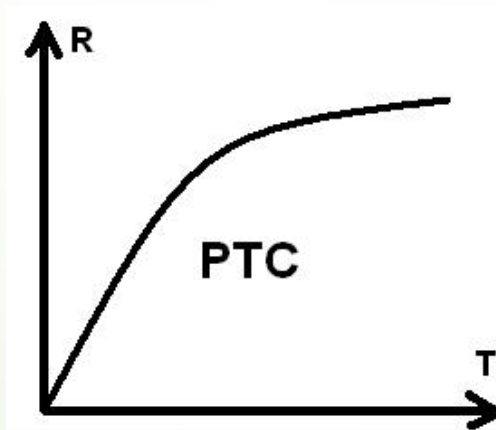
37

Thermistors (Thermally sensitive resistor)

ترمیستورها

$$R = R_0 e^{\gamma \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right]}$$

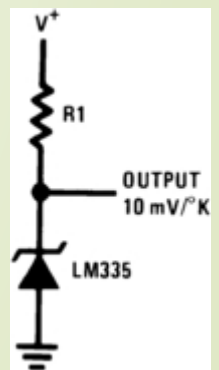
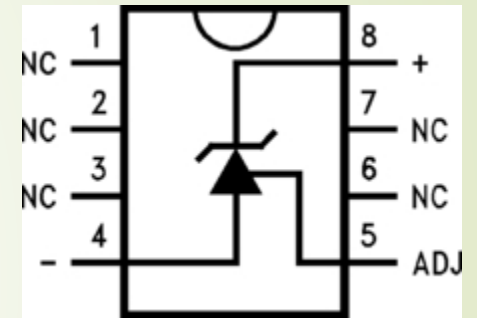
با استفاده از مواد نیمه هادی غیر فلزی که اغلب از ترکیبات سرامیک و یک اکسید فلزی (Mn, Co, Cu or Fe) است ساخته می شود.
دو نوع معمول آن: (PTC) و (NTC).

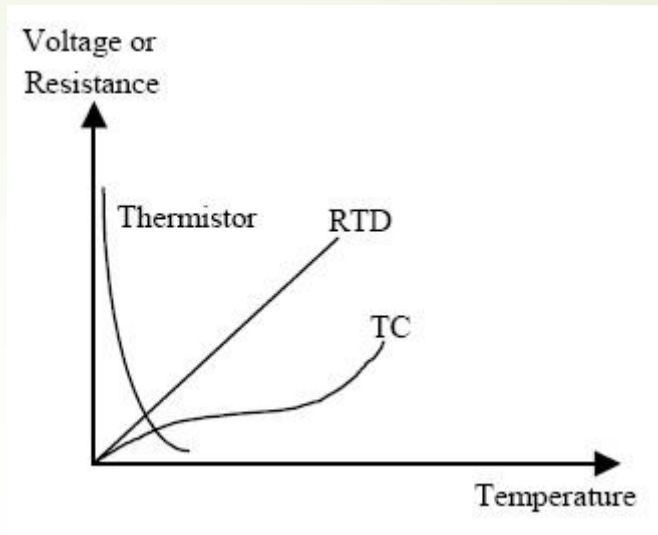


Temperature sensors

LM135/235/335 features(from NS)

- Directly calibrated in °Kelvin
- 1°C initial accuracy available
- Operates from 400 μA to 5 mA
- Less than 1 Ohm dynamic impedance
- Easily calibrated
- Wide operating temperature range
- 200°C over range
- Low cost





	THERMOCOUPLES	RTD	IC
ACCURACY	Limits of error wider than RTD or IC Sensor	Better accuracy than thermocouple	Best accuracy
RUGGEDNESS	Excellent	Sensitive to strain and shock	Sensitive to shock
TEMPERATURE	-400 to 4200° F	-200 to 1475° F	-70 to 300° F
DRIFT	Higher than RTD	Lower than TC	
LINEARITY	Very non-linear	Slightly non-linear	Very linear
RESPONSE	Fast dependent on size	Slow due to thermal mass	Faster than RTD
COST	Rather inexpensive except for noble metals TCs, which are very expensive	More expensive	Low cost

Sensor type	Thermistor	RTD	Thermocouple
Temperature Range (typical)	-100 to 325°C	-200 to 650°C	200 to 1750°C
Accuracy (typical)	0.05 to 1.5°C	0.1 to 1°C	0.5 to 5°C
Long-term stability @ 100°C	0.2°C/year	0.05°C/year	Variable
Linearity	Exponential	Fairly linear	Non-linear
Power required	Constant voltage or current	Constant voltage or current	Self-powered
Response time	Fast 0.12 to 10s	Generally slow 1 to 50s	Fast 0.10 to 10s
Susceptibility to electrical noise	Rarely susceptible High resistance only	Rarely susceptible	Susceptible / Cold junction compensation
Cost	Low to moderate	High	Low



Range: Unlike RTDs, thermistors can only monitor a smaller range of temperature. While some RTDs can reach 600°C, thermistors can only measure up to 130°C.

If your application involves temperatures above 130°C, your only option is the RTD probe.

Cost: Thermistors are quite inexpensive compared with RTDs. If your application temperature matches the available range, thermistors are probably the best option.

However, thermistors with extended temperature range and/or interchangeability features are often more expensive than RTDs.

Sensitivity: Both thermistors and RTD react to temperature changes with predictable changes in resistance. However, thermistors change resistance by tens of ohm per degree, compared to a smaller number of ohms for RTD sensors. With the appropriate meter, the user can therefore obtain more accurate readings.

Thermistor response times are also superior to RTDs, detecting changes in temperature much faster. The sensing area of a thermistor can be as small as a pin head, delivering quicker feedback.

Accuracy: Although the best RTDs have similar accuracies to thermistors, RTDs add resistance to the system. Using long cables can alter readings outside of acceptable error levels.

The larger the thermistor, the higher the resistance value of the sensor. If you are dealing with long distances and there is no option to add a transmitter, a thermistor is the better solution.

Conclusion:

The main difference between thermistors and RTDs is the temperature range. If your application involves temperatures above 130°C, the RTD is your only option.

Below that temperature, thermistors are often preferred when accuracy is important. RTDs, on the other hand, are chosen when tolerance (i.e. resistance) is important. In short: thermistors are better for precision measurement and RTDs for temperature compensation.

Connecting Sensors to Microcontrollers

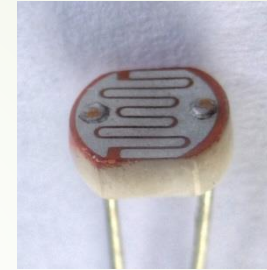
- Analog
 - many microcontrollers have a built-in A/D
 - 8-bit to 12-bit common
 - many have multi-channel A/D inputs
- Digital
 - serial I/O
 - use serial I/O port, store in memory to analyze
 - synchronous (with clock)
 - must match byte format, stop/start bits, parity check, etc.
 - asynchronous (no clock): more common for comm. than data
 - must match baud rate and bit width, transmission protocol, etc.
 - frequency encoded
 - use timing port, measure pulse width or pulse frequency

Connecting Smart Sensors to PC/Network

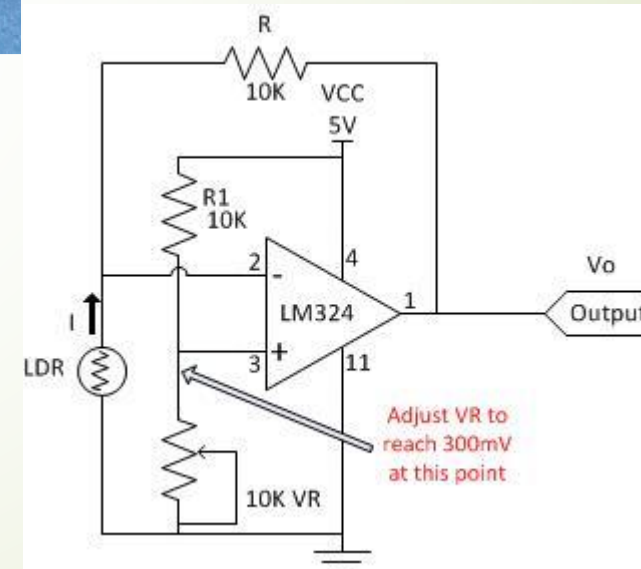
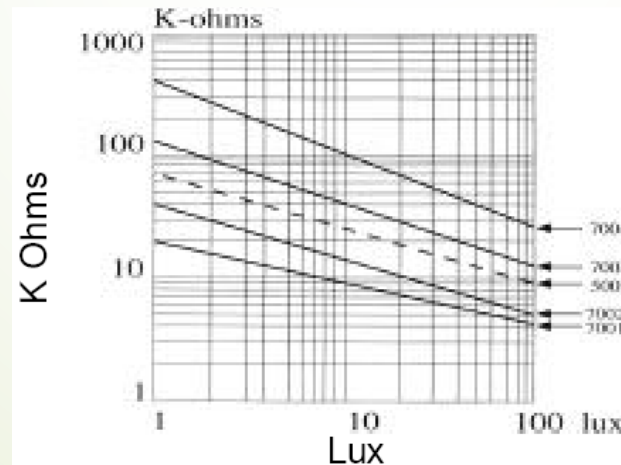
- ▶ **“Smart sensor”** = sensor with built-in signal processing & communication
 - ▶ e.g., combining a “dumb sensor” and a microcontroller
- ▶ **Data Acquisition Cards (DAQ)**
 - ▶ PC card with analog and digital I/O
 - ▶ interface through LabVIEW or user-generated code
- ▶ **Communication Links Common for Sensors**
 - ▶ asynchronous serial comm.
 - ▶ universal asynchronous receive and transmit (UART)
 - ▶ 1 receive line + 1 transmit line. nodes must match baud rate & protocol
 - ▶ RS232 Serial Port on PCs uses UART format (but at +/- 12V)
 - ▶ can buy a chip to convert from UART to RS232
 - ▶ synchronous serial comm.
 - ▶ serial peripheral interface (SPI)
 - ▶ 1 clock + 1 bidirectional data + 1 chip select/enable
 - ▶ I²C = Inter Integrated Circuit bus
 - ▶ designed by Philips for comm. inside TVs, used in several commercial sensor systems
 - ▶ IEEE P1451: Sensor Comm. Standard
 - ▶ several different sensor comm. protocols for different applications

Cadmium Sulfoselenide (CdS) Photoconductive Photocells and light-dependent resistor (LDR)

light-dependent resistor (LDR)

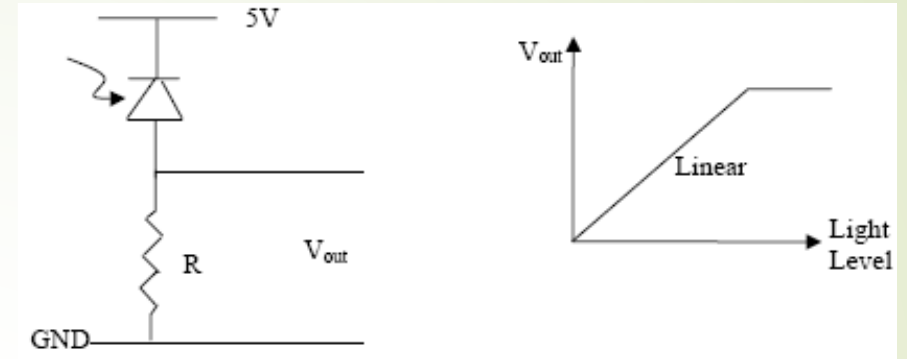
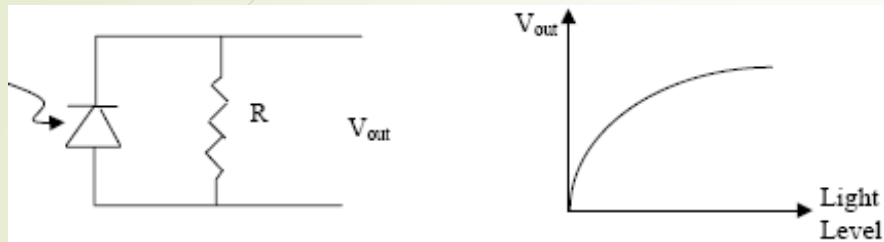


Light sensing using CdS



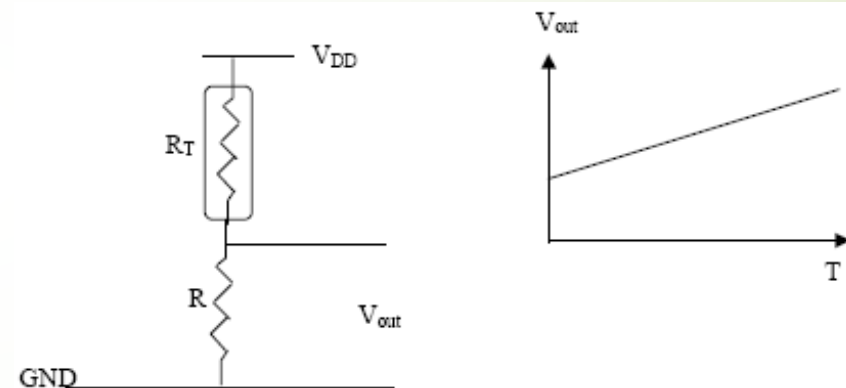
Passive Sensor Readout Circuit

■ Photodiode Circuits



■ Thermistor Half-Bridge

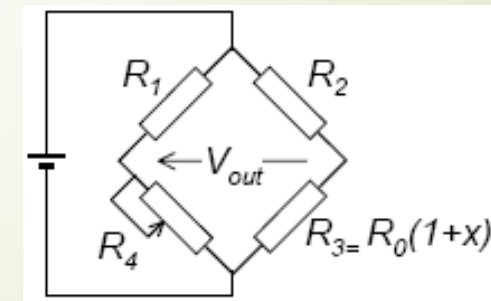
- voltage divider
- one element varies



■ Wheatstone Bridge

- R_3 = resistive sensor
- R_4 is matched to nominal value of R_3
- If $R_1 = R_2$, $V_{out-nominal} = 0$
- V_{out} varies as R_3 changes

$$V_{out} = V_{CC} \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{R_4}{R_1 + R_4} \right)$$



Operational Amplifiers

► Properties

- open-loop gain: ideally infinite: practical values 20k-200k
 - high open-loop gain → virtual short between + and - inputs
- input impedance: ideally infinite: CMOS opamps are close to ideal
- output impedance: ideally zero: practical values 20-100Ω
- zero output offset: ideally zero: practical value <1mV
- gain-bandwidth product (GB): practical values ~MHz
 - frequency where open-loop gain drops to 1 V/V

► Commercial opamps provide many different properties

- low noise
- low input current
- low power
- high bandwidth
- low/high supply voltage
- special purpose: comparator, instrumentation amplifier