

# Érzékelők jellemzése

Programozható irányítóberendezések  
és szenzorrendszerek

KOVÁCS Gábor

[gkovacs@iit.bme.hu](mailto:gkovacs@iit.bme.hu)

# Érzékelők feladata

- Információ szerzése
  - az irányított folyamatról
  - a környezetről
- Elvárások az érzékelőkkel szemben
  - pontos
  - kis bizonytalanságú
  - minél kevésbé zavarja a folyamatot

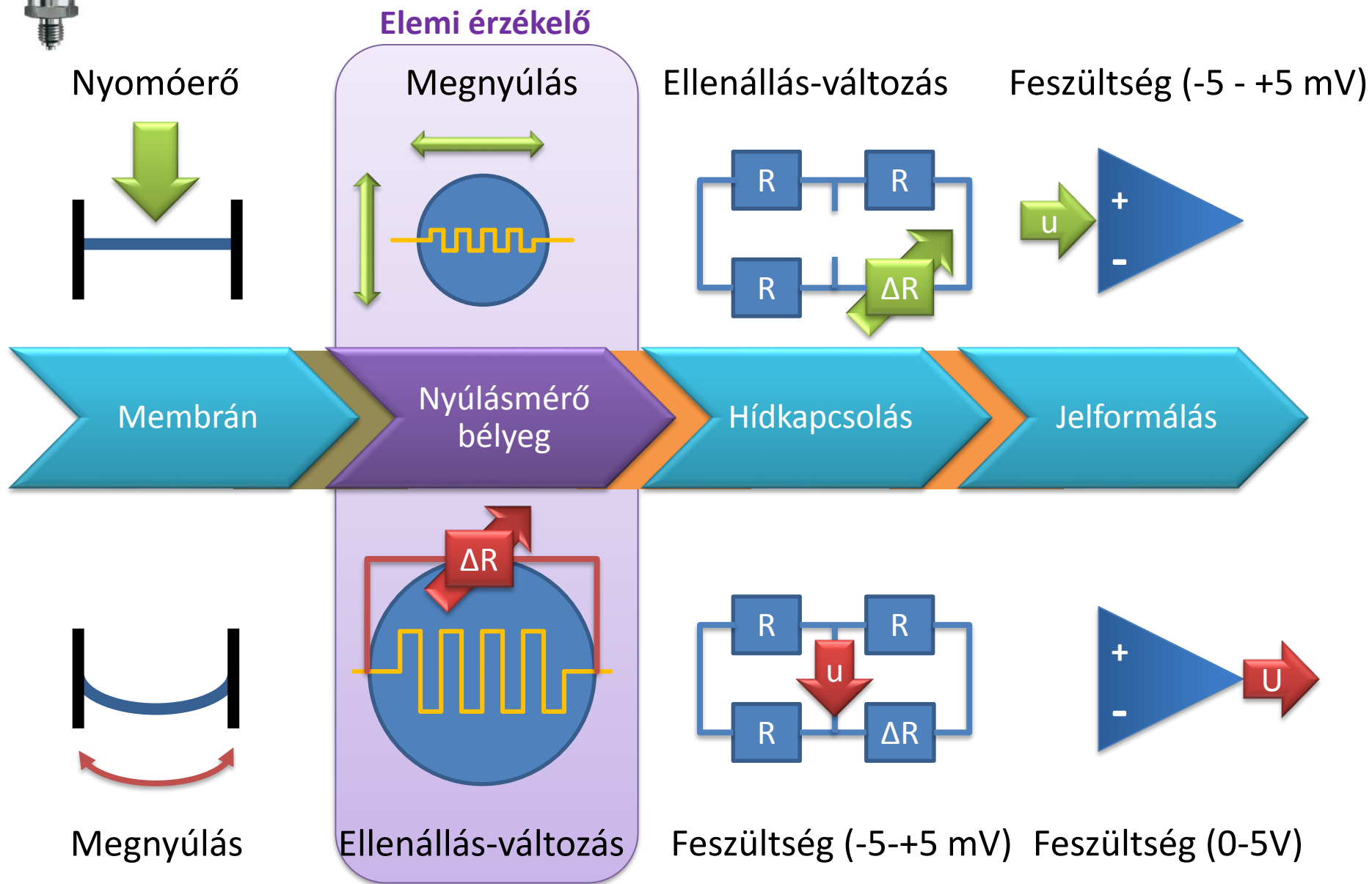
# Jelátalakítók és érzékelők

- Jelátalakító (*transducer*)
  - valamilyen típusú jelet (energiát) más típusú jellé (energiává) alakít át
- Érzékelő (*sensor*)
  - valamilyen nem villamos típusú jelet (energiát) villamos jellé alakít





# Tipikus felépítés - példa



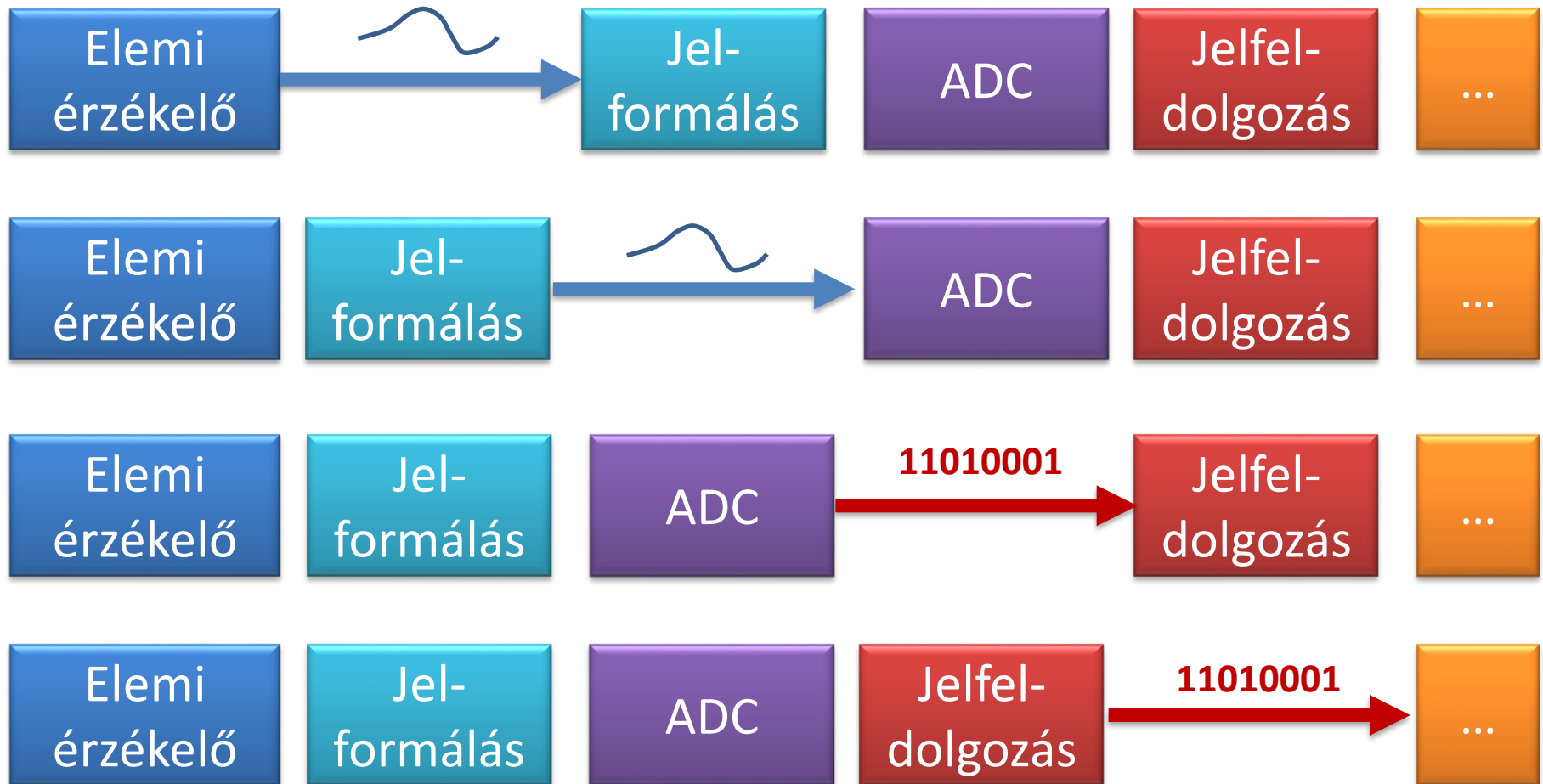
# Érzékelők kimenete

- Folytonos
  - Analóg szint
  - Frekvencia
  - Fázis
  - Kitöltési tényező
- Diszkrét
  - Digitális érték
  - Kontaktusjel

# Feladatmegosztás az érzékelő és az irányítóberendezés között

Érzékelő

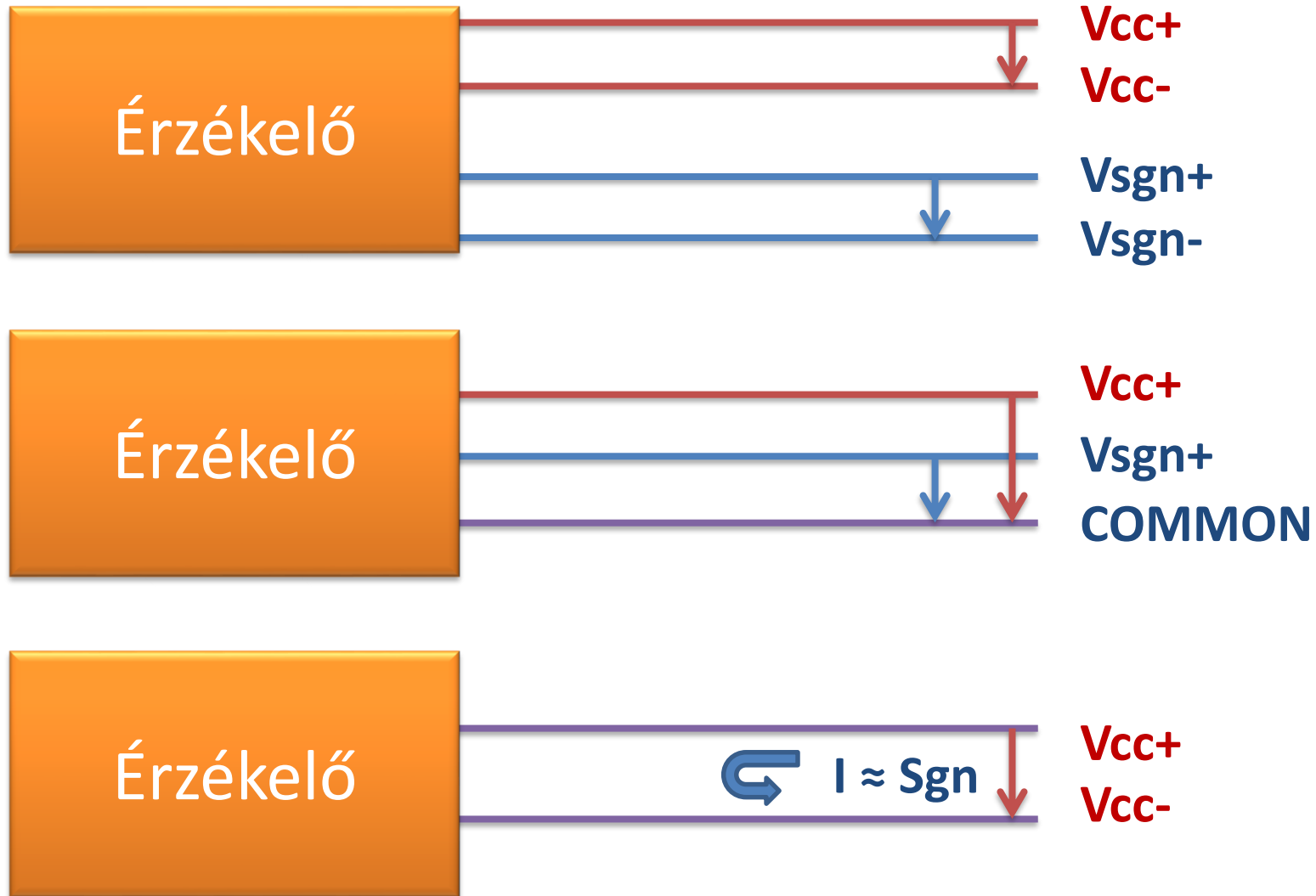
Irányítóberendezés



# Aktív és passzív érzékelők

- Aktív érzékelő
  - A működéshez tápellátást igényel
- Passzív érzékelő
  - Tápellátást nem igényel
  - Az energiát a mért közegből veszi

# Érzékelők tápellátása





# Abszolút és relatív érzékelők

- Abszolút érzékelő
  - Egy állandó referenciaértékhez képest mér
  - A mérési eredmény önmagában is értelmezhető
- Relatív érzékelő
  - Egy adott (esetenként változó) értékhez képest mér
  - A viszonyítási érték ismerete nélkül a mérési eredmény nem értelmezhető
  - Két, azonos kimenetű érzékelő más-más mennyiséget is mérhet

# Érélélők jellemzése



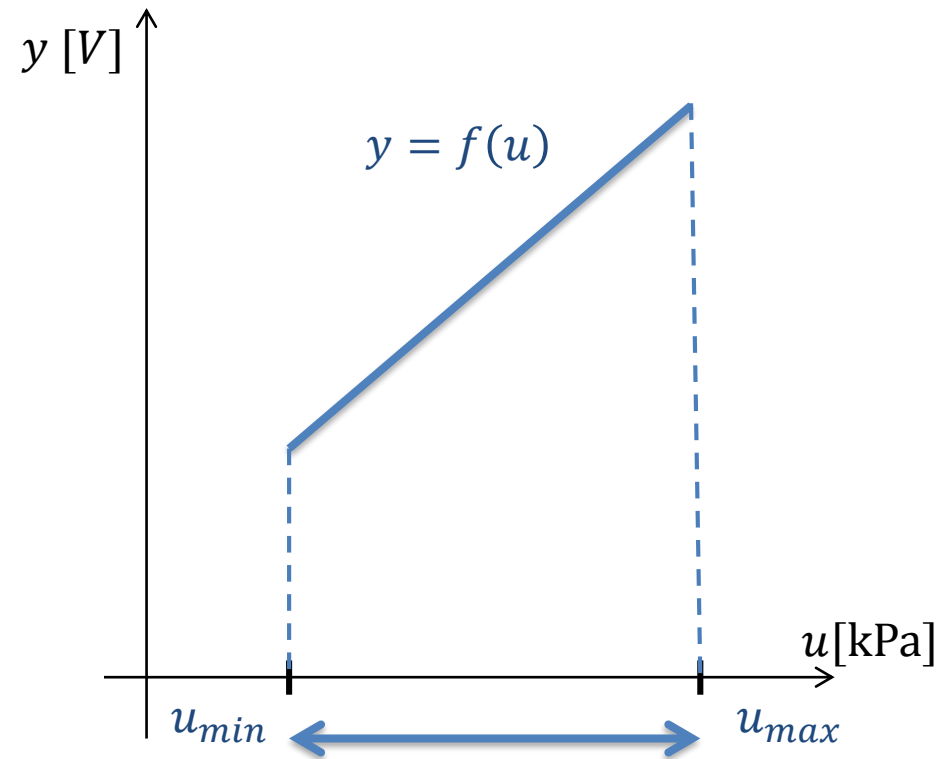
- Bemeneti jeltartomány:  $u_{min}, u_{max}, [u]$
- Kimeneti jeltartomány:  $y_{min}, y_{max}, [y]$
- Karakterisztika:  $y = f(u)$ 
  - Statikus karakterisztika
  - Dinamikus karakterisztika
- Felbontás
- Hiba

# Bemeneti jeltartomány

- **Mérési tartomány**

- A megadott karakterisztika a teljes mérési tartományon érvényes
- Átfogás (*input span*):

$$u_{\max} - u_{\min}$$

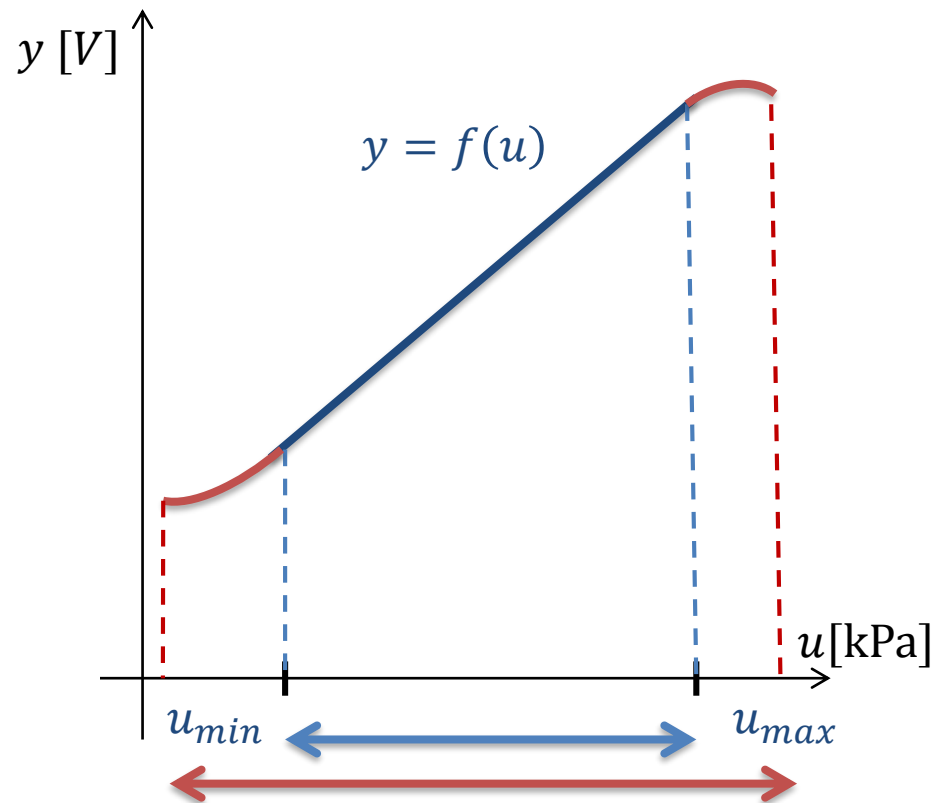


**Mérési tartomány**  
*Input range*  
(Rated) Pressure range

# Bemeneti jeltartomány

- **Működési tartomány**

- A szenzor nem hibásodik meg
- A karakterisztika nem érvényes a teljes működési tartományon
- Megadható hosszú és rövid távon elviselt (*burst*) tartomány is

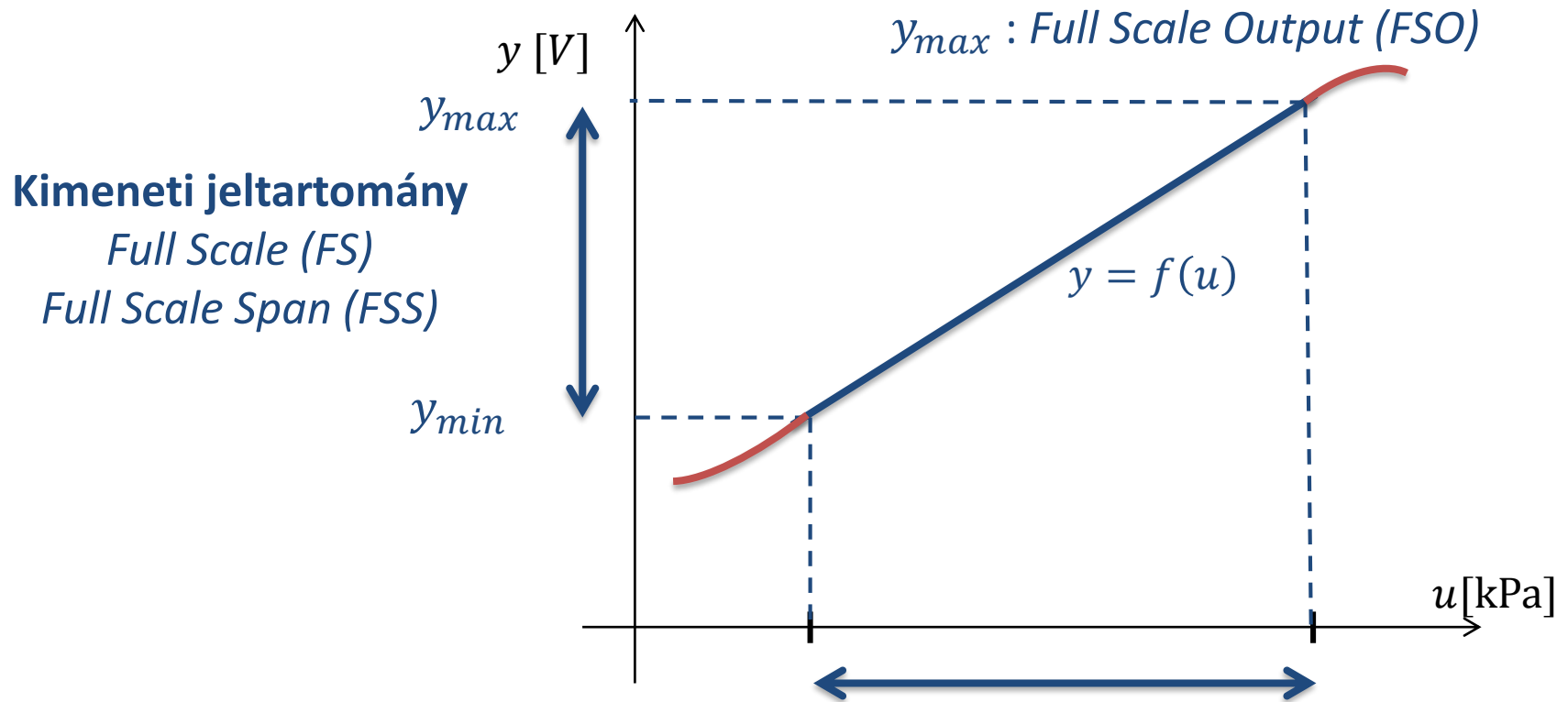


**Működési tartomány**

*Operating range*

*Absolute input range*

# Kimeneti jeltartomány



- A mérési tartományhoz tartozó kimeneti jeltartomány nagysága
- $FS = y_{max} - y_{min}$
- Digitális szenzornál:  $n$  bit:  $0 \dots 2^n - 1$

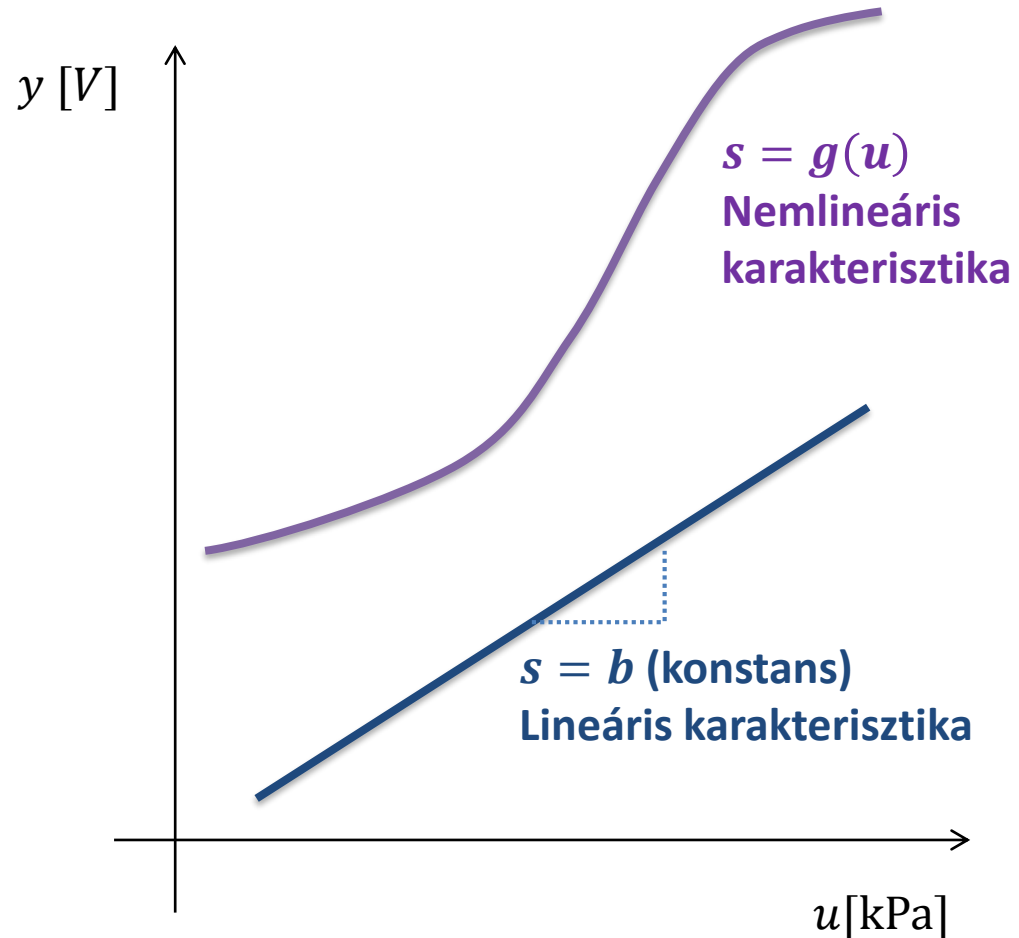
# Statikus karakterisztika

- Egy adott munkapontban:  $y = f(u)|_{OP}$
- A környezeti paraméterek állandók az összes munkapontban
  - Tápfeszültség
  - Terhelés
  - Kapcsolás
  - Környezeti hőmérséklet (kivéve hőmérsékletérzékelők)
  - ...
- A mérendő mennyiség is állandósult az egyes munkapontokban

# Érzékenység

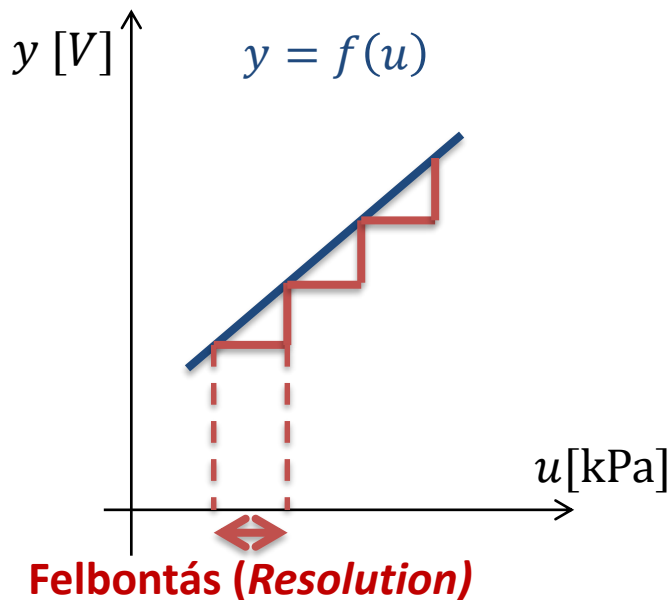
Érzékenység  
(*sensitivity, scale factor*):

$$s = \frac{df(u)}{d(u)} \approx \frac{\Delta y}{\Delta u}$$



# Felbontás

- A legkisebb bemeneti változás, ami a kimeneten érzékelhető
- Digitális szenzornál: ADC LSB-hez tartozó érték
- Analóg szenzor: fizikai kialakítás miatt jelentkezik
- Ha nincs megadva: végtelen kicsi

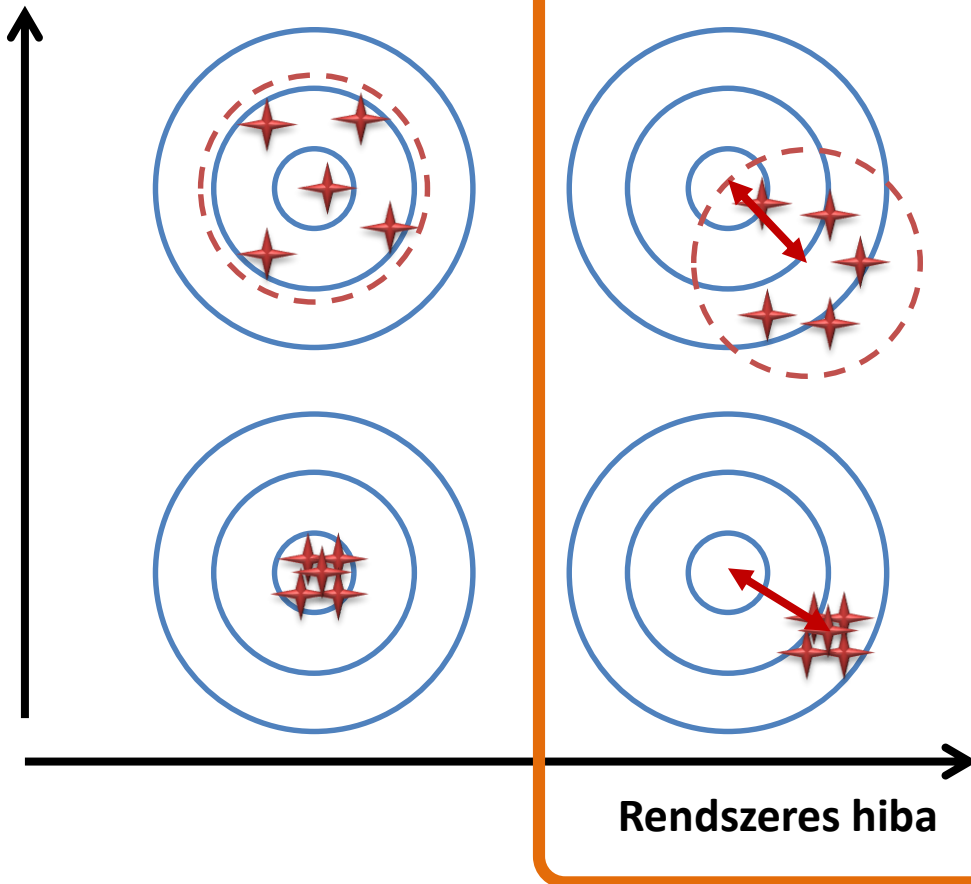




# Érzékelők hibája

- Hiba: a mért érték eltérése a valódi értéktől

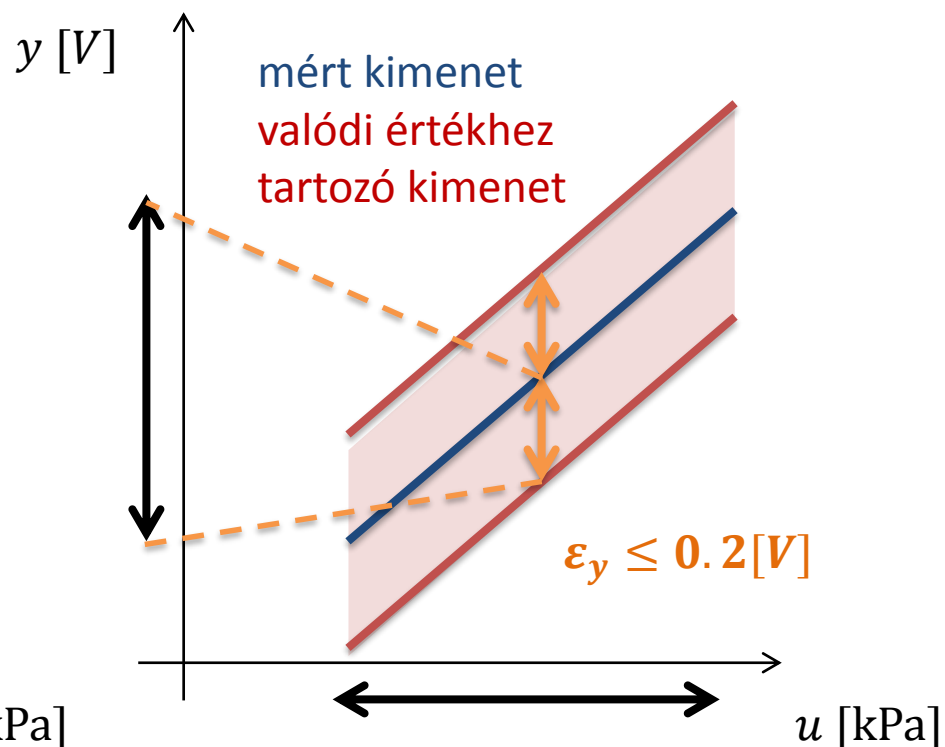
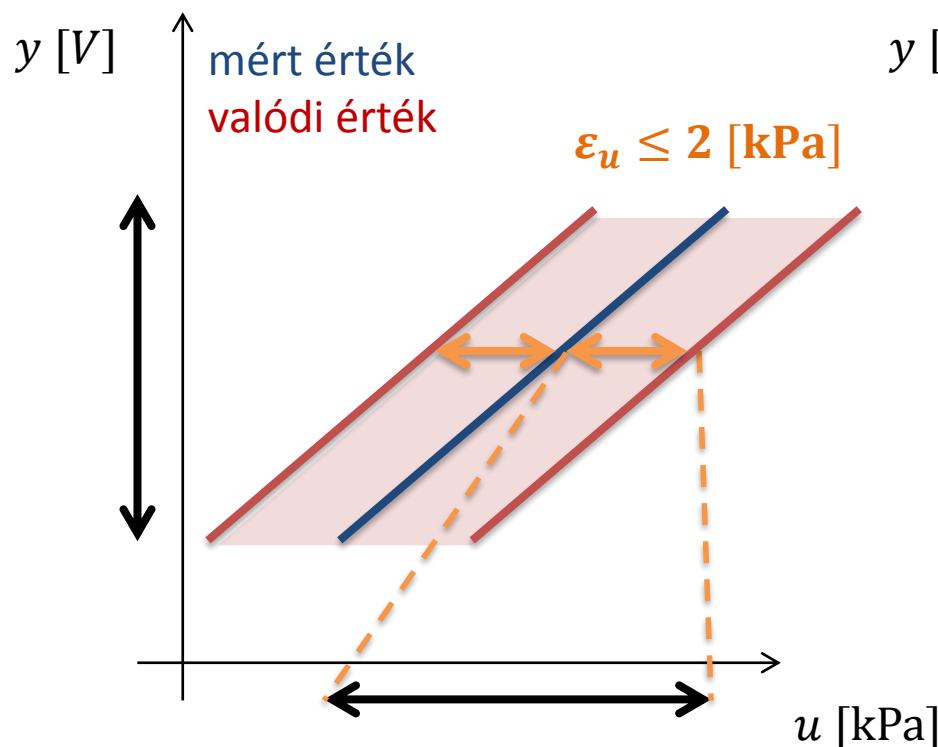
Véletlen hiba



Kalibrálással a  
rendszeres hiba  
csökkenthető,  
ideális esetben  
teljes egészében  
kiküszöbölhető!

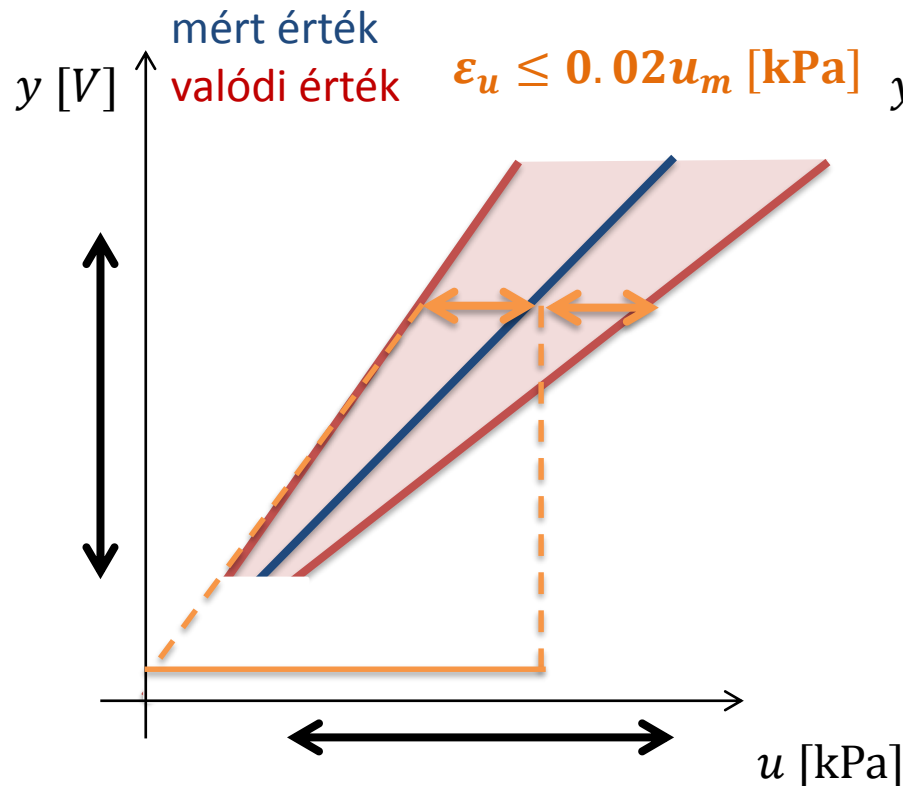
# Hiba jellemzése: abszolút hiba

- **mért értékben - kPa**
- **mérési tartomány arányában - %**
- **kimenet értékében – V**
- **kimeneti tartomány arányában - %FS, %VFS**

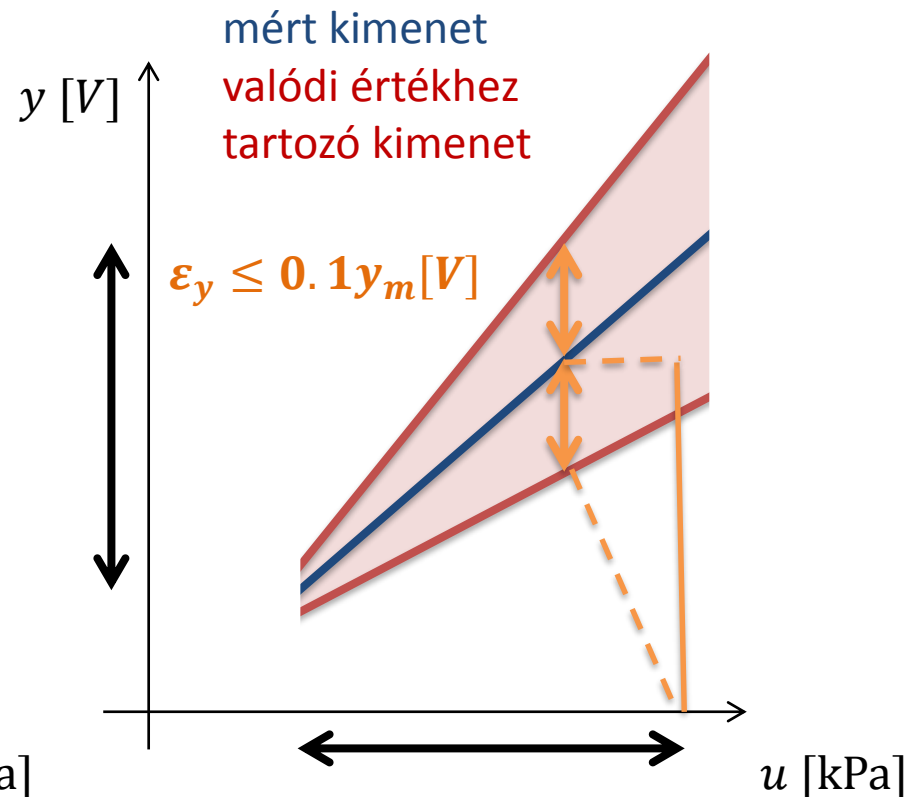


# Hiba jellemzése: relatív hiba

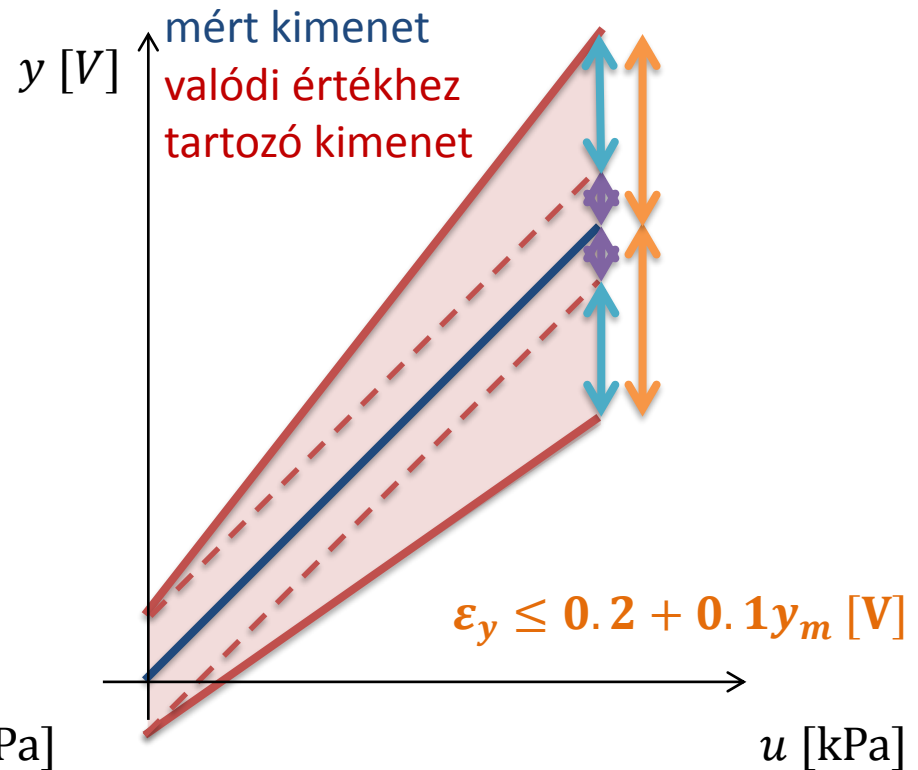
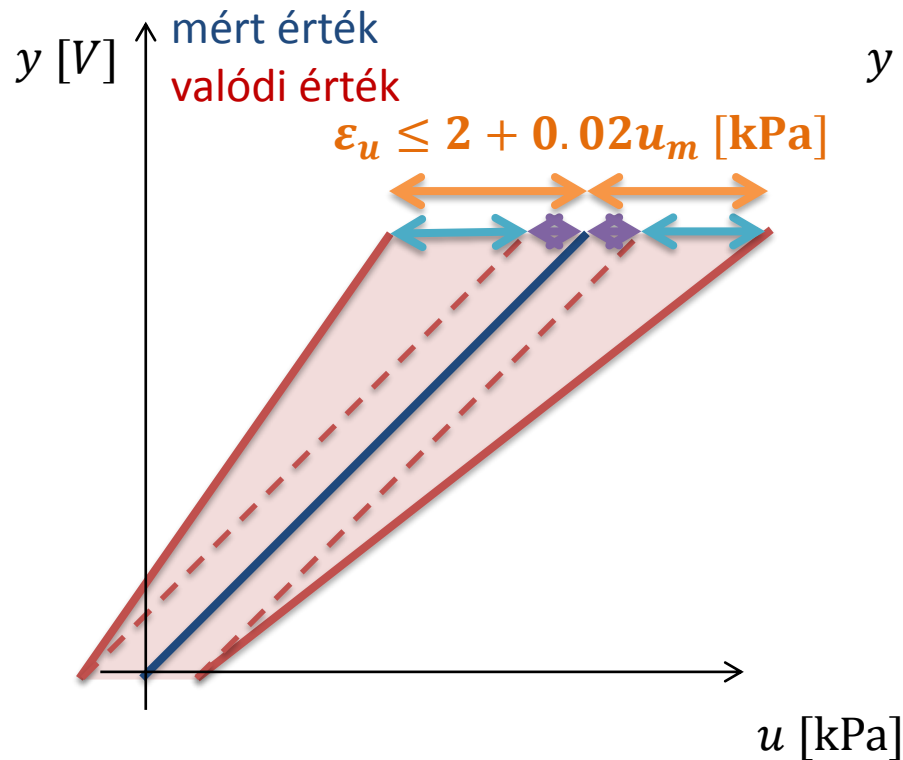
- mért érték %-ában



- mért kimenet %-ában

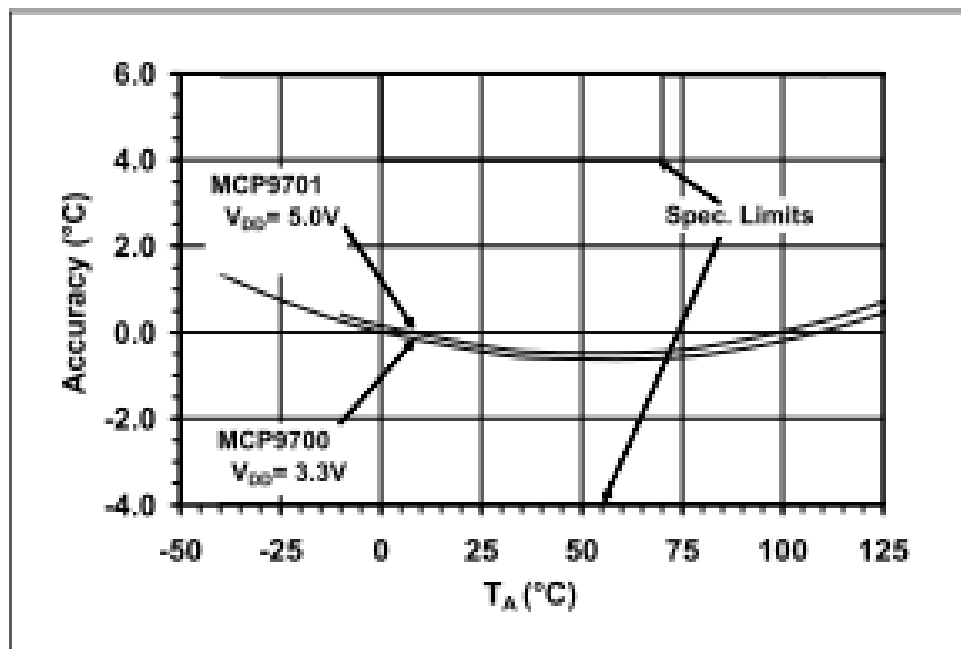


# Hiba jellemzése: kombinált abszolút és relatív hiba



# Hiba érvényessége

- Teljes mérési tartományon
- A mérési tartomány egy részén
- Adott környezeti munkapontban

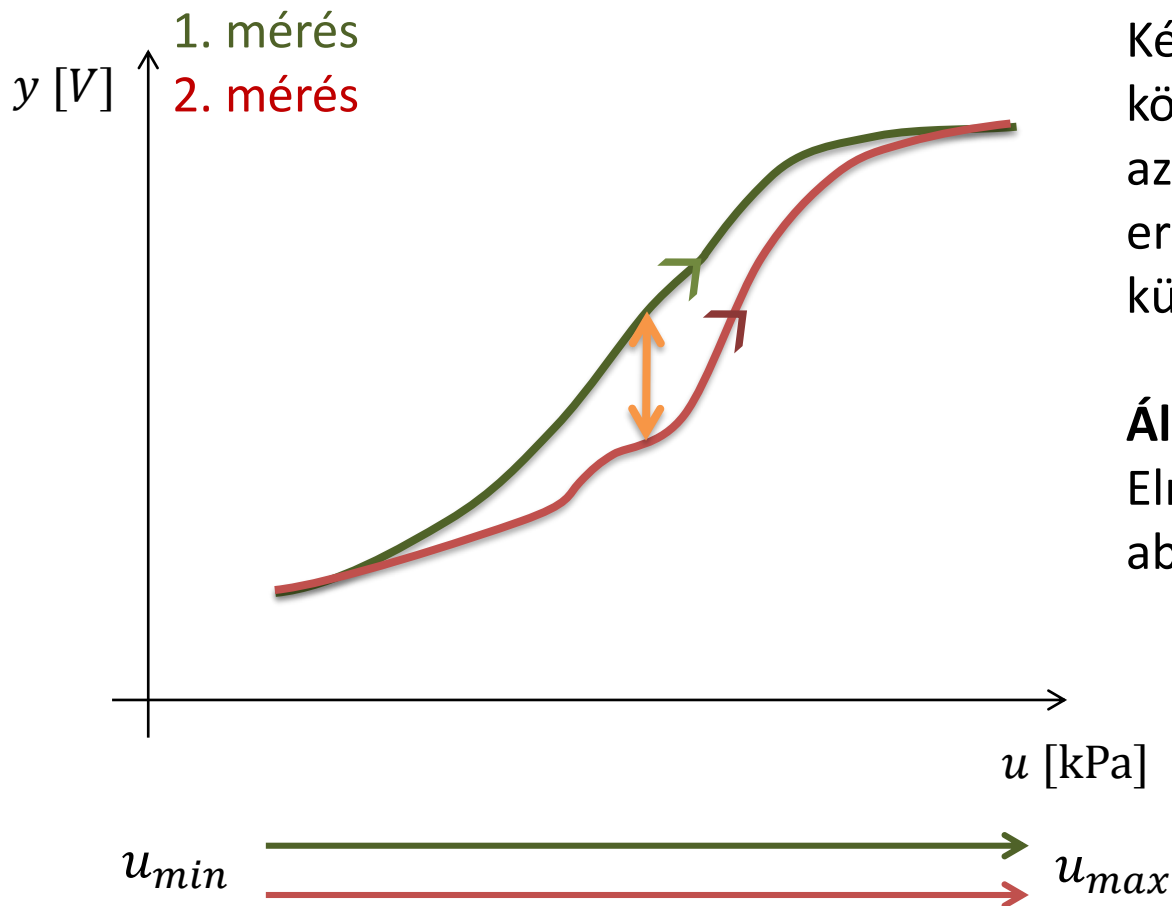


**Sensor Accuracy (Notes 1, 2)**

$T_A = +25^{\circ}\text{C}$	$T_{ACY}$	—	$\pm 1$	—	$^{\circ}\text{C}$
$T_A = 0^{\circ}\text{C to } +70^{\circ}\text{C}$	$T_{ACY}$	-2.0	$\pm 1$	+2.0	$^{\circ}\text{C}$
$T_A = -40^{\circ}\text{C to } +125^{\circ}\text{C}$	$T_{ACY}$	-2.0	$\pm 1$	+4.0	$^{\circ}\text{C}$

# Ismétlődési hiba

(*repeatability*)



## Definíció:

Két, azonos környezeti körülmények között végzett, azonos irányú kalibrációs ciklus eredményének legnagyobb különbsége.

## Általános jellemzés:

Elméleti karakterisztikától mért abszolút hibasáv.

# Hiszterézis-hiba

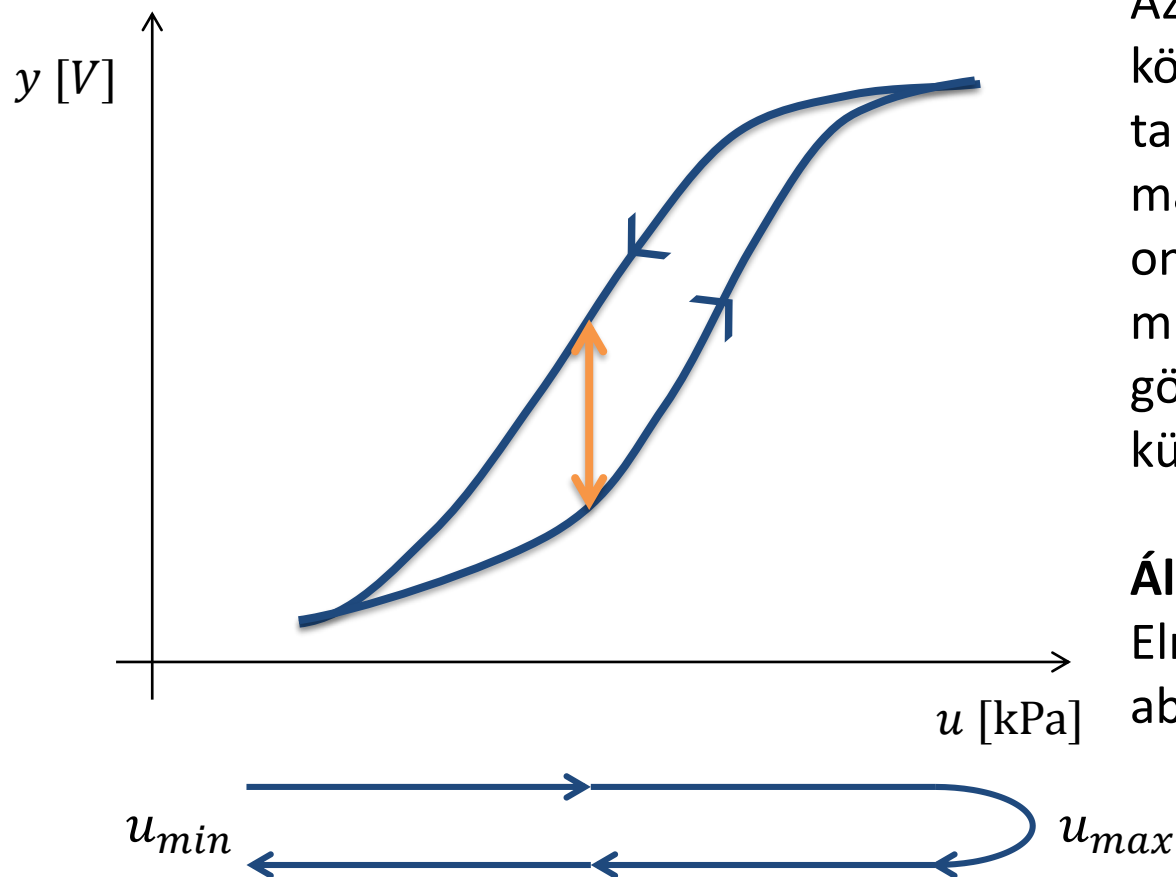
(*hysteresis*)

## Definíció:

Azonos környezeti körülmények között a bemenetet a mérési tartomány minimumáról a maximumára növelve, majd onnan azonos sebességgel a minimumra csökkentve a két görbe közti legnagyobb különbség.

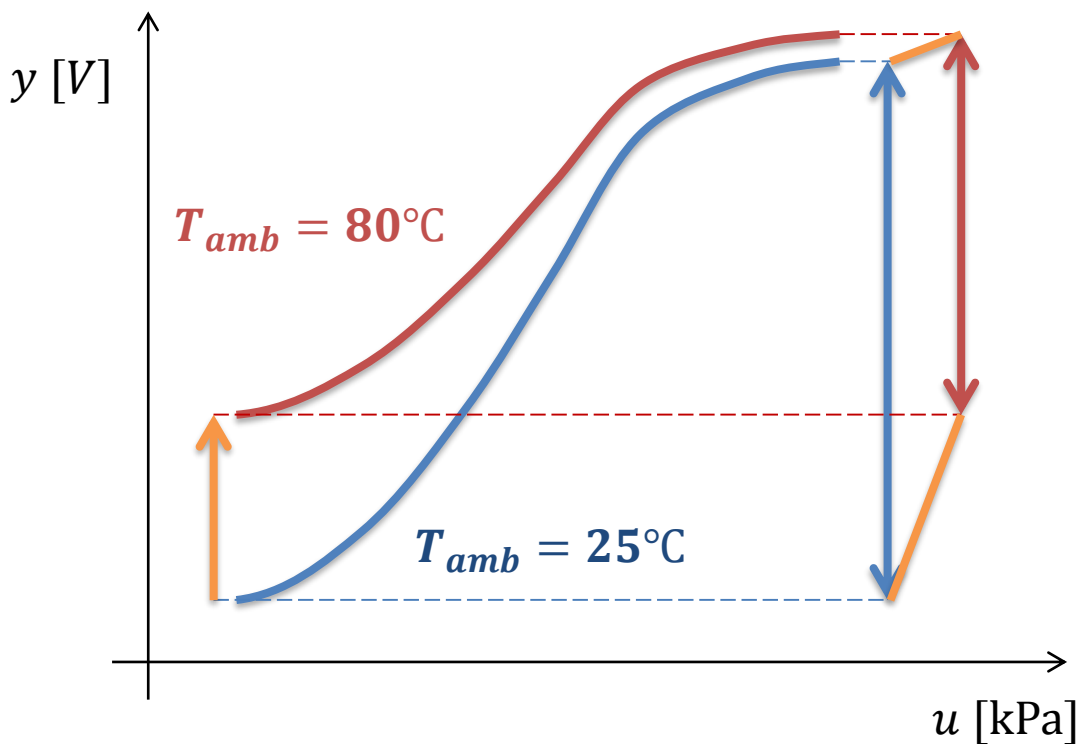
## Általános jellemzés:

Elméleti karakterisztikától mért abszolút hibasáv.



# Környezeti hőmérséklet változásának járulékos hibája

(thermal effect)



## Definíció:

Más-más környezeti hőmérsékleten felvett statikus karakterisztikák különbsége.

## Általános jellemzés:

Elméleti karakterisztikától mért hibasáv: abszolút nullpont (offset-) hiba és/vagy relatív hiba.



# Hosszútávú stabilitás

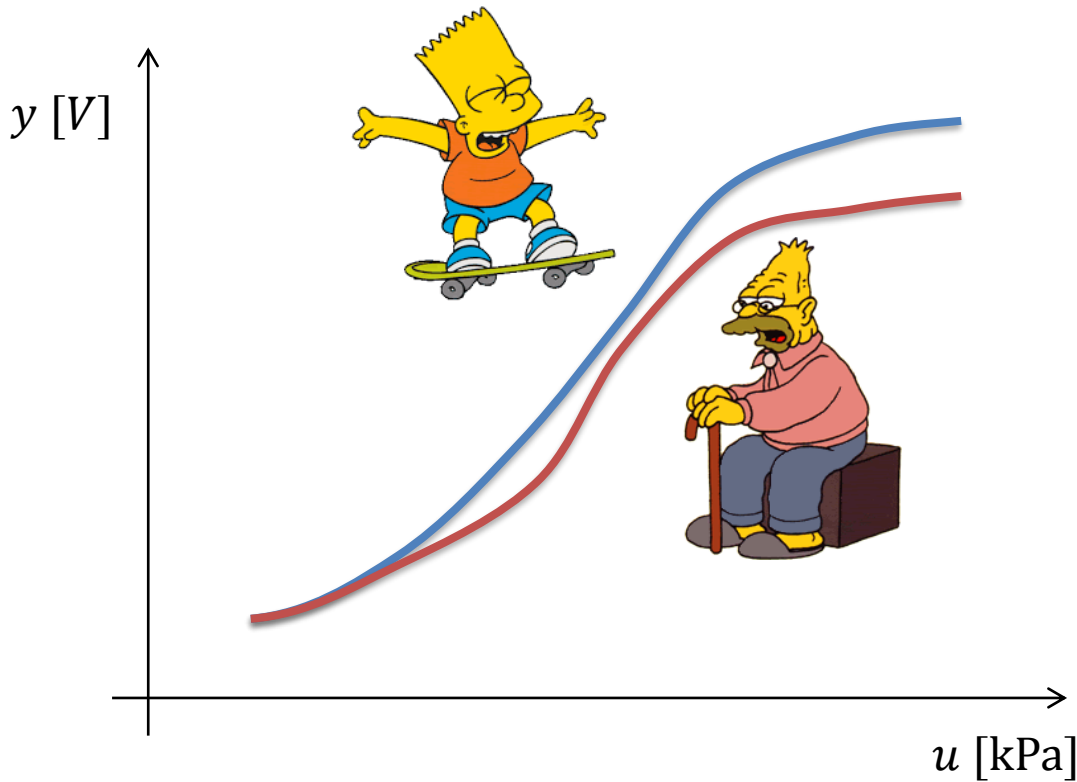
(*stability*  $\leftrightarrow$  *drift*)

## Definíció:


A szenzor öregedés okozta hibája.

## Általános jellemzés:

Elméleti karakterisztikától mért hibasáv adott környezeti hatások mellett.



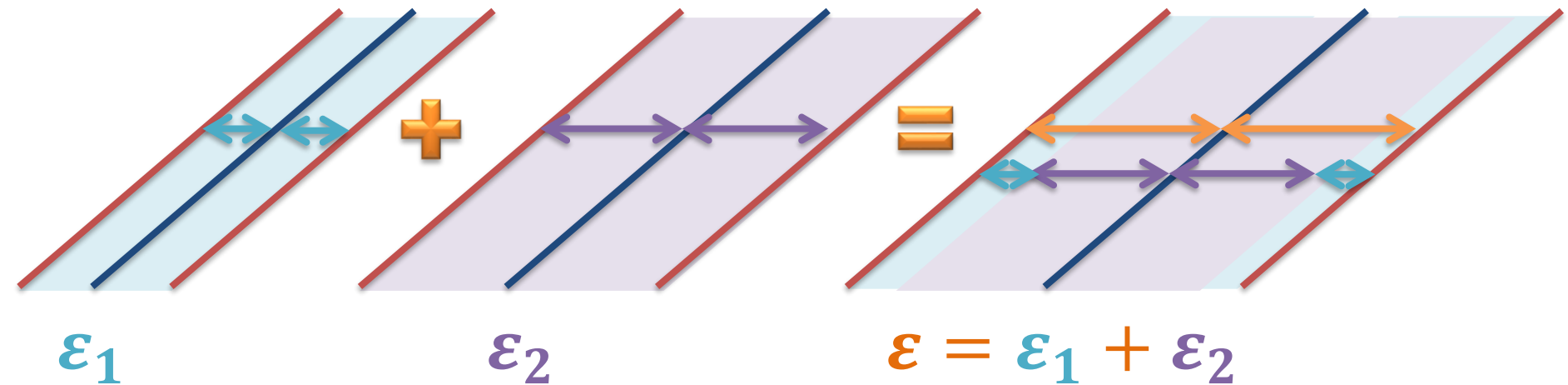
# Hibák megjelenése az adatlapon

- Ismétlődési hiba
  - Hiszterézis-hiba
  - Hőmérsékleti hiba
  - Stabilitás
- 
- The diagram consists of three nested curly braces on the right side of the list. The innermost brace is blue and groups the first two items. The middle brace is teal and groups the first three items. The outermost brace is purple and groups all four items. Each brace is labeled 'Pontosság (accuracy)' in a color matching the brace.
- Pontosság  
(accuracy)
- Pontosság  
(accuracy)
- Pontosság  
(accuracy)

*Nincs egységes konvenció, hogy milyen hibákat jelölnek külön!*

# Hibák összegzése

- Worst case összegzés



# Példa

## Operating Characteristics

**Table 1. Operating Characteristics** ( $V_S = 10\text{ V}_{DC}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted,  $P1 > P2$ )

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Units
Pressure Range <sup>(1)</sup>	$P_{OP}$	0	—	50	kPa
Supply Voltage <sup>(2)</sup>	$V_S$	—	10	16	$V_{DC}$
Supply Current	$I_O$	—	6.0	—	mAdc
Full Scale Span <sup>(3)</sup>	$V_{FS}$	38.5	40	41.5	mV
Offset <sup>(4)</sup>	—	-1.0	—	1.0	mV
Pressure Hysteresis (0 to 50 kPa)	—	—	$\pm 0.1$	—	$\%V_{FS}$
Temperature Hysteresis (-40° to 125°C)	—	—	$\pm 0.5$	—	$\%V_{FS}$
Temperature Coefficient of Full Scale	$TCV_{FS}$	-1.0	—	1.0	$\%V_{FS}$
Temperature Coefficient of Offset	$TCV_{OFF}$	-1.0	—	1.0	mV
Offset Stability <sup>(6)</sup>	—	—	$\pm 0.5$	—	$\%V_{FS}$

**Mekkora lesz a nyomásmérés kimeneti hibája?**

# Kimeneti hiba

1. A kimeneti tartomány legrosszabb esetben:  $V_{FS} = 41.5\text{mV}$

2. A kimeneti tartománytól függő hibák:

Pressure Hysteresis	$0.1\%V_{FS} =$	0.0415 mV
Temperature Hysteresis	$0.5\%V_{FS} =$	0.2075 mV
Temperature Coeff. FS	$1\%V_{FS} =$	0.4150 mV
Offset Stability	$0.5\%V_{FS} =$	0.2075 mV
<b>Összesen</b>		<b>0.8715 mV</b>

3. Abszolút hibák:

Offset	1 mV
Temperature Coeff. Offset	1 mV
<b>Összesen</b>	<b>2 mV</b>

4. Teljes hiba:

$$2.8715\text{mV} \approx 7\% V_{FS}$$

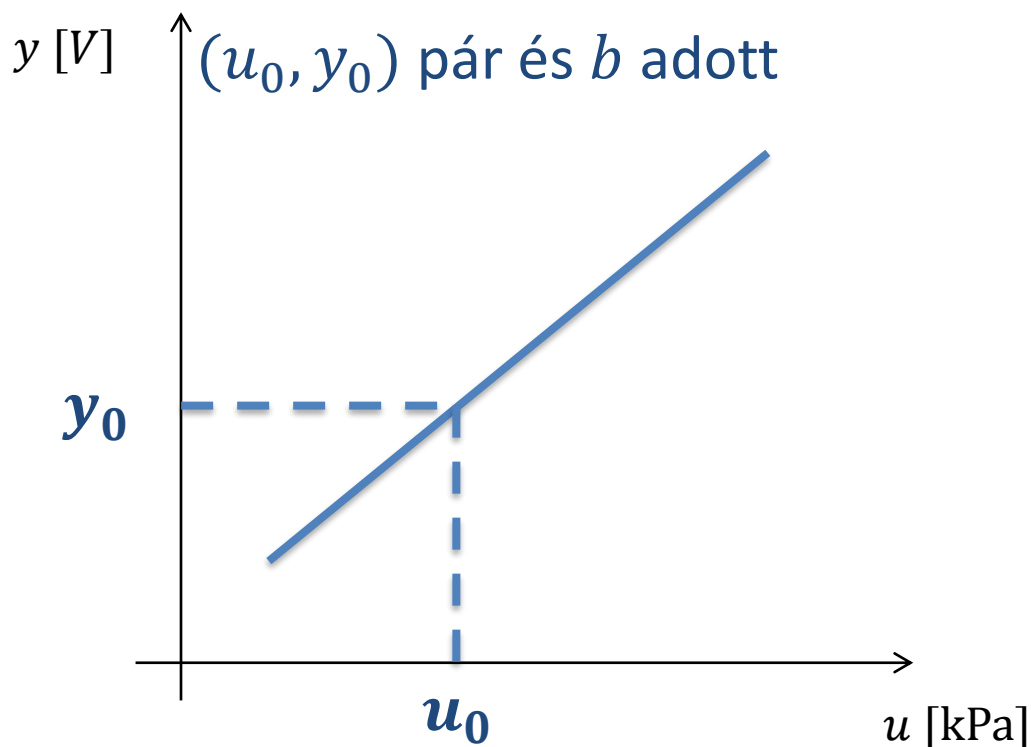
# Lineáris statikus karakterisztika

**Karakterisztika:**

$$y = f(u) = a + bu$$

**Érzékenység:**

$$s = \frac{df(u)}{du} = b$$



**Mért érték számítása a kimenetből:**

$$y = y_0 + b(u - u_0)$$

$$u = u_0 + \frac{(y - y_0)}{b}$$

# Példa

## Operating Characteristics

**Table 1. Operating Characteristics** ( $V_S = 10\text{ V}_{DC}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted,  $P1 > P2$ )

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Units
Pressure Range <sup>(1)</sup>	$P_{OP}$	0	—	50	kPa
Supply Voltage <sup>(2)</sup>	$V_S$	—	10	16	$V_{DC}$
Supply Current	$I_O$	—	6.0	—	mAdc
Full Scale Span <sup>(3)</sup>	$V_{FS}$	38.5	40	41.5	mV
Offset <sup>(4)</sup>	—	-1.0	—	1.0	mV
Pressure Hysteresis (0 to 50 kPa)	—	—	$\pm 0.1$	—	$\%V_{FS}$
Temperature Hysteresis (-40° to 125°C)	—	—	$\pm 0.5$	—	$\%V_{FS}$
Temperature Coefficient of Full Scale	$TCV_{FS}$	-1.0	—	1.0	$\%V_{FS}$
Temperature Coefficient of Offset	$TCV_{OFF}$	-1.0	—	1.0	mV
Offset Stability <sup>(6)</sup>	—	—	$\pm 0.5$	—	$\%V_{FS}$

**Mekkora lesz a nyomásmérés relatív hibája 30 kPa-on?**

**Már kiszámoltuk, hogy az abszolút kimeneti hiba 2.8715 mV**

# A nyomásmérés hibája

- Érzékenység:

$$s = \frac{40\text{mV}}{50\text{kPa}} = 0.8 \frac{\text{mV}}{\text{kPa}}$$

- Abszolút nyomáshiba:

$$\varepsilon_u = \frac{\varepsilon_y}{s} = 2.875\text{mV} \cdot \frac{1 \text{ kPa}}{0.8 \text{ mV}} = 3.59\text{kPa}$$

- A nyomásmérés relatív hibája:

$$\frac{3.59}{30} = 11.96\%$$

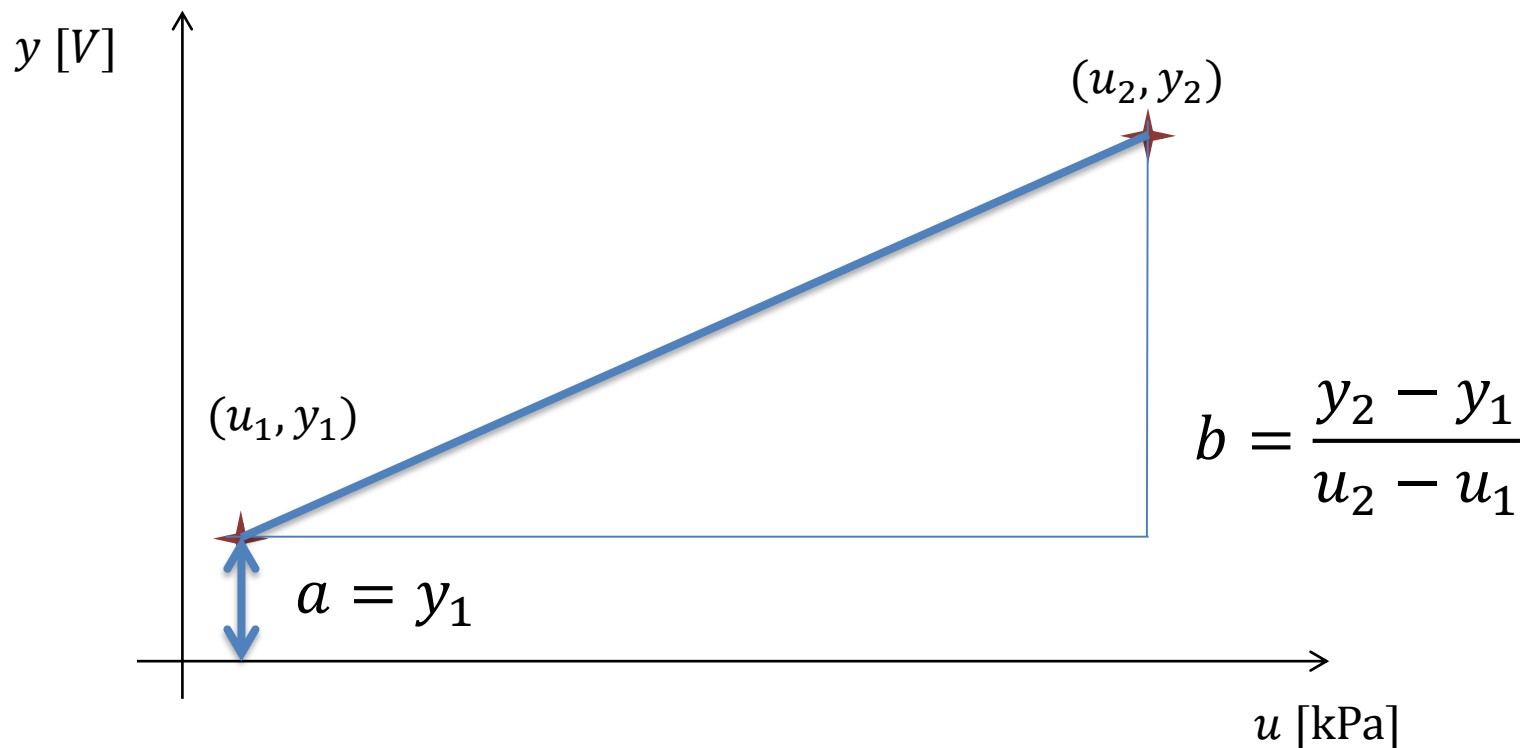


# Lineáris karakterisztika meghatározása

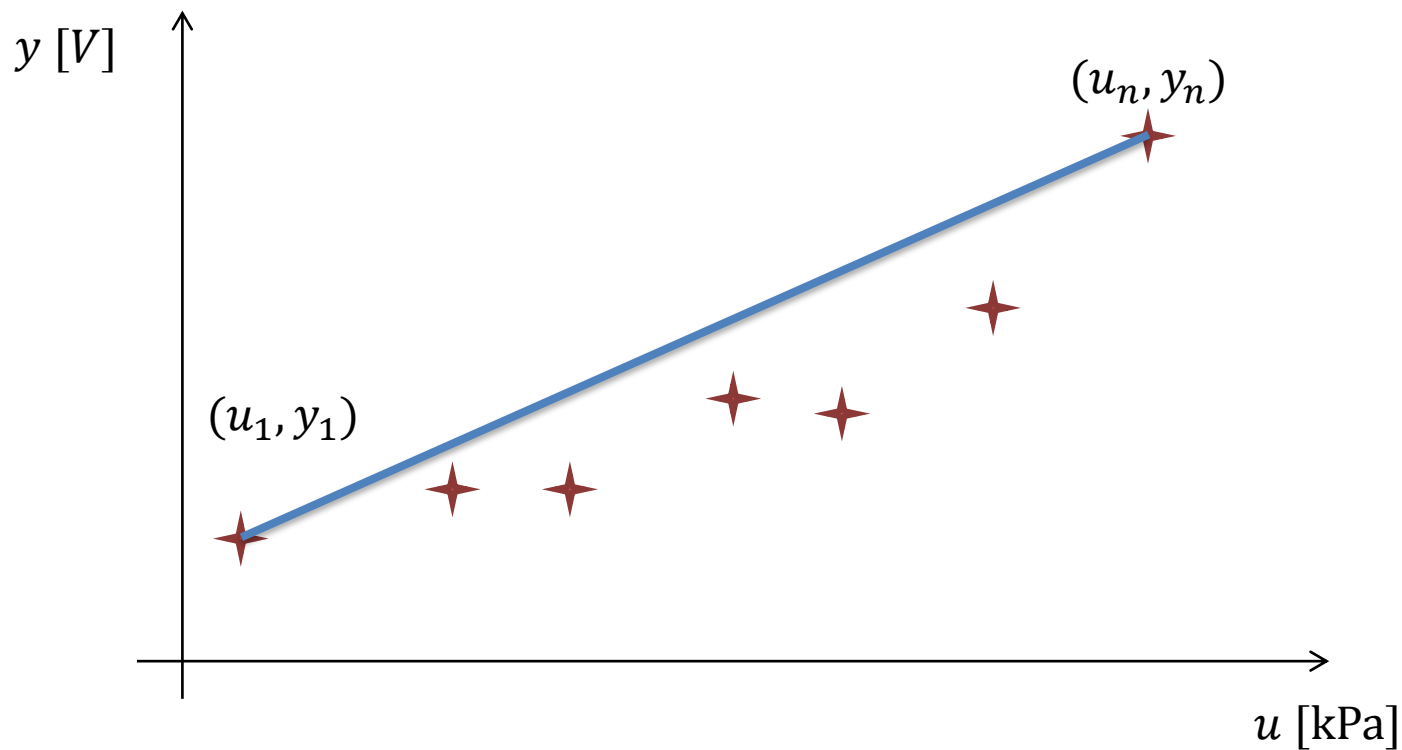
- Adott  $n \geq 2$  mérési pont:  $(u_i, y_i)$
- Hogyan határozzuk meg a lineáris karakterisztikát?

# Végpontokra illesztett egyenes

*End-Point Straight Line*



# Végpontokra illesztett egyenes

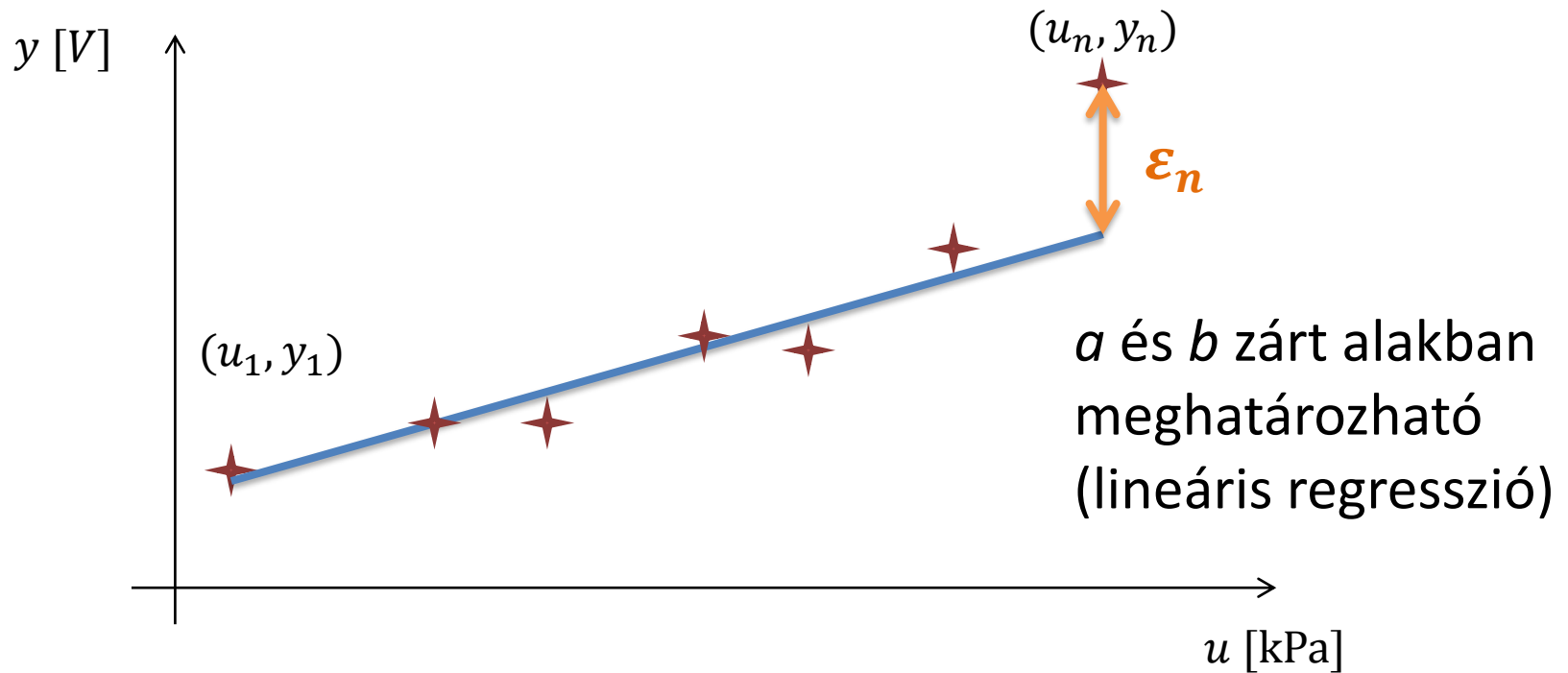


# Legjobbban illeszkedő egyenes

*Best Fit Straight Line (BFSL)*

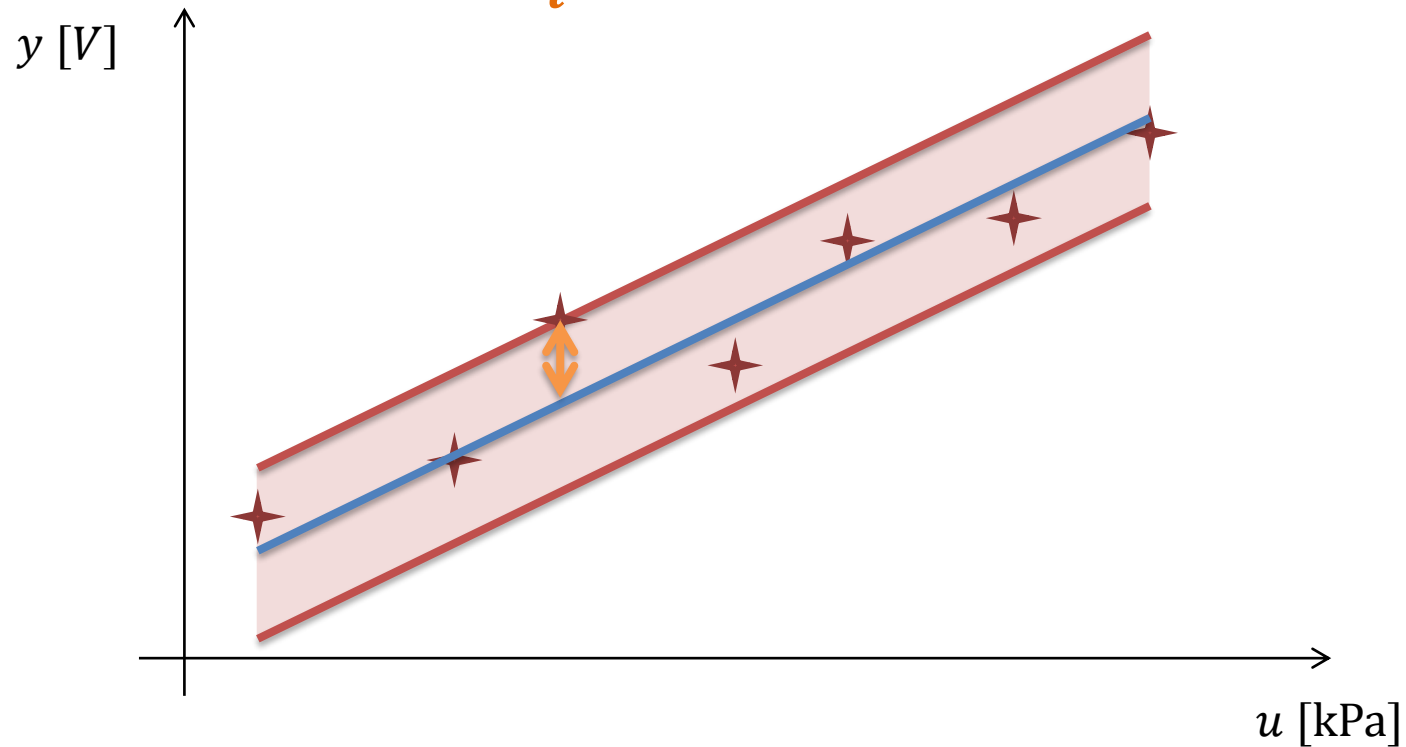
$$V(a, b) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (a + bu_i))^2$$

$$(a, b) = \arg \min V(a, b)$$



# Linearitási hiba

$$\varepsilon = \max_i |y_i - (a + bu_i)|$$



# Példa

Egy hőmérsékletérzékelőn az alábbi táblázatban megadott kalibrációs méréseket végeztük. Illesszünk a szenzorhoz végpontokra illeszkedő lineáris karakterisztikát és adjuk meg a hőmérséklet számításának képletét! Mekkora lesz a linearitási hiba a kimeneti tartomány arányában?

$u$ [°C]	30	47	93	100
$y$ [V]	2.4	3.1	5.2	5.9

# Megoldás

$u$ [°C]	30	47	93	100
$y$ [V]	2.4	3.1	5.2	5.9

- A bemeneti tartomány:  $100 - 30 = 70^{\circ}\text{C}$
- A kimeneti tartomány:  $5.9 - 2.4 = 3.5\text{V}$
- Az érzékenység:  $3.5/70 = 1/20 \text{ V}/^{\circ}\text{C} = 50 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$
- A  $0^{\circ}\text{C}$ -hoz tartozó feszültség:  $2.4 - 0.05 \cdot 30 = 0.9\text{V}$
- A karakterisztika:

$$y [\text{V}] = 0.9 + 0.05u [^{\circ}\text{C}]$$

- A hőmérséklet számításának képlete:

$$u [^{\circ}\text{C}] = 30 + \frac{y [\text{V}] - 2.4}{0.05} = 30 + 20(y - 2.4) = 20y - 18$$

# Megoldás

$u$ [°C]	30	47	93	100
$y$ [V]	2.4	3.1	5.2	5.9

- A karakterisztika:

$$y = 0.9 + 0.05u$$

- A linearitási hiba 47°C-on:

$$|3.1 - (0.9 + 0.05 \cdot 47)| = 0.15V$$

- A linearitási hiba 93°C-on:

$$|5.2 - (0.9 + 0.05 \cdot 93)| = 0.35V$$

- A teljes tartományra vonatkozó linearitási hiba:

$$\frac{0.35}{3.5} = 10\% \text{ FS}$$



# Nemlineáris karakterisztika leírása

- Nemlineáris függvény

$$y = y_0 e^{B\left(\frac{1}{u} - \frac{1}{u_0}\right)}$$

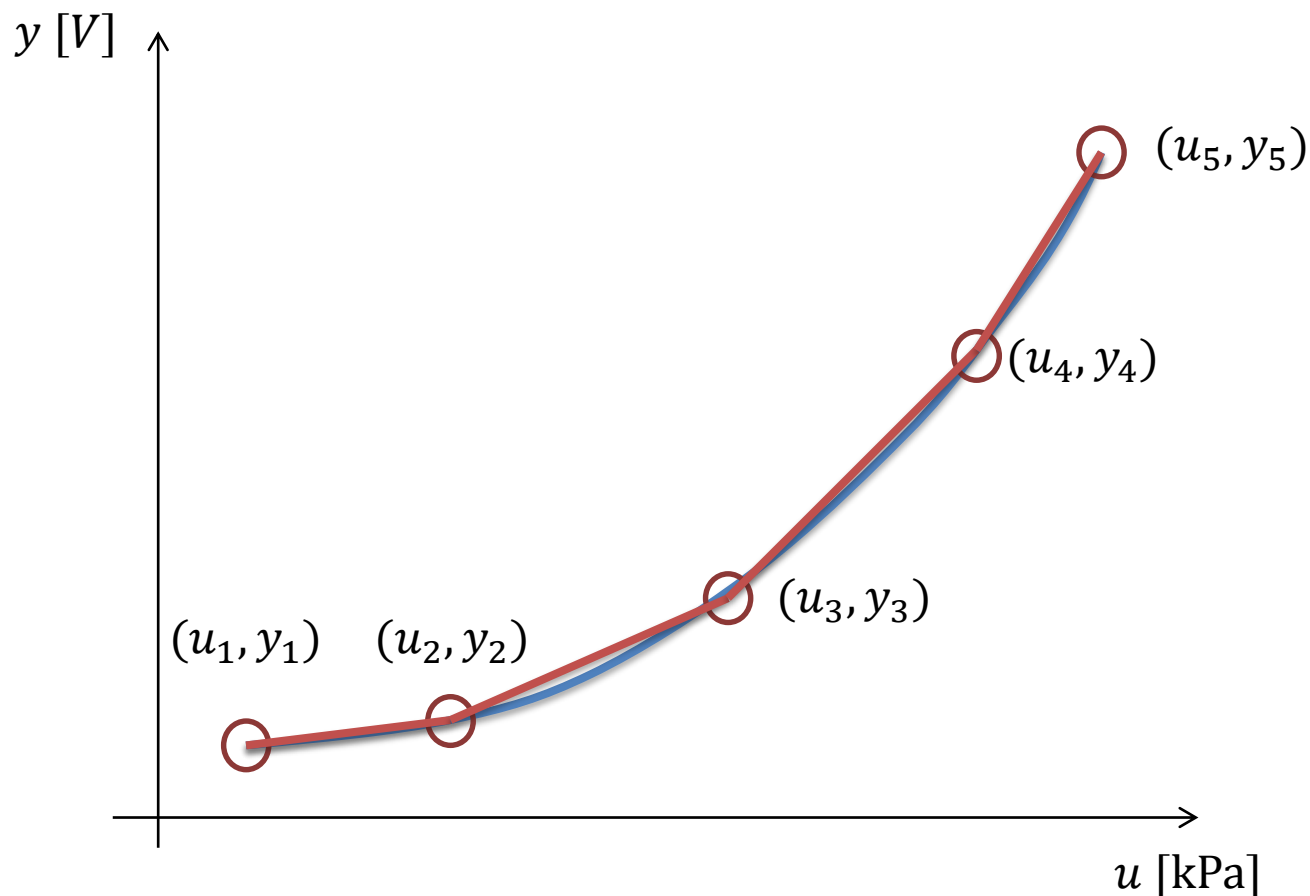
- Közelítés magasabb foksámú polinommal

$$y = a + bu + cu^2$$

- Megadás táblázattal (kvantálás)

$y_1$	$y_2$	...	$y_n$
$u_1$	$u_2$	...	$u_n$

# Lineáris interpoláció



$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$

# Példa

A jobb oldalon egy NTC termisztor statikus karakterisztikájának táblázata látható. Mekkora a lineáris interpolációból fakadó relatív hiba, ha a valódi hőmérséklet és a mért kimenet

(a) 12 °C-on 821.74  $\Omega$

(b) 107 °C-on 31.09  $\Omega$

$u$ [°C]	$y$ [ $\Omega$ ]
5	1110.220
10	887.257
15	713.463
20	577.375
25	470.000
30	384.800
35	316.757
40	262.177
45	218.069
50	182.297
55	153.150
60	129.249
65	109.551
70	93.281
75	79.750
80	68.446
85	58.996
90	51.036
95	44.332
100	38.640
105	33.790
110	29.664
115	26.123
120	23.091

# Megoldás

- (a) Mivel a mért kimenet  $887.26\Omega$  és  $713.46\Omega$  közé esik, így

$$u = 10 + \frac{15 - 10}{713.46 - 887.26} (821.74 - 887.26) = 11.88^{\circ}\text{C}$$

$$\text{A relatív hiba: } \varepsilon = \left| \frac{12 - 11.88}{12} \right| = \mathbf{1\%}$$

- (b) Mivel a mért kimenet  $29.67\Omega$  és  $33.79\Omega$  közé esik, így

$$u = 105 + \frac{110 - 105}{29.67 - 33.79} (31.09 - 33.79) = 108.28^{\circ}\text{C}$$

$$\text{A relatív hiba: } \varepsilon = \left| \frac{107 - 108.81}{107} \right| = \mathbf{1.19\%}$$

# Dinamikus karakterisztika

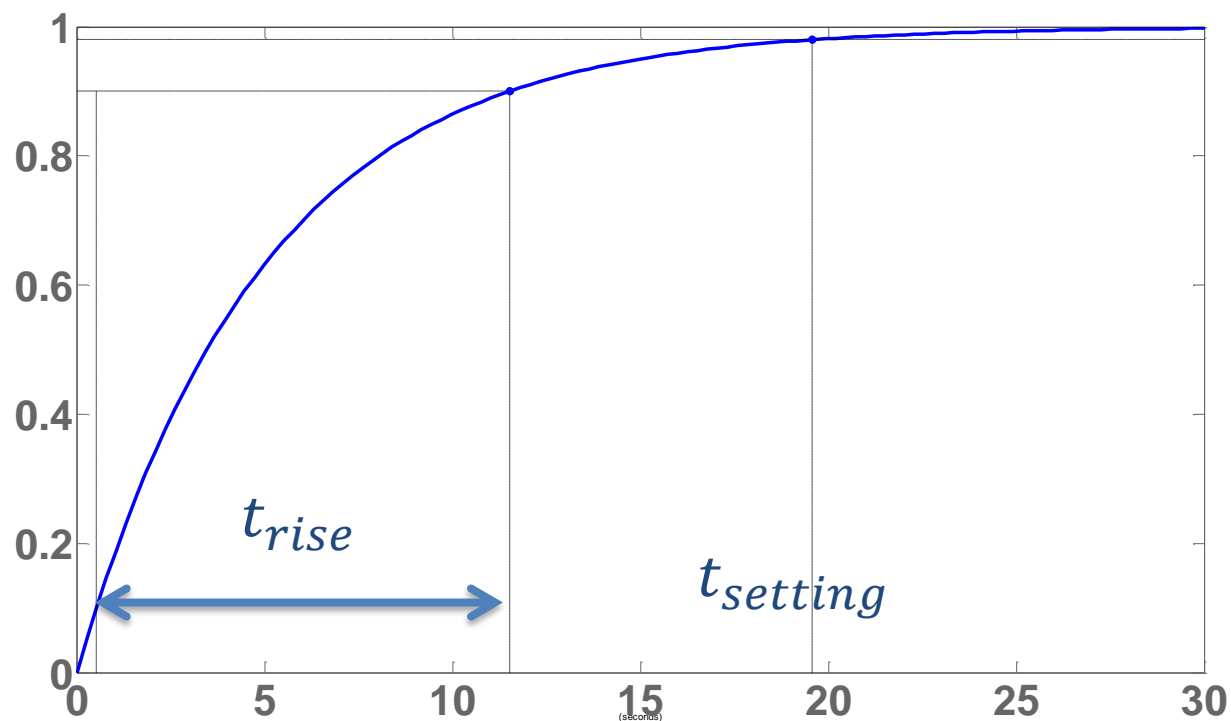
- A mért mennyiség nem állandó – hogyan követi ezt a szenzor?
- A szenzorok dinamikus karakterisztikája
  - egytárolós:  $W(s) = \frac{A}{1+sT}$
  - kéttárolós:  $W(s) = \frac{A}{s^2T^2+2\xi Ts+1}$

# Jellemzés az időtartományban

- Hogyan követi a szenzor kimenete a bemenet változását?
- Éledési idő (*warm-up time*): a táp bekapcsolása után mennyi idővel érkezik érvényes mérési érték
- Ugrásválasz jellemzői
  - Időállandó (*time constant*)
  - Beállási idő (*setting time*): 2%, 5%
  - Felfutási idő (*rise time, response time*): 10% - 90%
  - Túllövés (*overshoot*, kéttárolós esetén)

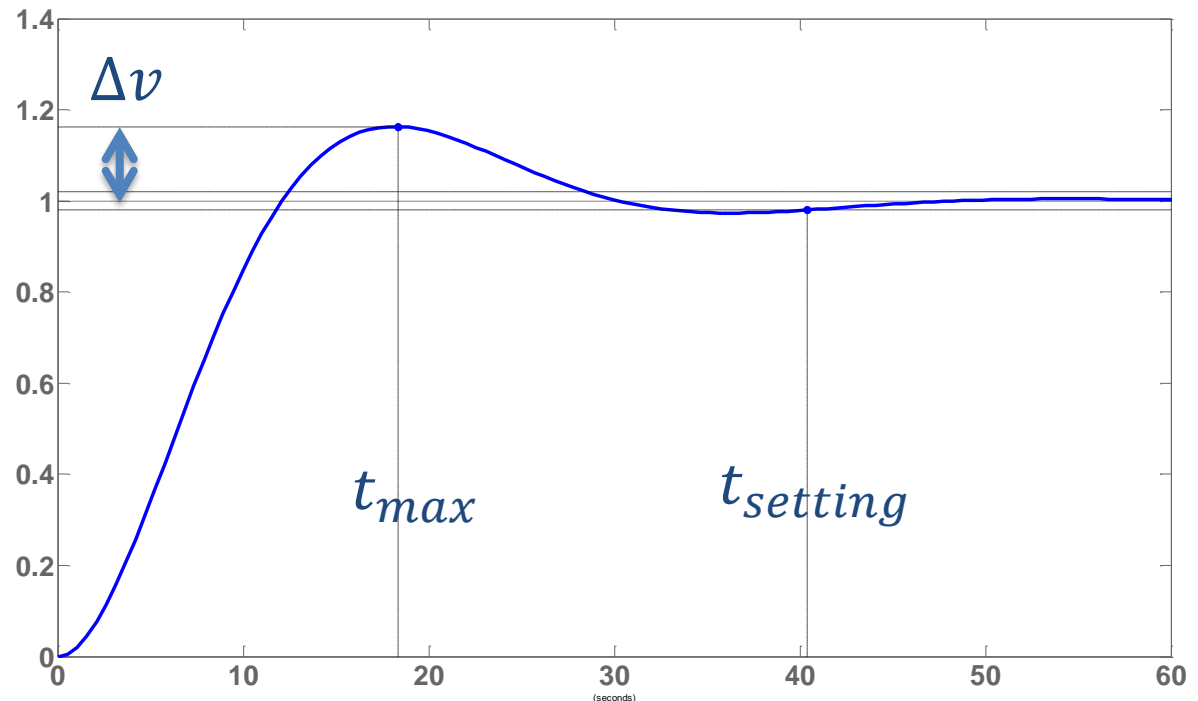
# Egytárolós karakterisztika

- Időállandó:  $T$ 
  - $y(T) \approx 0.63y_{\infty}$
  - $y(2T) \approx 0.87y_{\infty}$
  - $y(3T) \approx 0.95y_{\infty}$



# Kéttárolós karakterisztika

- Csillapítatlan sajátfrekvencia:  $\omega_0$ ; csillapítás:  $\xi$
- Beállási idő:  $T_{2\%} \approx \frac{4}{\omega_0 \xi}$
- Túllövés:  $\Delta V = \exp - \frac{\pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$



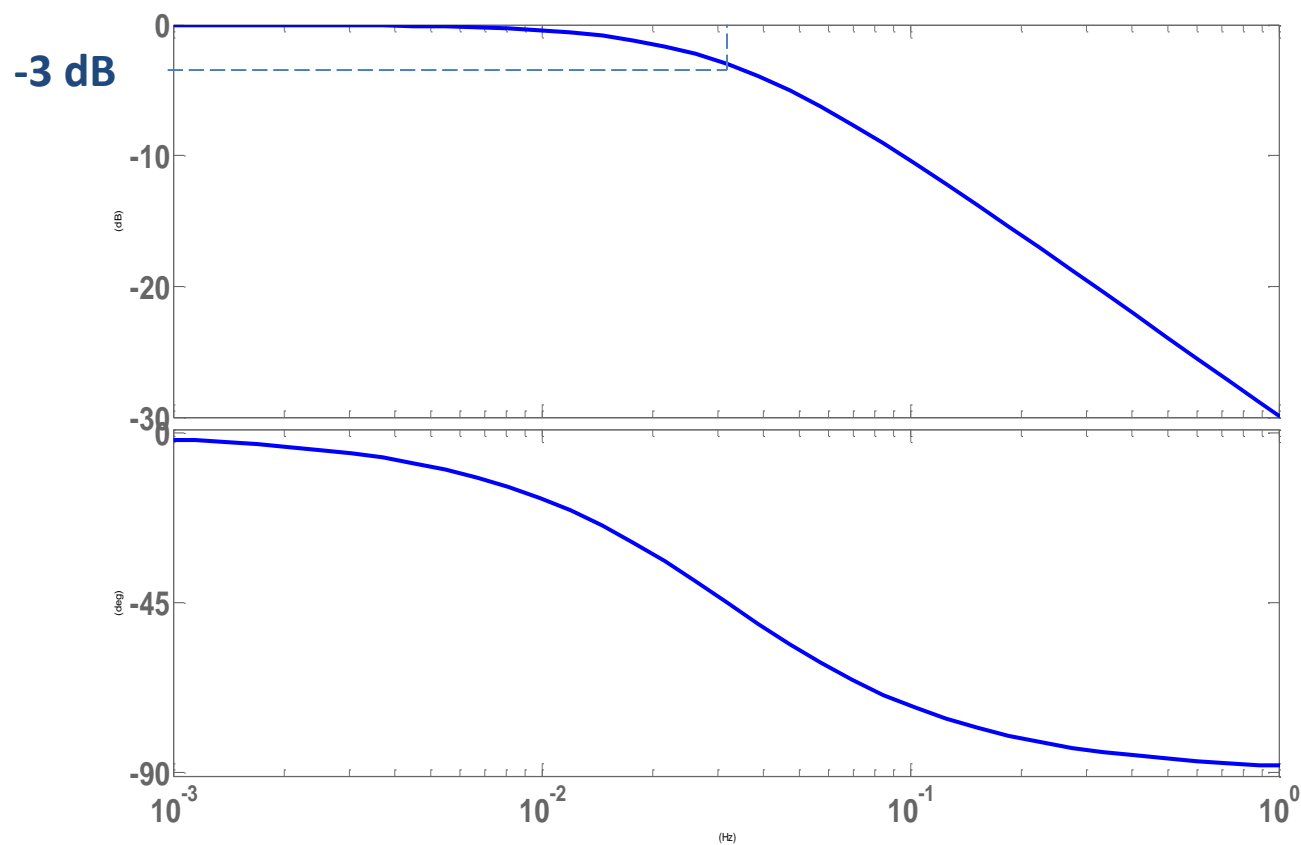


# Jellemzés a frekvenciatartományban

- Milyen gyors jelet képes követni a szenzor kimenete?
- Bode-diagram jellemzői
  - Vágási frekvencia (*cutoff frequency*): ált. –3dB-nél
  - Rezonancia-frekvencia (ha van)

# Egytárolós karakterisztika

$$-f_c \approx \frac{0.159}{T} [\text{Hz}]$$



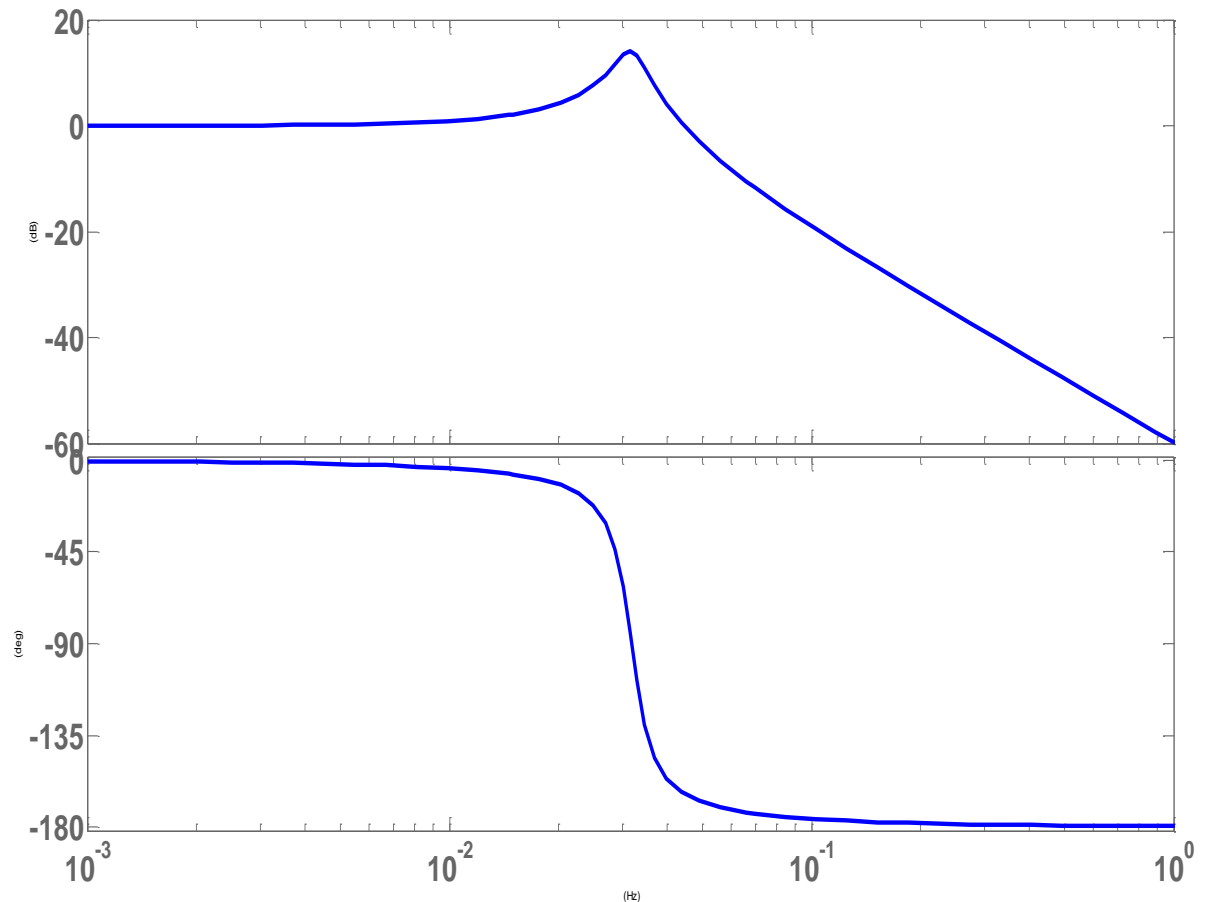
# Kéttárolós karakterisztika

- Rezonancia:

- $\xi \leq \frac{\sqrt{2}}{2}$

- $f_{rez} = \frac{\sqrt{1-2\xi^2}}{2\pi T} \text{ [Hz]}$

- Általában nem előnyös



# Hogyan válasszunk érzékelőt?

Házi meteorológiai állomást szeretnénk készíteni, melyhez egy 5V átfogású, 10 bites ADC-vel rendelkező mikrokontrollert használunk fel. Szeretnénk a  $-40 \dots + 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ -os tartományban minél pontosabban mérni a hőmérsékletet. Melyik érzékelőt válasszuk az alábbiak közül?

	Anna	Barbara	Cecile
Operating range	$-100 \dots + 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-70 \dots + 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-40 \dots 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Input range	$-100 \dots + 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-40 \dots + 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-40 \dots + 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Accuracy	$\pm 0.05\% \text{FS}$	$\pm 0.1\% \text{FS}$	$\pm 0.02 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Sensitivity	$50 \text{mV}/^{\circ}\text{C}$	$50 \text{mV}/^{\circ}\text{C}$	$50 \text{mV}/^{\circ}\text{C}$
Output at $25^{\circ}\text{C}$	6.25V	3.25V	3.25V

# Hogyan válasszunk érzékelőt?

Házi meteorológiai állomást szeretnénk készíteni, melyhez egy 5V átfogású, 10 bites ADC-vel rendelkező mikrokontrollert használunk fel. Szeretnénk a  $-40 \dots + 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ -os tartományban minél pontosabban mérni a hőmérsékletet. Melyik érzékelőt válasszuk az alábbiak közül?

	Anna	Barbara	Cecile
Operating range	$-100 \dots + 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-70 \dots + 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-40 \dots 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Input range	$-100 \dots + 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-40 \dots + 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-40 \dots + 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Accuracy	$\pm 0.05\% \text{FS}$	$\pm 0.1\% \text{FS}$	$\pm 0.02 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Sensitivity	$50 \text{mV}/^{\circ}\text{C}$	$50 \text{mV}/^{\circ}\text{C}$	$50 \text{mV}/^{\circ}\text{C}$
Output at $25^{\circ}\text{C}$	6.25V	3.25V	3.25V
<b>Abszolút hiba</b>	<b><math>0.2^{\circ}\text{C}</math></b>	<b><math>0.1^{\circ}\text{C}</math></b>	<b><math>0.02^{\circ}\text{C}</math></b>

# Megoldás

- Anna

- Bemeneti tartomány:  $400^{\circ}\text{C}$
- Kimeneti tartomány:  $400 \cdot 0.05 = 20\text{V}$
- A  $-40 \dots + 60^{\circ}\text{C}$ -os mérési tartományhoz tartozó kimeneti tartomány:  $100/400 \cdot 20 = 5\text{V}$   
(megfelelő referenciafeszültséggel a mikrokontrollerben lévő ADC-vel az 5-10V-os kimeneti tartomány kezelhető)
- Hiba:  $0.05 \cdot 0.01 \cdot 20\text{V} = 0.01\text{V} = 10\text{mV} = \mathbf{0.2^{\circ}\text{C}}$

# Megoldás

- Barbara
  - Bemeneti tartomány:  $100^{\circ}\text{C}$
  - Kimeneti tartomány:  $100 \cdot 0.05 = 5V$
  - Hiba:  $0.1 \cdot 0.01 \cdot 5V = 0.005V = 5mV = \mathbf{0.1^{\circ}\text{C}}$
- Cecile
  - Bemeneti tartomány:  $100^{\circ}\text{C}$
  - Kimeneti tartomány:  $100 \cdot 0.05 = 5V$
  - Hiba:  $\mathbf{0.02^{\circ}\text{C}}$

# Megoldás

	Anna	Barbara	Cecile
Abszolút hiba	0.2°C	0.1°C	0.02°C

- DE: mivel az ADC 10 bites, így a felbontás  $100/1024 \approx 0.1^\circ\text{C}$
- Ennél nagyobb pontosságú érzékelőt felesleges választani
- Érdeemes tehát a legalább 0.1°C-os pontosságú érzékelők közül a nagyobb megengedett bemeneti tartományút választani
- A legjobb választás tehát: Barbara



# Hogyan válasszunk szenzort?

- Viselje el a körülményeket
  - Működési tartomány
  - Környezeti hőmérséklet, páratartalom...
  - Tápellátás
- Mérési tartománya legyen minél közelebb a megkívánthoz
  - A tág méréshatárnak ára van: pontosságban, környezeti paraméterekre való érzékenységben, költségben
- Legyen pontos, de ne lőjünk túl a célon!
  - Helyiségtermosztáthoz felesleges a  $0.01^{\circ}\text{C}$ -os pontosság

# Hogyan olvassunk adatlapot?

## FIGYELMESEN!

- Ügyeljünk a mértékegységre!
- Vegyük figyelembe a paraméterek értelmezési tartományát!
- Soha ne a tipikus hibaértékekre méretezzünk!
- Olvassuk el a lábjegyzeteket, apró betűs részeket!
- Nézzük meg jól, pontosan melyik típusra vonatkoznak a paraméterek!