

# (MEMS) Inteligentné senzory a aktuátory

Ing. Richard Balogh

## Prednášky

Prednášateľ: **Ing. Richard Balogh, PhD.**  
miestnosť: D-110  
mail: [balogh@elf.stuba.sk](mailto:balogh@elf.stuba.sk)  
nepoužívajte AIS na mail

Prednášky aj cvičenia D-208

- Exkurzia? termín
- Spoločné prednášky – 5 ľudí po 10 min každý týždeň

## Hodnotenie

25 bodov merania (nutné všetky)  
15 bodov individuálny projekt,  
10 bodov referáty na prednáškach  
50 bodov skúška

Podmienky absolvovania predmetu:

- Z každej časti nutné získať min 1/3 bodov.

Skúška:

- open book, open notes, 60 min  
základné znalosti / príklad / návrh merania

## Domáce úlohy

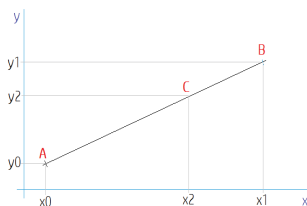
Link (invitation) do Repl.IT

T: 28. 2. 2021

```
#include <stdio.h>
int main(void) {
    int x[3];
    int y[3];
    scanf("%d", &id, &x[0], &y[0]); // Enter coordinates A
    scanf("%d", &id, &x[1], &y[1]); // Enter coordinates B
    scanf("%d", &x[2]); // Enter coordinate cx
    y[2] = 0; // replace with your code
    printf("%d", y[2]);
    return 0;
}
```

You know the left point  $A = \{x[0], y[0]\}$  and right point  $B = \{x[1], y[1]\}$  of the line.

Knowing that somewhere between those two points is the C with known  $x[2]$ , calculate  $y[2]$ .



```
int x[3] = {x0, x1, x2}
int y[3] = {y0, y1, ?}
```

## Cvičenia

- 2-3 výpočtové
- 8 praktických (meranie, návrh)
- 2-3 individuálny projekt
- **Dotazník:** Simulátor - Arduino - Mobil?

### Individuálny projekt:

K danému senzoru navrhnuť prevodník, merací kanál, vyhodnotenie, naprogramovať funkcie a zobrazovanie.

## Literatúra

- [1.] Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft and Neil White: *MEMS Mechanical Sensors*. Artech House, Norwood, 2004.
- [2.] Kourosh Kalanter-zadeh: *Sensors. An Introductory course*. Springer, New York, 2013.
- [3.] Jacob Fraden: *Handbook of Modern Sensors*. 4th ed. Springer, New York, 2010.
- [4.] H. R. Everett: *Sensors for Mobile Robots*. Theory and Application. A K Peters, Natick, 1995.
- [5.] Ján Šturcel: *Prvky riadiacich systémov. Meranie neelektrických veličín*. STU Bratislava 2004.
- [6.] Ján Šturcel: *Snímače a prevodníky*. STU Bratislava, 2002.
- [7.] Miroslav Toman: *Senzory v automatizácii*. STU 1999. 127s.
- [8.] František Duchoň: *Snímače v mobilnej robotike*. STU 2012.
- [9.] Karel Zehnulla: *Čidla robotů*. SNTL Praha, 1990

## Prednášky

po 5 slajdov, poslat najneskorsie v pondelok do 20:00  
+ otazka na skusku

- Vlastnosti senzorov Transfer function [3.], s. 13-15
- Vlastnosti senzorov Functional approximation [3.], s. 15-16
- Vlastnosti senzorov Polynomial approximation + sensitivity [3.], s. 16-18
- Vlastnosti senzorov Linear PWL approximation [3.], s. 18-19
- Vlastnosti senzorov Spline + Multidimensional [3.], s. 19-21
- Vlastnosti senzorov Calibration [3.], s. 21-22
- Vypocty prenosovej fcie [3.] 22-25
- Vypocet linearej approx [3.] 25
- Vypocet Linear PWL approx [3.] 26-28
- Vypocet Newtonova metoda [3.] 28-30

[3.] Jacob Fraden: *Handbook of Modern Sensors*. 4th ed.  
Springer, New York, 2010.

## Prednášky

po 5 slajdov, poslat najneskorsie v pondelok do 20:00  
+ otazka na skusku

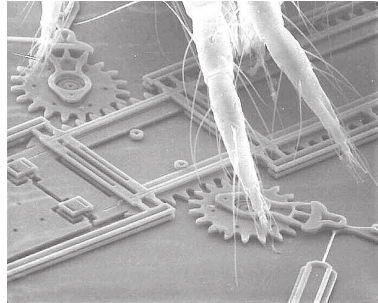
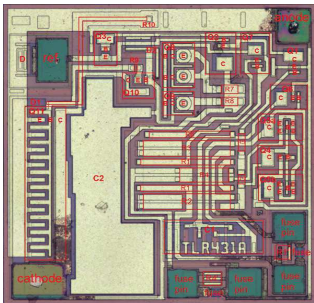
- Ludske zmysly - sluch + urcovanie polohy
- Ludske zmysly - zrak
- Ludske zmysly - chut
- Ludske zmysly - cuch
- Ludske zmysly - hmat (tlak, teplo, dotyk, bolesť)
- Ludske zmysly - statokineticky vestibularny organ

- Vlastnosti senzorov Transfer function [3.], s. 13-15
- Vlastnosti senzorov Functional approximation [3.], s. 15-16
- Vlastnosti senzorov Polynomial approximation + sensitivity [3.], s. 16-18
- Vlastnosti senzorov Linear PWL approximation [3.], s. 18-19
- Vlastnosti senzorov Spline + Multidimensional [3.], s. 19-21
- Vlastnosti senzorov Calibration [3.], s. 21-22
- Vypocty prenosovej fcie [3.] 22-25
- Vypocet linearej approx [3.] 25
- Vypocet Linear PWL approx [3.] 26-28
- Vypocet Newtonova metoda [3.] 28-30

[3.] Jacob Fraden: *Handbook of Modern Sensors*. 4th ed.  
Springer, New York, 2010.

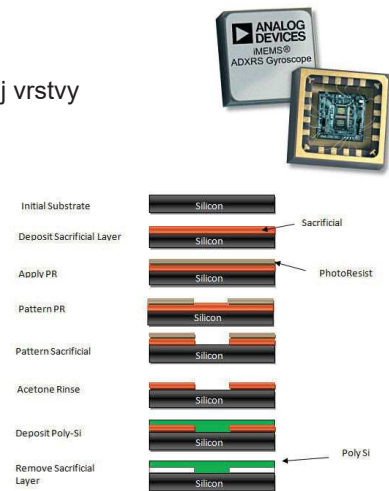
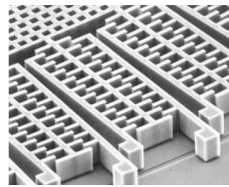
## MEMS Micro-electro-mechanical systems

je označenie samotnej technológie ako aj produktov  
vyrobených technológiou podobnou výrobe integrovaných  
obvodov

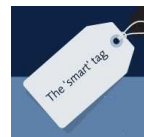


## MEMS Micro-electro-mechanical systems

- Nanesenie fotocitlivej krycej vrstvy
- Osvit
- Vyvolanie fotocitlivej vrstvy
- Omývanie
- Leptanie
- Čistenie
- Puzdrenie



**Inteligencia**  
intelligent system, smart system



**Inteligencia**  
intelligent system, smart system

– schopnosť riešiť problémy za okolností sprevádzaných neurčitou.

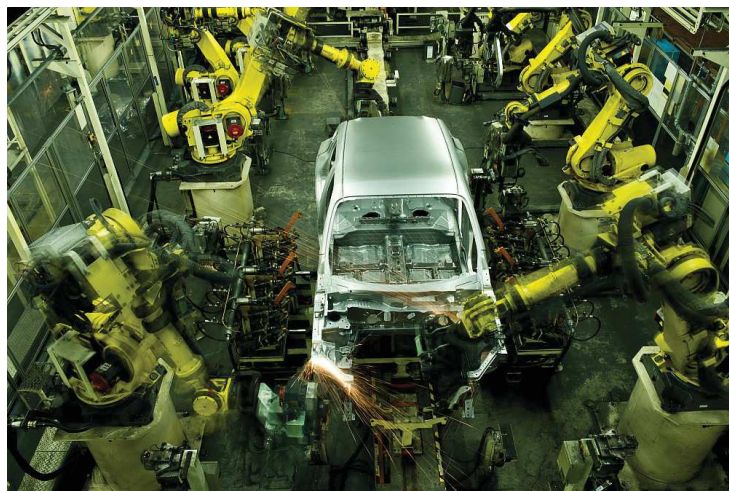
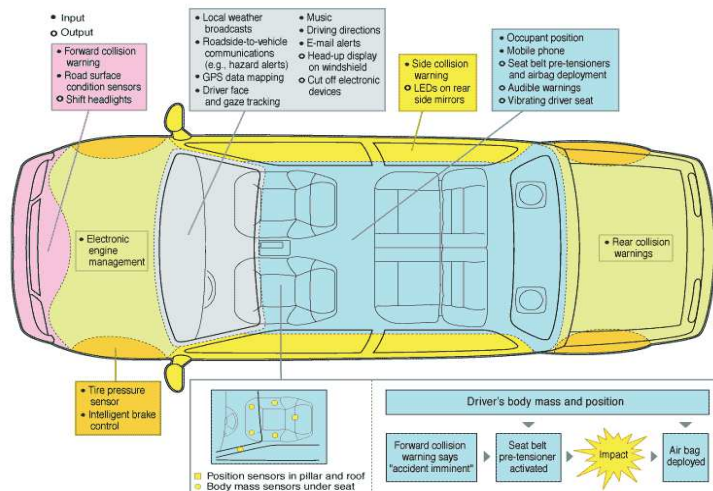
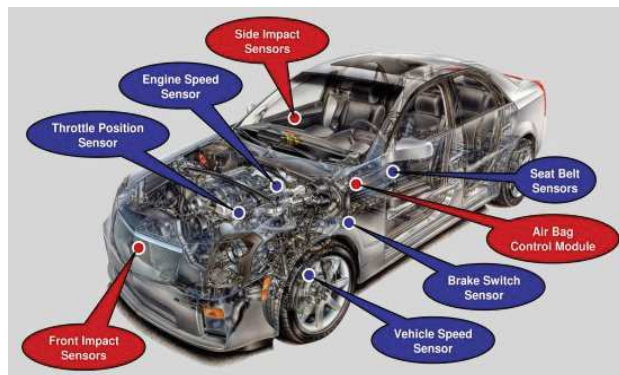
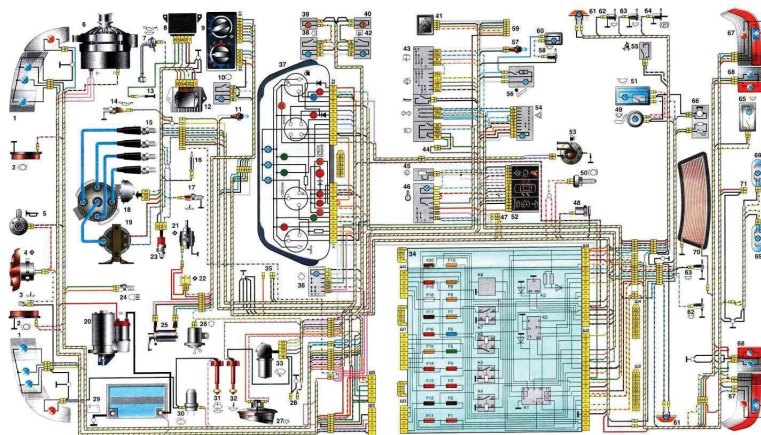
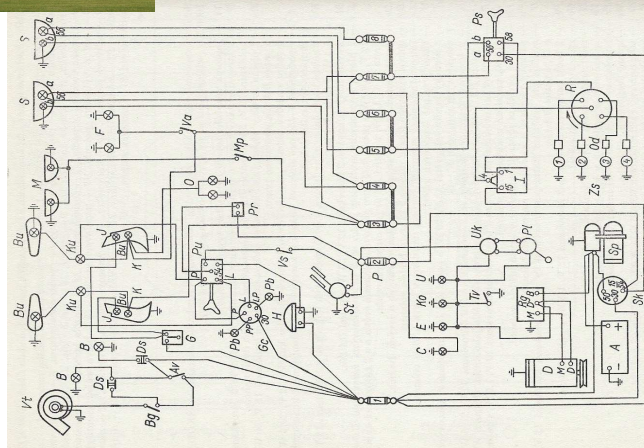
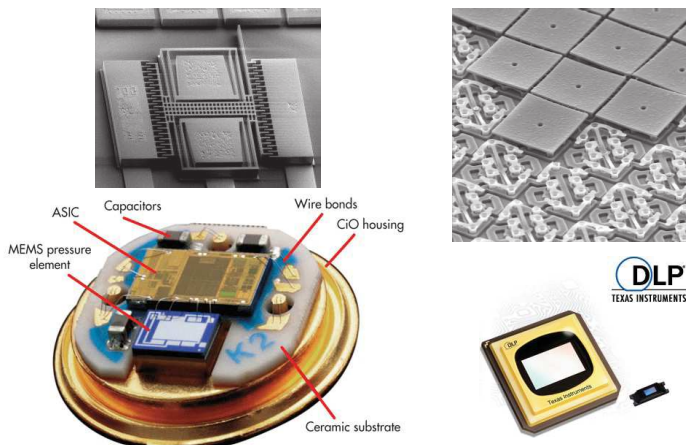
– schopnosť vyťažiť dôležité informácie z daného množstva pozorovaní, ktoré nám zabezpečia prežitie

An intelligent system is a machine with an **embedded**, Internet-connected **computer** that has the capacity to gather and analyze data and **communicate** with other systems. Requirements for an intelligent system include security, connectivity, the ability to adapt according to current data and the capacity for remote monitoring and management.

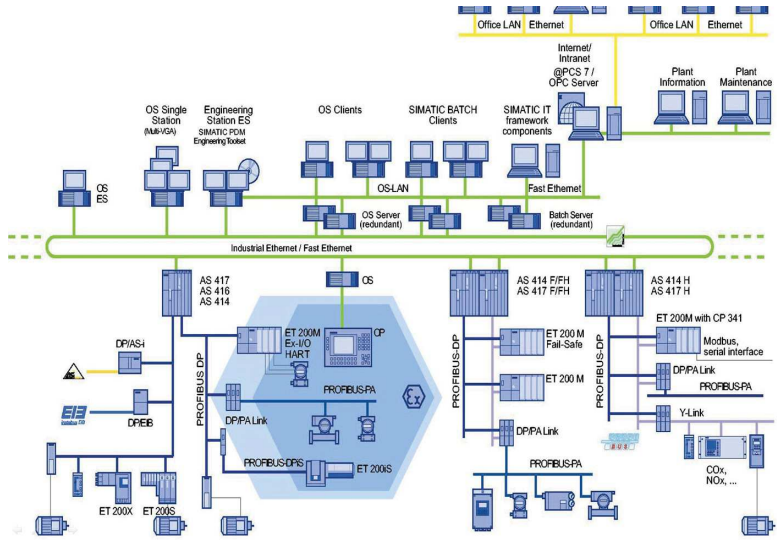




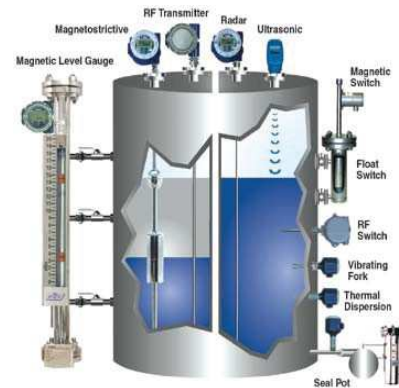
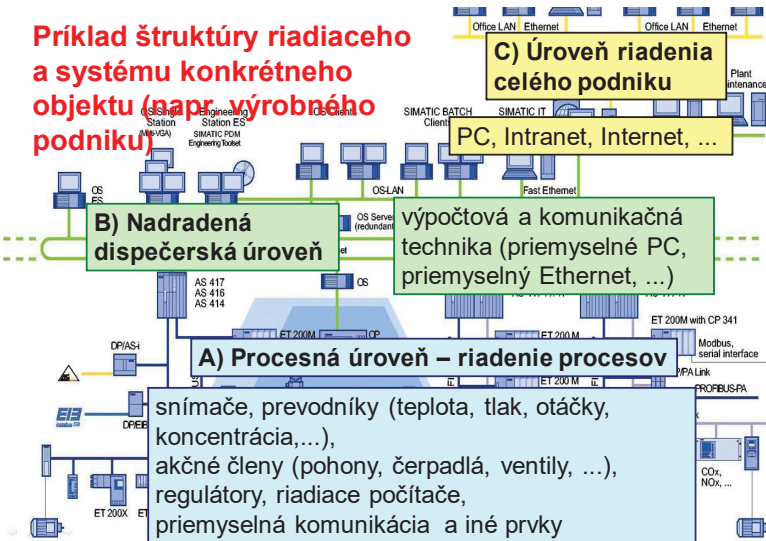
# MEMS – inteligentný senzor a aktuátor







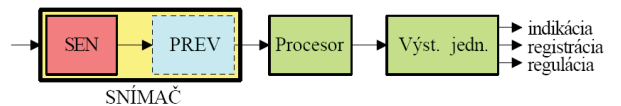
**Príklad štruktúry riadiaceho a systému konkrétneho objektu (napr. výrobného podniku)**



Vaše príklady?

Senzor

- Senzor
- Snímač
- Prevodník
- Merací prevodník, merací člen



# Senzory

Podľa výstupu

- aktívne - U, I, f..
- pasívne - zmena parametrov (R, L, C,...)

Pozn.: v anglosaskom svete je pasívny snímač taký, ktorý nepotrebuje budenie, t.j. presne naopak.

# Senzory

Podľa nosiča informácie

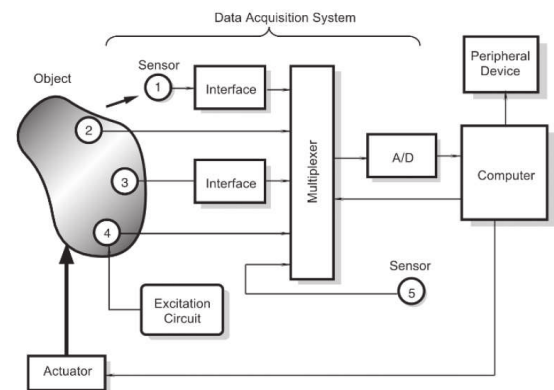
- elektrické
- neelektrické (pneumatický, mechanický, optický, magnetický...)

# Senzory

Podľa meranej veličiny:

- mechanické - poloha, otáčky...
- tepelné
- elektrické - U, I, P, ..
- magnetické - B, H,  $\Phi$
- radiačné - svetlo (IR, UV),  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , kozmické ...
- chemické - pH, analýza ..

## Data acquisition system



1 bezkontaktný senzor  
2, 3 aktívne senzory

4 pasívny senzor (s budením)  
5 vnútorný senzor

## Senzor

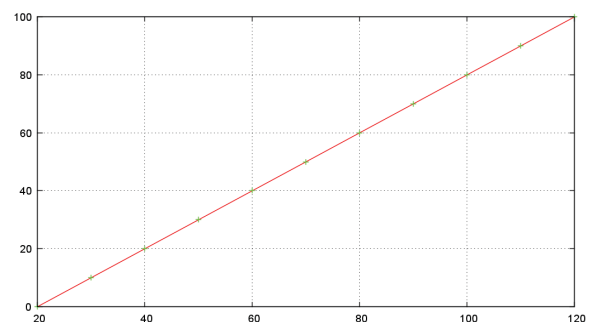
ako kybernetický systém

= čierna skrinka



## Vstupno-výstupná charakteristika

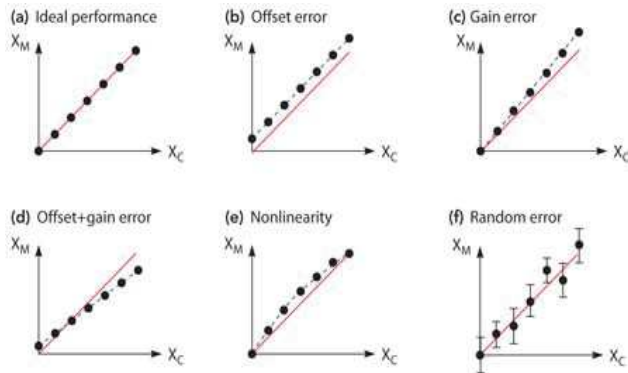
Idealizácia



vstup: 20 – 120 kPa  
výstup: 0 – 100 mV

# Vstupno-výstupná charakteristika

Chyby – realita



# Chyba

Error

Rozdiel medzi nameranou veličinou a zodpovedajúcou ideálnou hodnotou na výstupe. Obvykle sa vyjadruje v percentách rozpätia ideálneho výstupu:

$$e = \frac{Y_{\text{odmerané}} - Y_{\text{ideálne}}}{Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}} \cdot 100\%$$

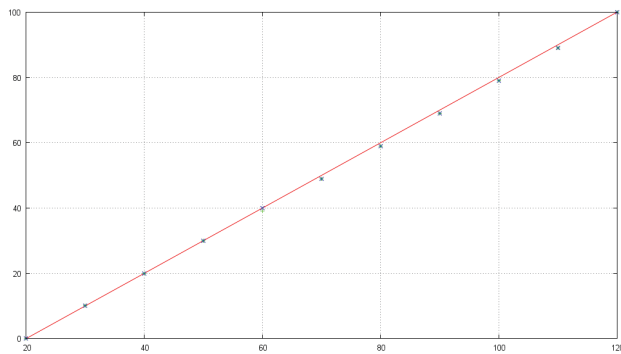
Kladná chyba znamená, že odmeraná hodnota na výstupe je väčšia ako ideálna hodnota na výstupe.

Príklad výpočtu:  
Pri prvom meraní smerom nahor sme pri vstupe 50 kPa (t.j. 30%) zmerali hodnotu 30,11 mV. Ideálna hodnota pre výstupný rozsah 0 - 100 mV je teda 30 mV (t.j. 30%).

$$e = \frac{30,11 - 30}{100 - 0} \cdot 100\% = +0,11$$

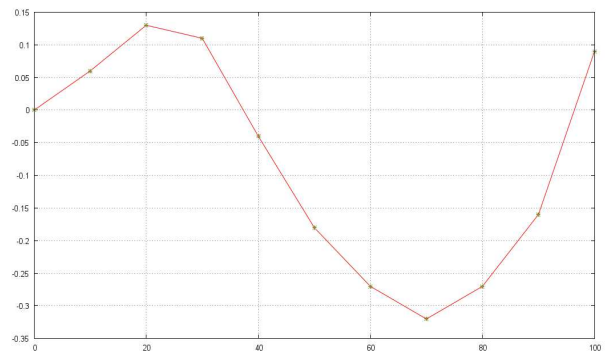
# Chyba merania I.

Measurement error



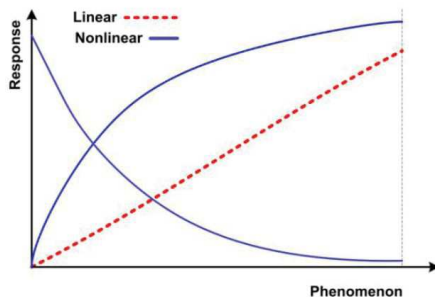
# Chyba merania II.

Measurement error



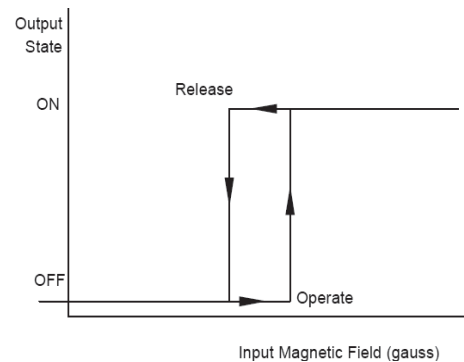
# Prevodová charakteristika

Transfer function



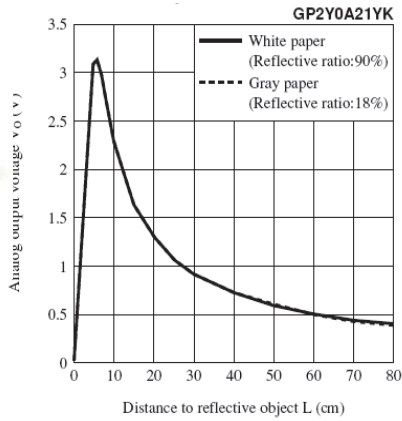
# Prevodová charakteristika

Transfer function



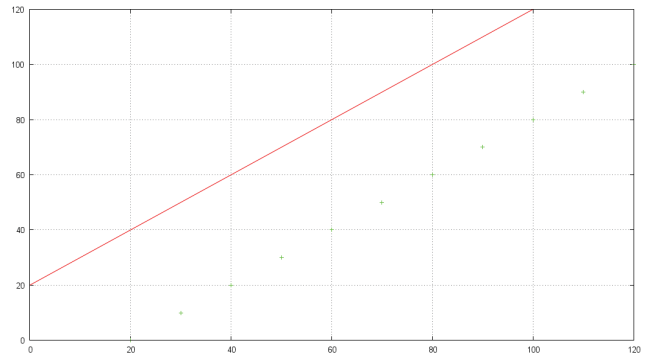
# Prevodová charakteristika

Transfer function

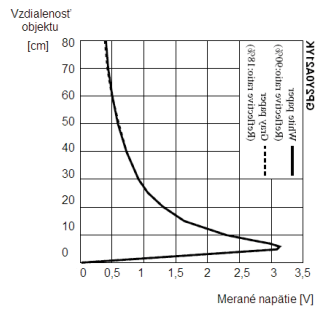


# Inverzná charakteristika

Sensor model

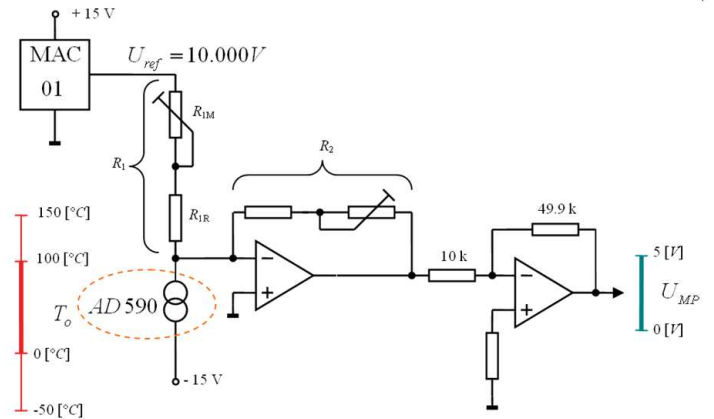


# Inverzná charakteristika



# Užitočný rozsah

Full scale input



# Rozsah

Range

## RTD Sensors—Fast Response

Exposed RTD Element with Fiberglass Insulated Lead Wires

- Accuracy:  $\pm 0.1\%$
- Thermal Response (63%) Less Than 1 Second
- Operating Ranges:
  - 50 to 300°C (-52 to 572°F) Class A Thin Film Element Styles; -100 to 450°C (-148 to 842°F) Class A Wire Wound Element Styles
- 1 m (40") Long 2-, 3-, or 4-Wire #26 AWG Stranded Nickel Plated Copper, Fiberglass Insulated and Jacketed Cable Constructions Available
- Ceramic Cement Insulating Element to Cable Connection

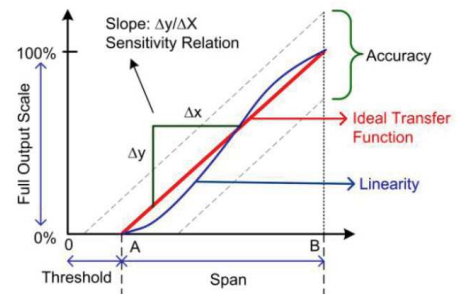


Rozsah (Range)

Interval hodnôt medzi hornou a dolnou hranicou rozsahu, v rámci ktorého sa môže veličina meniť. Napr. unifikovaný prúdový signál má rozsah 4 až 20 mA.

# Rozpätie

Span

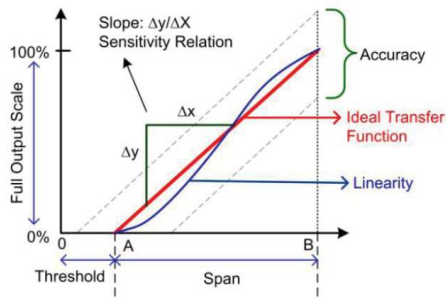


Rozpätie (Span)

Rozdiel medzi hornou a dolnou hranicou rozsahu. Unifikovaný prúdový signál 4 až 20 mA má rozpätie 16 mA.



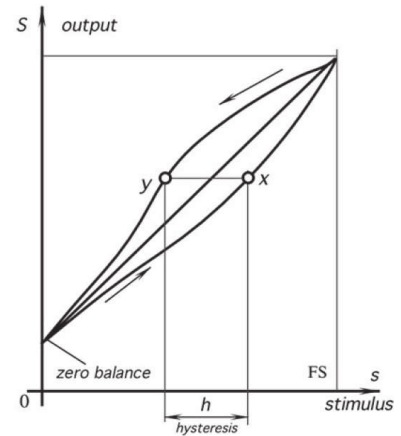
## Presnosť Accuracy



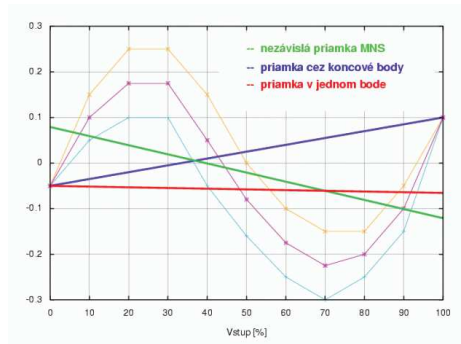
To Order Visit [omega.com/rtd-2-f3105](http://omega.com/rtd-2-f3105) for Pricing and Details

Model No.	Resistance at 0° and Accuracy	Element Size	Element Type
RTD-2-F3105-36-G	100 ± 0.06 Ω, Class A	2 W x 2 mm L	Thin film
RTD-2-F3102-36-G	100 ± 0.06 Ω, Class A	4 W x 5 mm L	Thin film
RTD-2-1PT100KN2515-36-G	100 ± 0.06 Ω, Class A	1.5 Dia. x 25 mm L	Wire wound
RTD-2-1PT100KN2528-36-G	100 ± 0.06 Ω, Class A	2.8 Dia. x 25 mm L	Wire wound
RTD-2-F3145-36-G	1000 ± 0.60 Ω, Class A	2 W x 2 mm L	Thin film
RTD-2-F3142-36-G	1000 ± 0.60 Ω, Class A	4 W x 5 mm L	Thin film

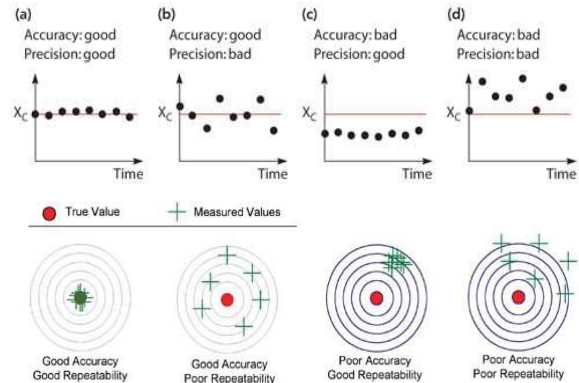
## Hysteréza Hysteresis



## Nonlinearity Nelinearita



## Opakovateľnosť Repeatability

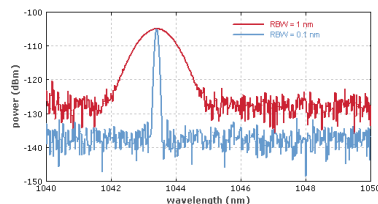


## Odstup signál – šum Signal-to-Noise Ratio (SNR)

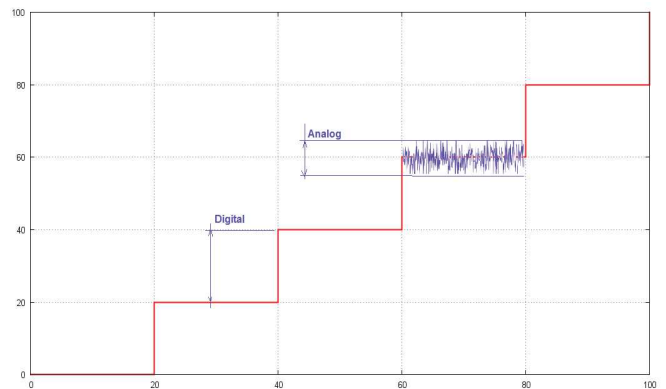
Senzor reaguje nielen na meranú veličinu, ale aj na poruchové veličiny z rôznych zdrojov a pridáva k nim aj rôzne šумы. Dobrý senzor musí mať vysoký odstup signál—šum, t.j. veľké SNR

SNR = signal / noise

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right)$$

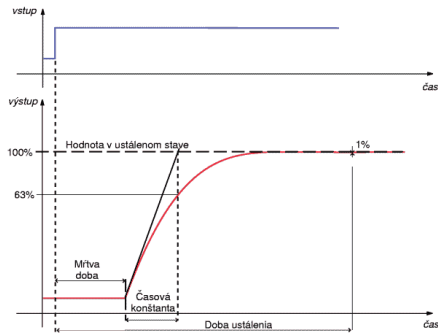


## Rozlišovacia schopnosť Resolution



## Dynamické vlastnosti

### Dynamic properties



Obr. 3. Uvňodnotenie skokovej odzvy.

## Dynamické vlastnosti II

### Dynamic properties

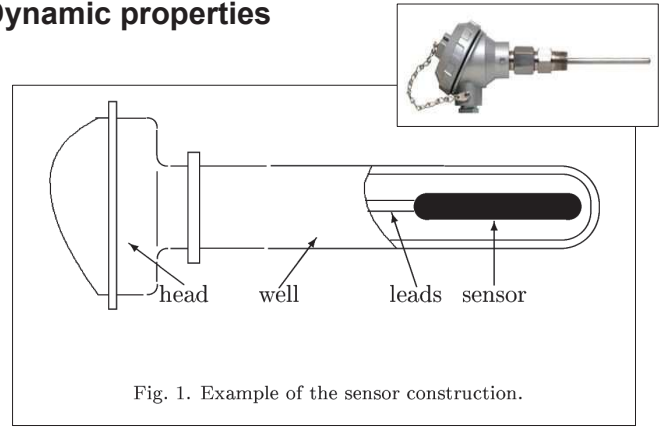
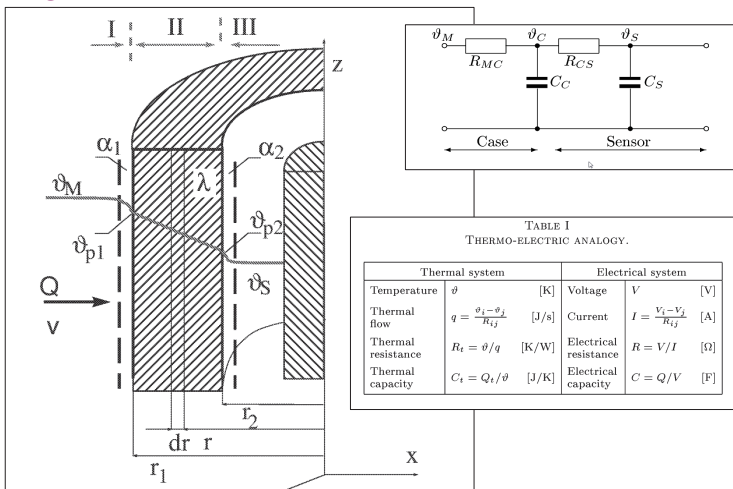


Fig. 1. Example of the sensor construction.

## Dynamické vlastnosti



## Dynamické vlastnosti

differential equation describing the whole system:

$$T_c T_s \frac{d^2 \vartheta_S}{dt^2} + (T_c + T_s) \frac{d\vartheta_S}{dt} + \vartheta_S = \vartheta_M \quad (9)$$

where

$$T_c = \frac{m_C c_C}{k} \quad T_s = \frac{m_S c_S}{\alpha_2 A_2}$$

Corresponded sensor system transfer function is

$$F(s) = \frac{1}{T_c T_s s^2 + (T_c + T_s) s + 1} \quad (10)$$

$$F(s) = \frac{1}{(T_c s + 1)} \frac{1}{(T_s s + 1)}, \quad (11)$$

## Dynamické vlastnosti

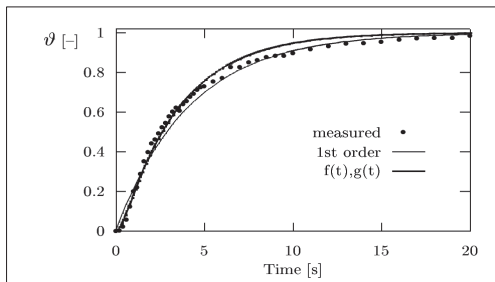


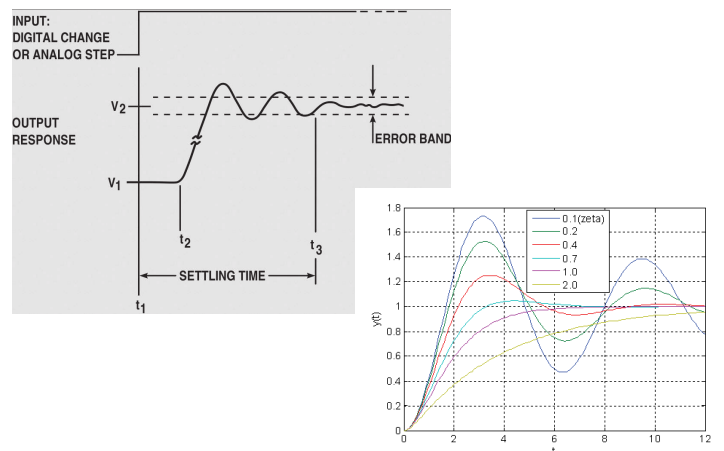
TABLE II  
MATERIAL CONSTANTS FOR SOME METALS.

	$\rho$	$c$	$\lambda$	$\beta$
	[kg m <sup>-3</sup> ]	[kJK <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> ]	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]
Al	2700	0,896	209	23,1
Cu	8930	0,383	394	16,5
Fe	7850	0,461	47	11,5

$\rho$  - density  
 $c$  - specific heat capacity  
 $\lambda$  - thermal conductivity  
 $\beta$  - length expansion coefficient

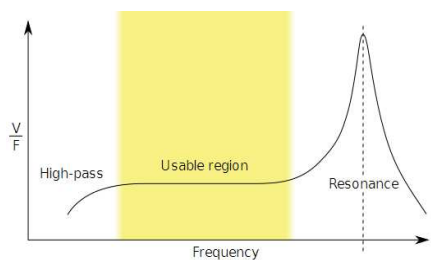
## Dynamické vlastnosti II

### Dynamic properties



# Dynamické vlastnosti III

## Frekvenčná charakteristika



Frequency response of a piezoelectric sensor; output voltage vs applied force

