

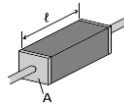
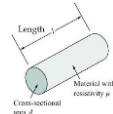
# MEMS Inteligentné senzory a aktuátory

Ing. Richard Balogh

## 4. Odporové snímače

### Elektrický odpor

$$R = \rho \frac{l}{A}$$



#### Závislosť od

1. geometrické rozmery
2. teploty

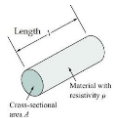
$$R = R_0(1 + \alpha \Delta t)$$

kovy: PTC  
polovodiče a oxidy: NTC  
ale aj  $l = l_0(1 + \gamma \Delta t)$

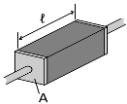
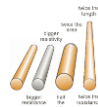
3. piezorezistívny jav
4. vlhkosť

### Elektrický odpor

#### 2.1 Závislosť na rozmeroch a deformácii

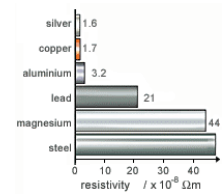


$$R = \rho \frac{l}{A}$$



### Elektrický odpor - tabuľky

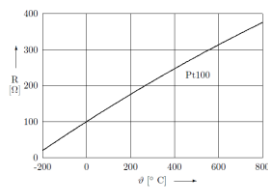
◆ Strain Gages	120Ω, 350Ω, 3500Ω
◆ Weigh-Scale Load Cells	350Ω - 3500Ω
◆ Pressure Sensors	350Ω - 3500Ω
◆ Relative Humidity	100kΩ - 10MΩ
◆ Resistance Temperature Devices (RTDs)	100Ω, 1000Ω
◆ Thermistors	100Ω - 10MΩ



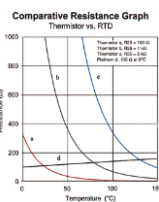
### Elektrický odpor

#### 2.2 Závislosť od teploty

$$R(\theta) = R_0(1 + A\theta + \beta\theta^2) \quad A = 3,9083 \cdot 10^{-4} \quad B = -5,775 \cdot 10^{-7}$$

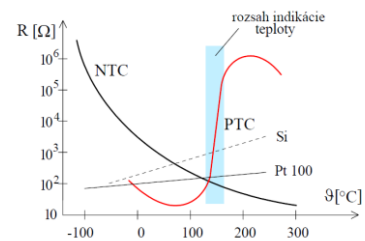


Obz. 33: Prevodová charakteristika Pt100.



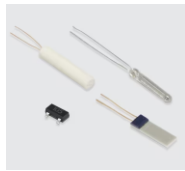
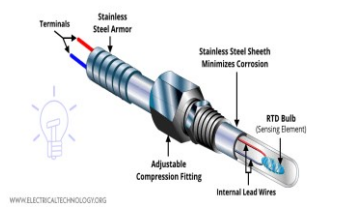
### Elektrický odpor

#### Závislosť od teploty



## 2. Resistive sensors 2.2 Odporové snímače teploty

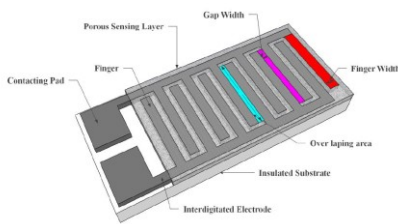
### RTD - Resistance Temperature Detector Construction, Types, Working & Applications



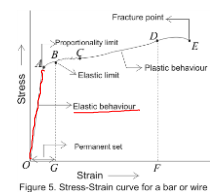
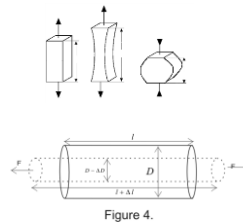
## 2. Resistive sensors Odporové snímače teploty



## Elektrický odpor Závislost' od vlhkosti



## Elektrický odpor Závislost' od deformácie



## Elektrický odpor

**Gage factors and the piezoresistive effect**

What is the relation between deformation and resistance?

**Gage factor:**  $F = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}$

$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial \rho} \Delta \rho + \frac{\partial R}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial R}{\partial A} \Delta A + \text{higher order terms}$

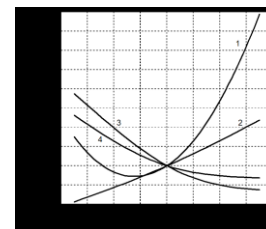
$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A}$

**Metals:** Changes in geometry dominate  
 $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A}$

**Semiconductors:** Changes in resistivity dominate  
 $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A}$

\* Strain causes differences in atomic spacing, which in turn causes changes in band gaps and thus  $\rho$ .

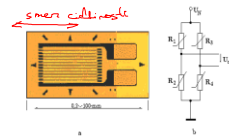
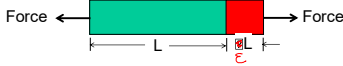
## Elektrický odpor 2.4 Závislost' od deformácie



Závislosť relatívnej zmeny odporu od relatívnej deformácie pre kovy.

- (1) P-typ  $\epsilon \approx 10^{-2}$  [m]
- (2) P-typ  $\epsilon \approx 2 \cdot 10^{-4}$  [m]
- (3) N-typ  $\epsilon \approx 10^{-2}$  [m]
- (4) N-typ  $\epsilon \approx 3,1 \cdot 10^{-4}$  [m]

## Tenzometer Strain Gauge



Def.:  
pomerné predĺženie (strain)  $\epsilon$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$



## Tenzometre

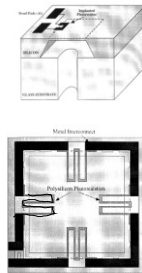
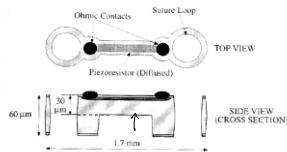
Tab.1 Prehľad vlastností naspávaných tenzometrov

Tenzometre	Fólové	Polovodičové	
Typ	KFC-2-D1-23 (R <sub>01</sub> )	KFC-5-350-C1-23 (R <sub>01</sub> , R <sub>02</sub> , R <sub>03</sub> )	KSP-2-E3 (R <sub>01</sub> )
Odpor R [Ω]	119.9±0.4	350±0.6	110±2%
Súčiniteľ deformáčnej citlivosti K	2.11	2.1±1%	124±3%
Teplotný súčiniteľ deformáčnej citlivosti α <sub>0</sub> [1/°C]	≈ 0	≈ 0	0.14%
Teplotný súčiniteľ elektrického odporu α <sub>00</sub> [ppm/°C; 10 <sup>-6</sup> 1/°C]	1.8	1.8	13.8
Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti materiálu tenzometra α <sub>0</sub> [ppm/°C]	≈ 0	≈ 0	7-22
Výrobca	Kyowa Tokyo	Kyowa Tokyo	Kyowa Tokyo
Max. relatívne predĺženie ± [mm/m]	±3000	±3000	±2000
Dĺžka aktívnej mriežky [mm]	2	5	2
Poznámka	tepelná kompenzácia pre nanašaný materiál-hliník(23µm/m/°C)	tepelná kompenzácia pre nanašaný materiál-hliník(23µm/m/°C)	

## MEMS Tenzometre

Membrane type gauges: typical pressure sensor

### Implantable strain gauge



## Využitie tenzometrov Sila

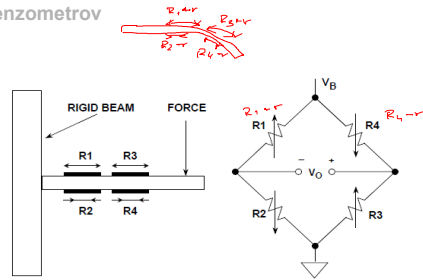
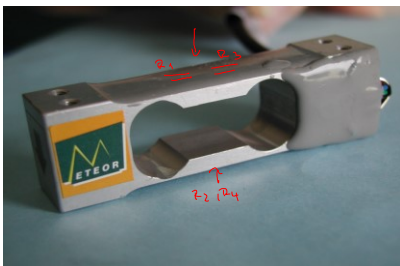


Figure 3.83: A beam force sensor using a strain gauge bridge

## Využitie tenzometrov Vázenie



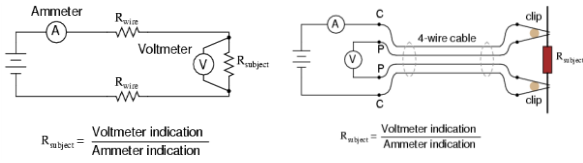
## Meranie odporu

- meranie U a I
- meranie U (konšt. I)
- prevod na frekvenciu
- mostíkové zapojenia



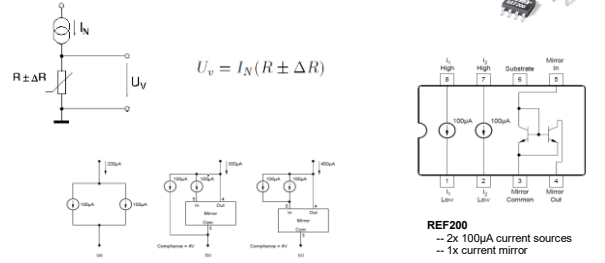
Meranie odporu

**Meranie napätia a prúdu**



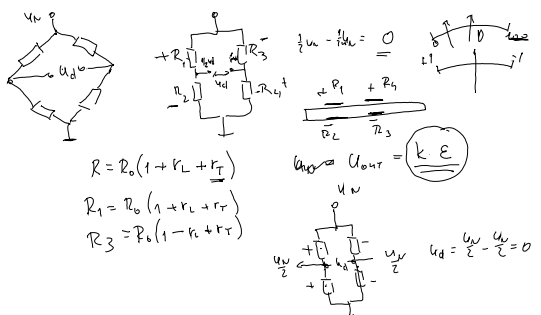
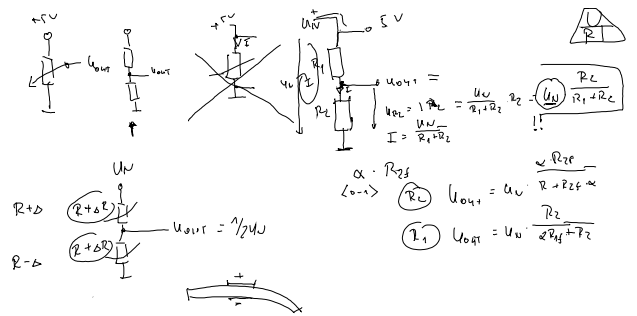
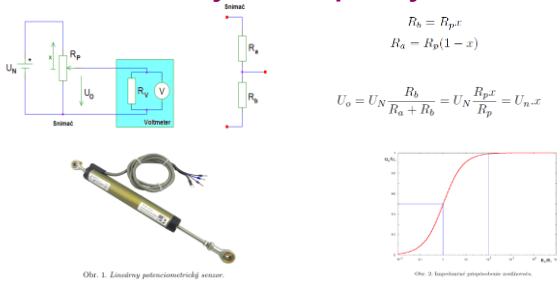
Meranie odporu

**Meranie napätia / zdroj prúdu**



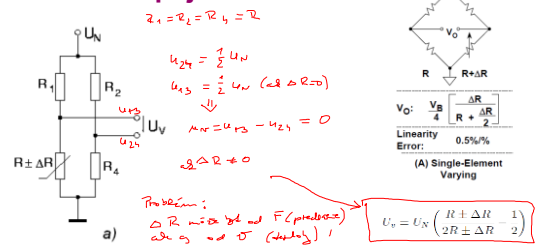
Meranie odporu

**Potenciometrický snímač polohy**

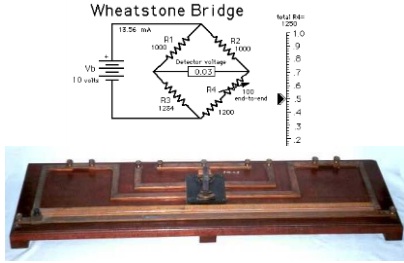


Meranie odporu

**Mostíkové zapojenia**

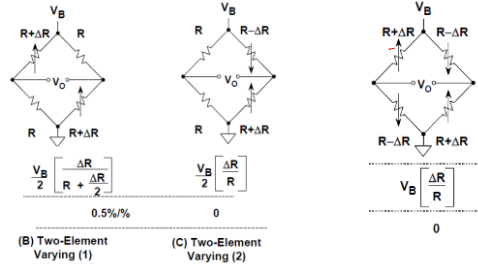


Mostíkové zapojenia  
Wheatstonov mostík  
The Differential Resistance Measurer

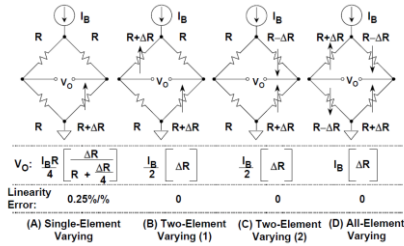


Meranie odporu  
Mostíkové zapojenia

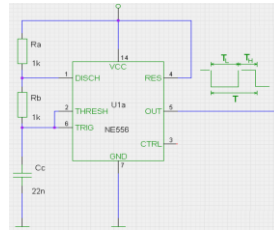
*to je zapojenie odmiatky odporu*



Meranie odporu  
Mostíkové zapojenia



Meranie odporu  
Prevod na frekvenciu



$$f = \frac{1,429}{C_c(R_a + 2R_b)}$$

$\Delta R_c \Rightarrow \Delta f$

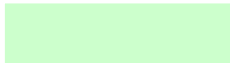
$$T_H = 0,7(R_a + R_b)C_c$$

$$T_L = 0,7R_b C_c$$

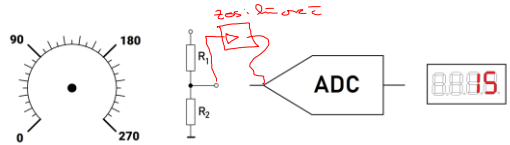
Zaťažovacia konštanta

Zaťažovacia konštanta  $D$  [ $W \cdot K^{-1}$ ] predstavuje príkon  $P$ , potrebný k ohriatiu senzora o teplotu  $\Delta \theta = 1K$  nad teplotu okolitého prostredia.

Max. hodnota meracieho prúdu

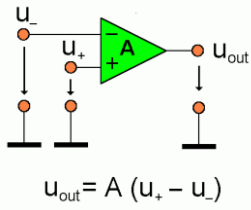


Príklad 1: meranie



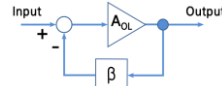
Uhol	N
[°]	[-]
0	0
90	5
180	10
270	15

# Operačný zosilňovač operational amplifier, Op-Amp

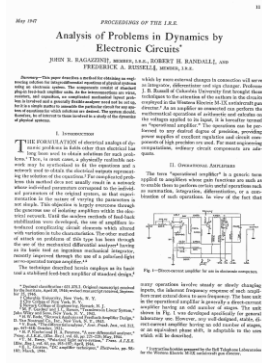


- |                                    |                                      |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Ideálny zosilňovač:                | Reálny zosilňovač:                   |
| 1) $A = \infty$                    | 1) $A = 10^5 \dots 10^9$             |
| 2) $R_{vst} = \infty$              | 2) $R_{vst} = -M\Omega$              |
| 3) $R_{výst} = 0$                  | 3) $R_{výst} = -\Omega$              |
| 4) $f_{max} = \infty$              | 4) $f_{max} = \text{MHz}$            |
| 5) $U_{out} = 0$ ak $U_{diff} = 0$ | 5) $U_{out} = U_V$ ak $U_{diff} = 0$ |
| 6) $U_{max} = \infty$              | 6) $U_{max} = V_{cc}$                |

# 11. História Prvé pokusy

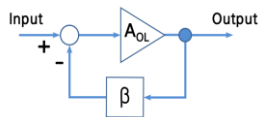


Dr. C. A. Lovell (Bell Telephone Laboratories)  
navrhol operačný zosilňovač pre stabilizáciu zosilnenia

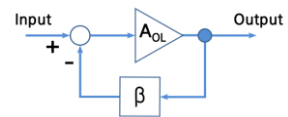


# 11. História Spätná väzba - feedback

- Zosilnenie obvodu je menej citlivé na zmeny hodnôt jednotlivých súčiastok
- Vplyv šumov je menší
- Dá sa znížiť nelineárne skreslenie
- Môžeme ovplyvniť vstupnú aj výstupnú impedanciu
- Môžeme rozšíriť šírku pásma zosilňovača



# Spätná väzba



$$U_{OUT} = (u_{INP} - \beta U_{OUT}) \cdot A_{OL}$$

$$U_{OUT} = u_{INP} A_{OL} - U_{OUT} \beta A_{OL}$$

$$U_{OUT} + U_{OUT} \beta A_{OL} = u_{INP} A_{OL}$$

$$U_{OUT} (1 + \beta A_{OL}) = u_{INP} A_{OL}$$

$$U_{OUT} = u_{INP} \frac{A_{OL}}{(1 + \beta A_{OL})}$$

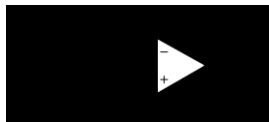
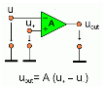
$$ak \beta A_{OL} \gg 1$$

$$U_{OUT} = u_{INP} \frac{1}{\beta}$$

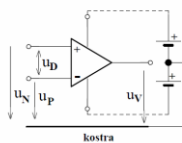
$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{1}{\beta}$  → nezmení sa so zmenou  $A_{OL}$

DOBRÁ spätná väzba môže byť aj ZÁPORNÁ

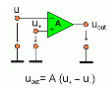
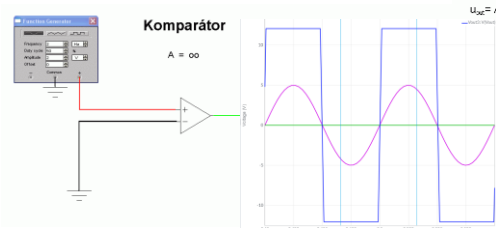
# Operačné zosilňovače napájanie



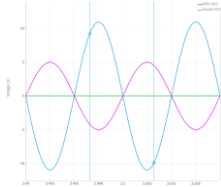
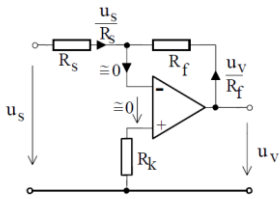
a.) symetrický vstup - asymetrický výstup  
Poznámka:  
Je to najbežnejšie použitie a zapojenie OZ



# Operačné zosilňovače



### Operačné zosilňovače Invertujúci zosilňovač



<https://www.multisim.com/content/nWw2WcCpMUn9hVdRu2aU/op-amp-comparator/open/>

### Operačné zosilňovače Invertujúci zosilňovač

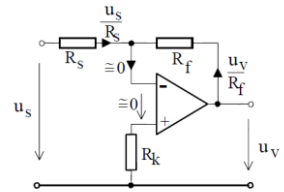
$$\frac{u_x}{R_s} = -\frac{R_f}{R_f} u_x$$

$$R_x = \frac{R_f R_s}{R_f + R_s}$$

$$R_{vst} = R_s \parallel R_{vyst} \approx \frac{R_s}{\beta A_0}$$

*R<sub>k</sub> - kvôľa sv-ochi  
v- a - g-och*

- platí  $Asv \ll A_0$  ( $Asv < 0,01 A_0$ )
- pre odpory platí veľké - prúdy zvoznateľné s  $I_{no}$  malé - prúdy  $< I_{vmax}$



$$u_v = -\frac{R_f}{R_s} \cdot u_x$$

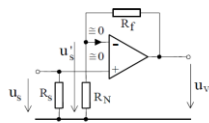
### Operačné zosilňovače Neinvertujúci zosilňovač

$$u'_s = \beta u_v = \left( \frac{R_N}{R_N + R_f} \right) u_v$$

$\beta$  - činiteľ spätnéj väzby

$$R_{vst} \approx R_{CM} \quad \text{v SP:} \quad R_{vst} = \frac{R_D}{1 + \beta A_0}$$

$$R_{vst} \approx \frac{R_s}{\beta A_0} \quad R_s = \frac{R_f R_N}{R_f + R_N}$$



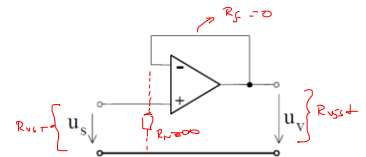
$$u_v = \left( \frac{R_f}{R_N} + 1 \right) \cdot u_x$$

ak:  $u_x \approx u'_s$

### Operačné zosilňovače Napätový sledovač

Neinvertujúci zosilňovač s  $A=1$

- $A$  je 1, teda  $u_s = u_v$
- $R_{vst} \approx 10^9 \Omega$ ,  $R_{vyst} \approx 10^{-3} \Omega$  (pre bipolár. vstupy)
- impedančný prevodník



$$u_v = \left( \frac{R_f}{R_N} + 1 \right) \cdot u_x = (0 + 1) u_s = u_s$$

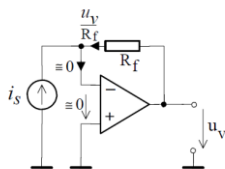
### Operačné zosilňovače Prevodník I → U

Paralelná sieť z napätového výstupu

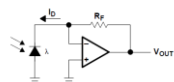
Riešenie:  $u_0 \approx 0$ ,  $i_{vst} \approx 0$

$R_{vst} \rightarrow 0$  a  $R_{vyst} \rightarrow 0$  (nulové sú pre ideálny OZ)

$$i_x = \frac{u_x}{R_f}$$



$$u_v = -i_x \cdot R_f$$



### Operačné zosilňovače Aktívny mostík

Časť mostíka tvoria SV obvody zosilňovača

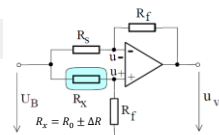
Riešenie:

$$\frac{R_f}{R_s} + 1 \gg \Delta R \Rightarrow u_v \approx -U_B \frac{R_f}{R_s} \frac{\pm \Delta R}{R_s + 1}$$

- menej súčiastok
- linearita
- tv nezávisí od pomeru Rf/Rs
- ľahšie vyváženie obvodu Rs

• treba kvalitný OZ s veľkým CMRR,  $A_0$  a malými  $I_{no}$

a ak zvolíme pomer odporov  $\frac{R_f}{R_s} \gg 1$



$$u_v \approx -(\pm \Delta R_x) U_B$$

## Operačné zosilňovače Integrátor



Prúd do OZ  $\approx 0 \rightarrow -i_c = i_s$

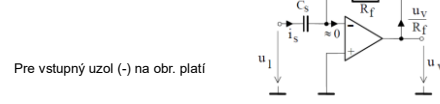
$$i_s = \frac{u_1}{R_s}; \quad i_c = C_f \frac{du_v}{dt}$$

$$\frac{u_1}{R_s} = -C_f \frac{du_v}{dt}$$

$$u_v = -\frac{1}{R_s C_f} \int u_1 dt$$

Poznámka: Kondenzátor - kvalitné dielektrikum, aby zvodové prúdy neboli na úrovni kludových prúdov. Nie sú vhodné elektrolyty.

## Operačné zosilňovače Derivátor



Pre vstupný uzol (-) na obr. platí

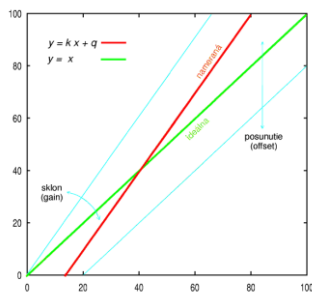
$$i_s = -\frac{u_x}{R_f}$$

$$C_s \frac{du_1}{dt} + \frac{u_x}{R_f} = 0 \Rightarrow$$

$$u_v = -R_f C_s \frac{du_1}{dt}$$

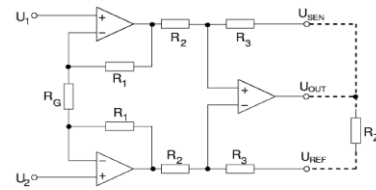
Poznámka: Kondenzátor - kvalitné dielektrikum, aby zvodové prúdy neboli na úrovni kludových prúdov. Nie sú vhodné elektrolyty.

### Nastavovanie K a q



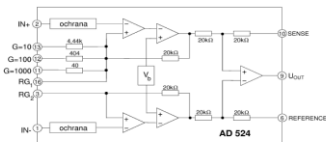
### Klasický prístrojový zosilňovač

$$U_v = K(u_1 - u_2) = K u_1 - K u_2$$



### Integrovaný obvod AD 524

Analog Devices, TESLA (MAC524), a pod.



Nelinearita	0,003%	Zosilnenie	1, 10, 100, 1000, A
CMRR	120 dB	Offset	50 μV
Drift	0,5 μV/°C	Sum	0,3 μV p-p
I vst	50 nA	R vst	10 <sup>9</sup> Ω

Ochrana vstupov (max. 3 mA pre ±36 V). Puzdro DIL 16