

3b.

# Kapacitní tlakové senzory

**Přednášející:** prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

[husak@fel.cvut.cz](mailto:husak@fel.cvut.cz),

<http://micro.fel.cvut.cz>

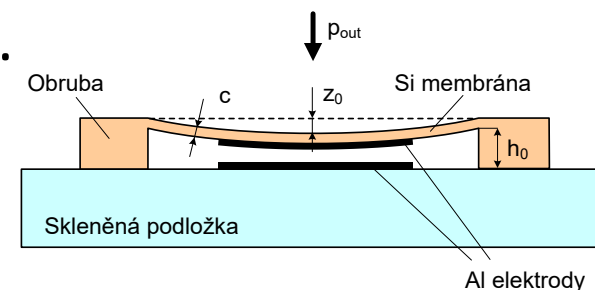
tel.: 2 2435 2267

**Cvičící:**

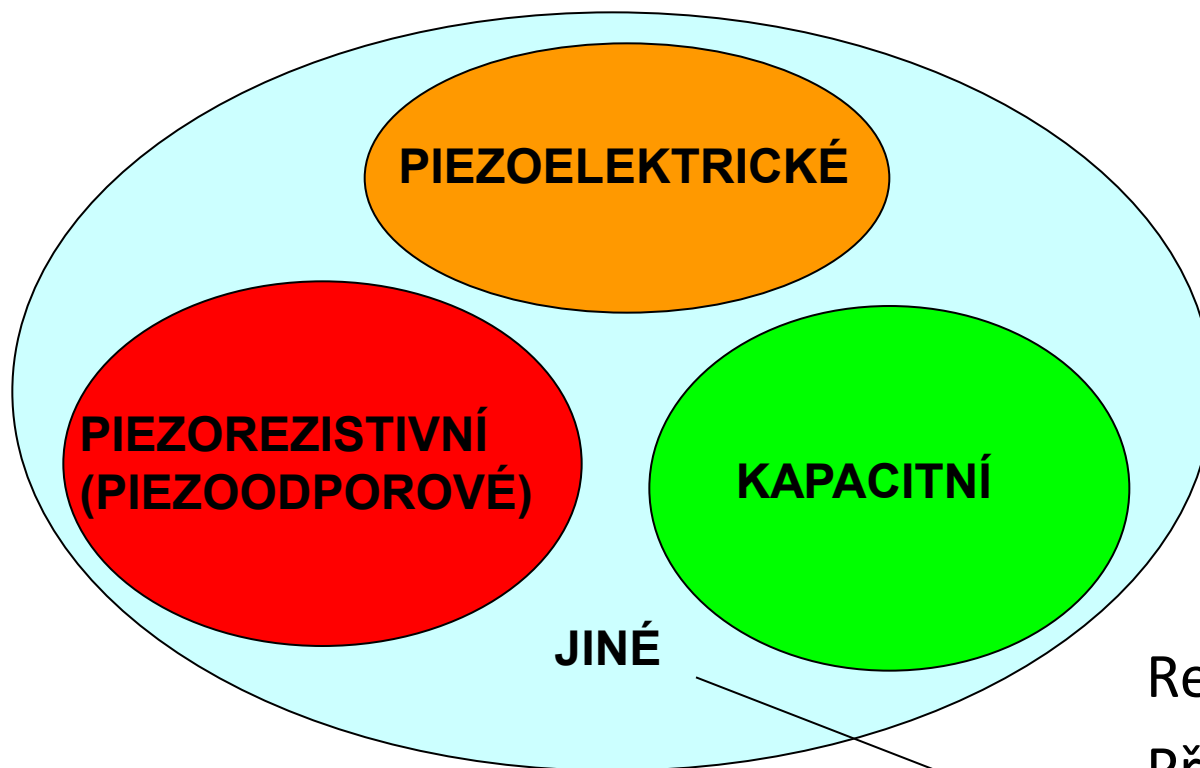
Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

Ing. Alexandr Laposa, Ph.D.

Ing. Tomáš Teplý



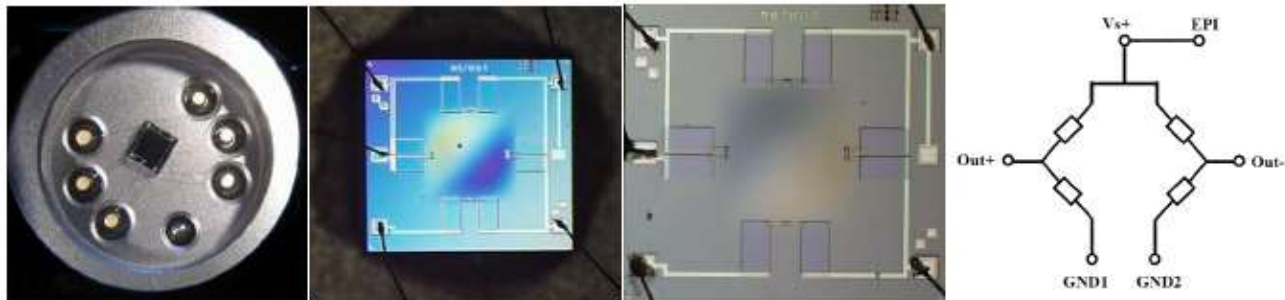
# Kapacitní tlakové senzory



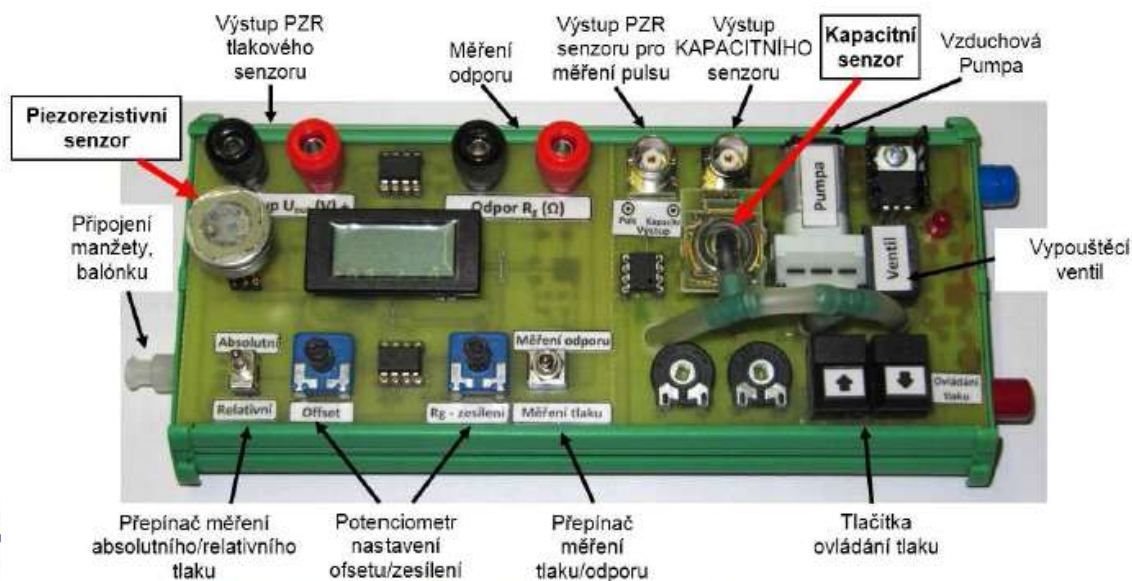
Rezonance  
Přechod pn  
Hallův  
Optické  
atd.

# Senzory tlaku

- Měření krevního tlaku pomocí piezorezistivních a kapacitních senzorů



Obr. 1. Absolutní tlakový senzor MS7801 v nerezovém pouzdře a detail čipu, zapojení Wheatstoneov:



Obr. 4. Přípravek s piezorezistivním a kapacitním tlakovým senzorem



[1] <http://www.lekarna.cz/tonometr-digitalni-tensoval-duo-control-ii-large/>



# Kapacitní tlakové senzory – princip a parametry

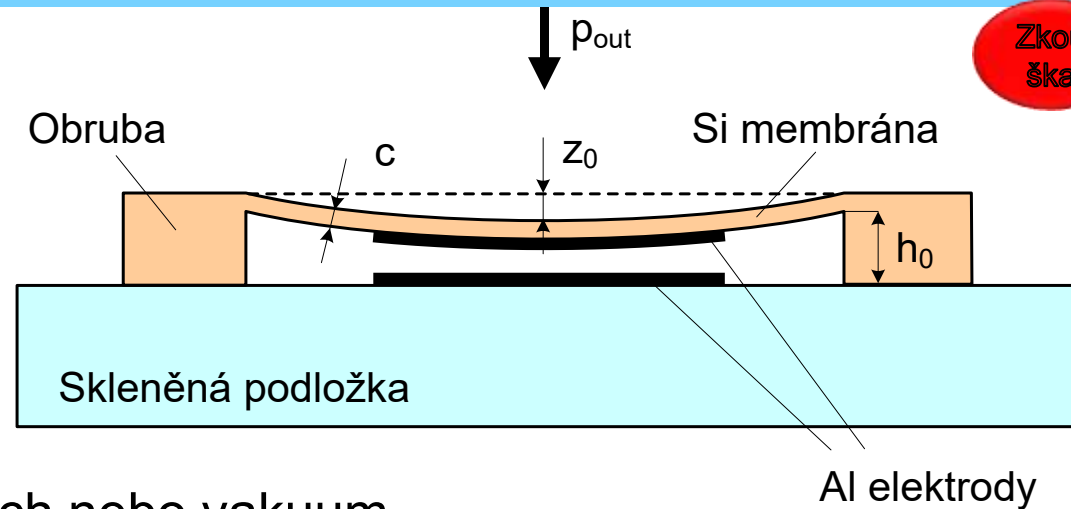


# Kapacitní tlakové senzory – princip činnosti

## Model kapacitního tlakového senzoru

### Princip činnosti

- Kondenzátor s jednou pružnou membránovou elektrodou
- Dielektrikum - nejčastěji vzduch nebo vakuum
- Změna vlastností dielektrika - změna  $\epsilon_r = f(p)$



$$C_o = \epsilon \frac{S}{h_o}$$

Změnu kapacity  $C$  lze určit dle vztahu

$$\Delta C = C - C_o = \iint_S \epsilon \frac{dxdy}{h_o - z(x, y)} - \epsilon \frac{S}{h_o} \quad \text{kde} \quad h = h_o - z$$

Citlivost senzoru

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta p}$$

? Nakreslete zjednodušený model kapacitního tlakového senzoru, napište rovnici pro citlivost kapacitního senzoru



# Kapacitní tlakové senzory – parametry

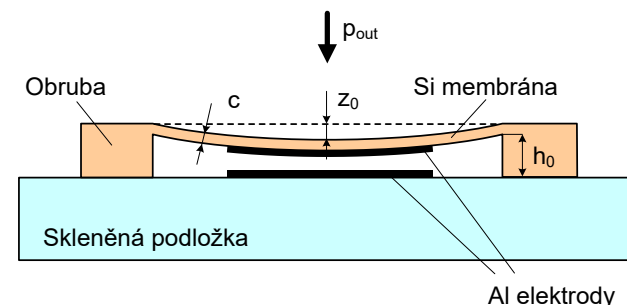
## Základní charakteristika kapacitních tlakových senzorů

Materiál -	Si, sklo, atd.
Membrána -	Pružná, Si
Tvar membrány -	čtvercová nebo kruhová (vyšší citlivost)
Vzdálenost elektrod -	$\mu\text{m}$
Plocha elektrod -	1-10 mm <sup>2</sup>
Kapacita -	1-10 pF
Citlivost -	velká
Teplotní závislost -	velmi malá
Teplotní hystereze -	zanedbatelná
Rozměry -	velmi malé
Technologická kompatibilita -	CMOS
Převodní charakteristika -	nelineární
Mezní hodnota C - dána pevností Si membrány a nerovnoměrnostmi na protilehlých plochách elektrod	

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta p}$$

$$C \neq f(\vartheta)$$

$$\vartheta_{\max} \geq 300^{\circ}\text{C}$$

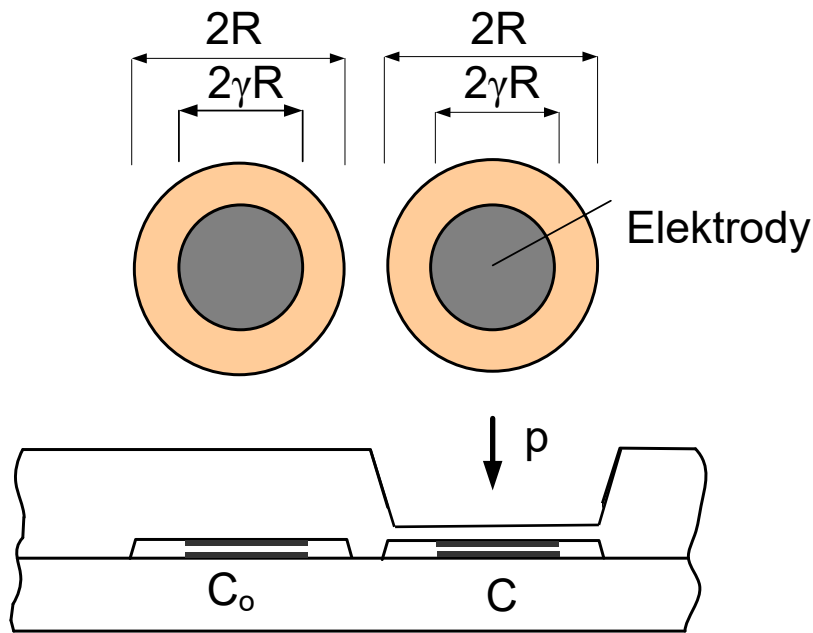


# Kapacitní tlakové senzory – integrované



# Kapacitní tlakové senzory – integrované

## Kruhová nebo čtvercová membrána



$$C_0 = \epsilon_0 \frac{\pi \gamma^2 R^2}{h_0} = \text{konst}$$

$$C = \int dC = \int_0^R \epsilon_0 \frac{2\pi r}{h_0 - z(r)} dr$$

$$\Delta C = C - C_0$$

$$dC = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{dS}{h} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{2\pi r}{h} dr$$

Relativní tlaková citlivost  $S_r$   
jako funkce koeficientu  $\gamma$

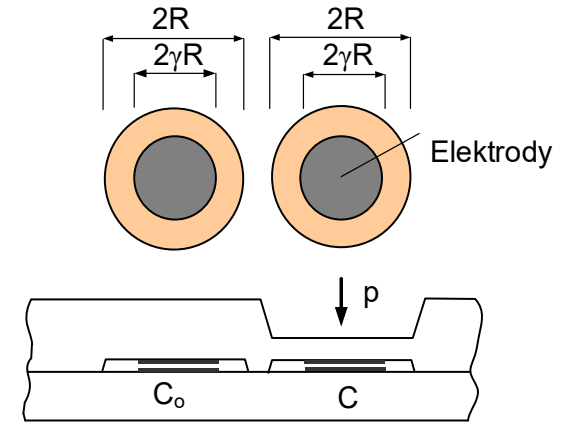
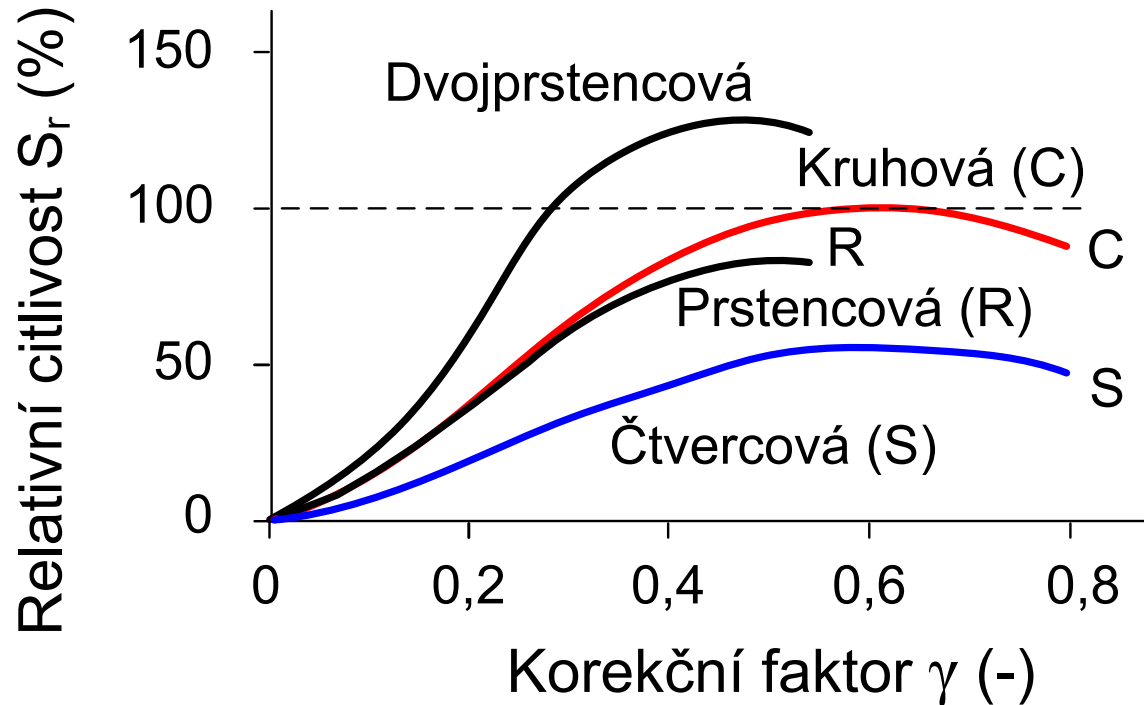
? Nakreslete zjednodušeně základní integrovanou strukturu s referenční kapacitou a měřicí kapacitou, souvislost citlivosti s rozměrem elektrody (faktor  $\gamma$ )

$$S_r = \frac{dC}{dp} = f(\gamma)$$



# Kapacitní tlakové senzory – integrované

$$S_r = \frac{dC}{dp} = f(\gamma)$$



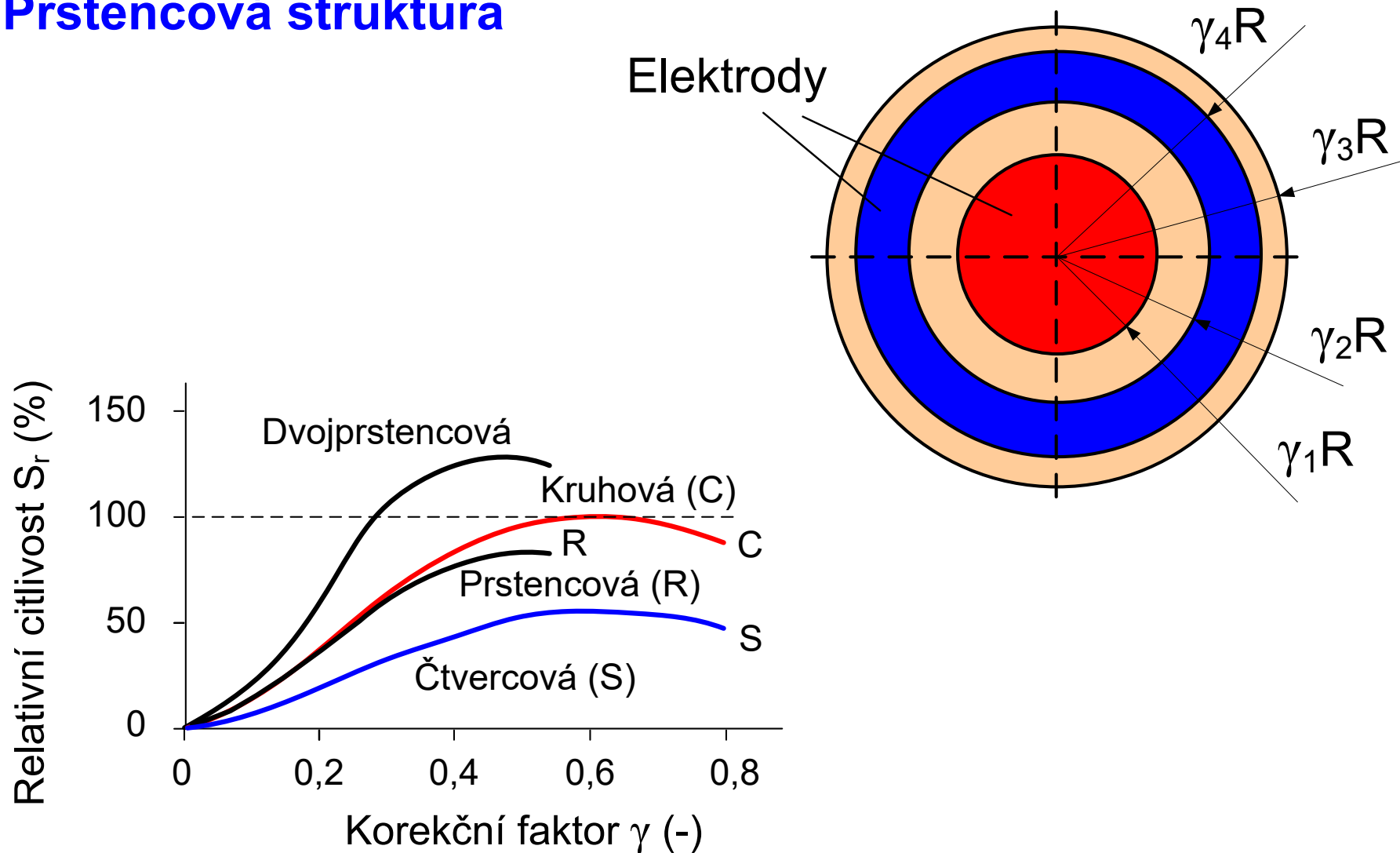
## Závěr

maximální citlivost  $S_r$  je pro  $\gamma = 0,6 \Rightarrow 36\%$  plochy



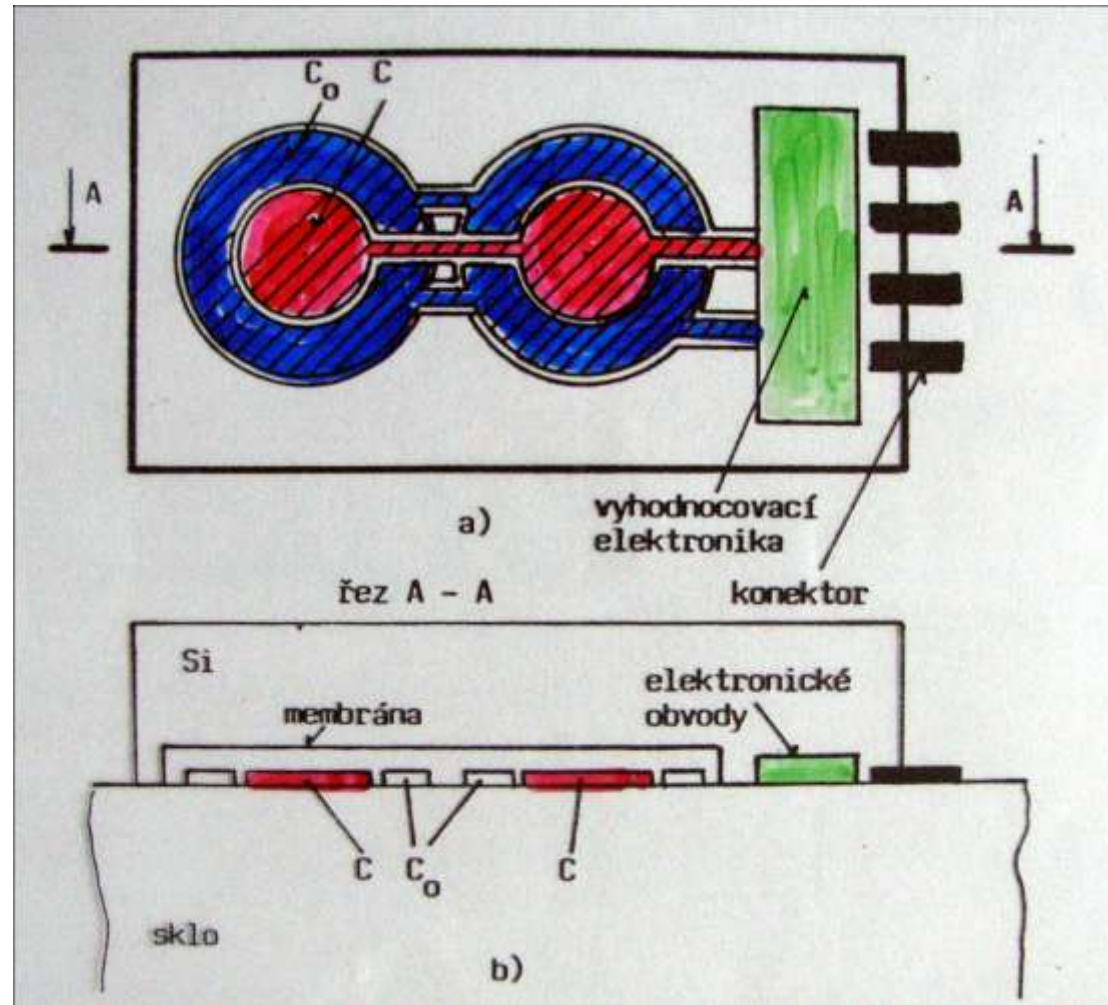
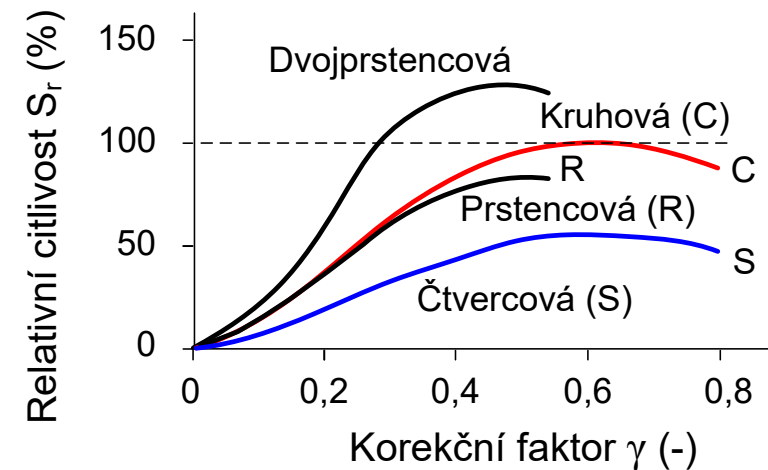
# Kapacitní tlakové senzory – integrované

## Prstencová struktura



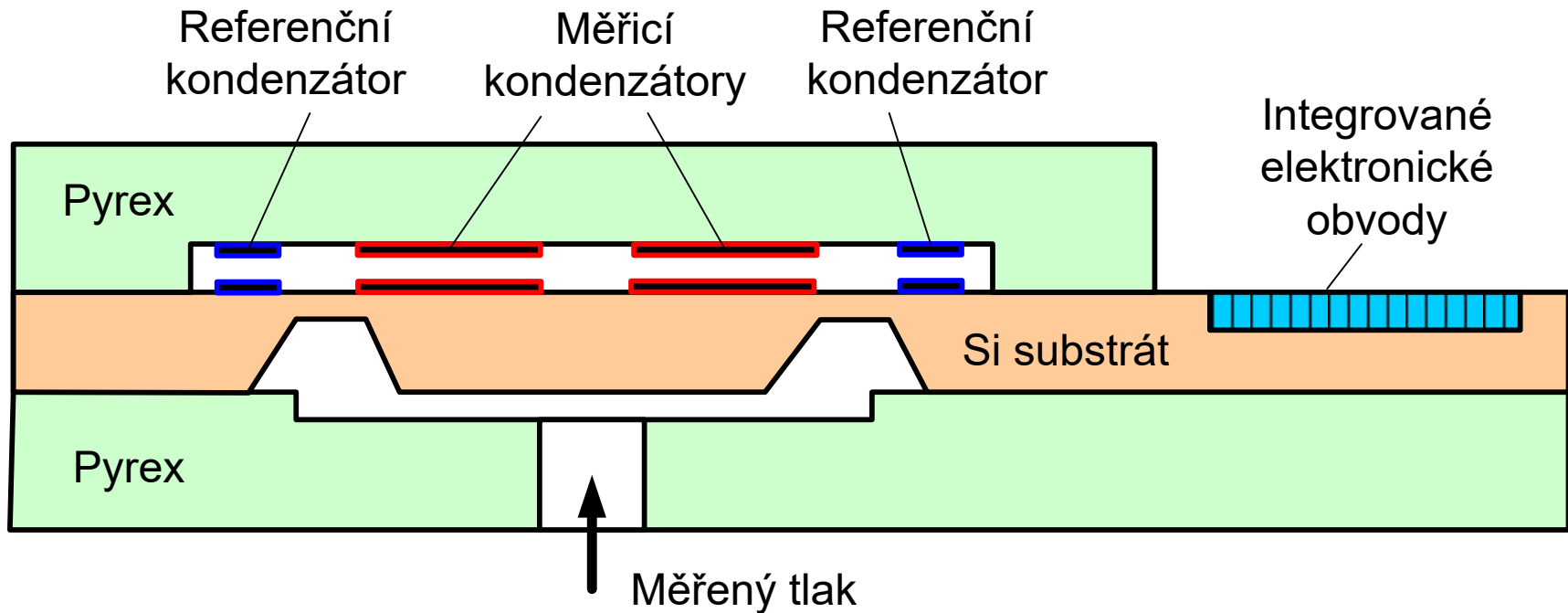
# Kapacitní tlakové senzory – integrované

## Dvouprstencová struktura



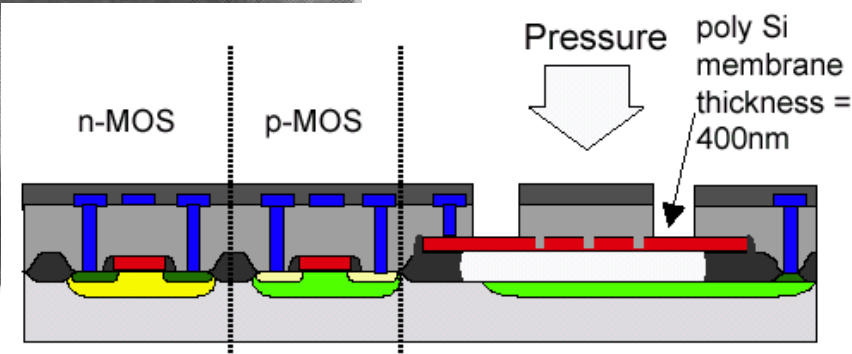
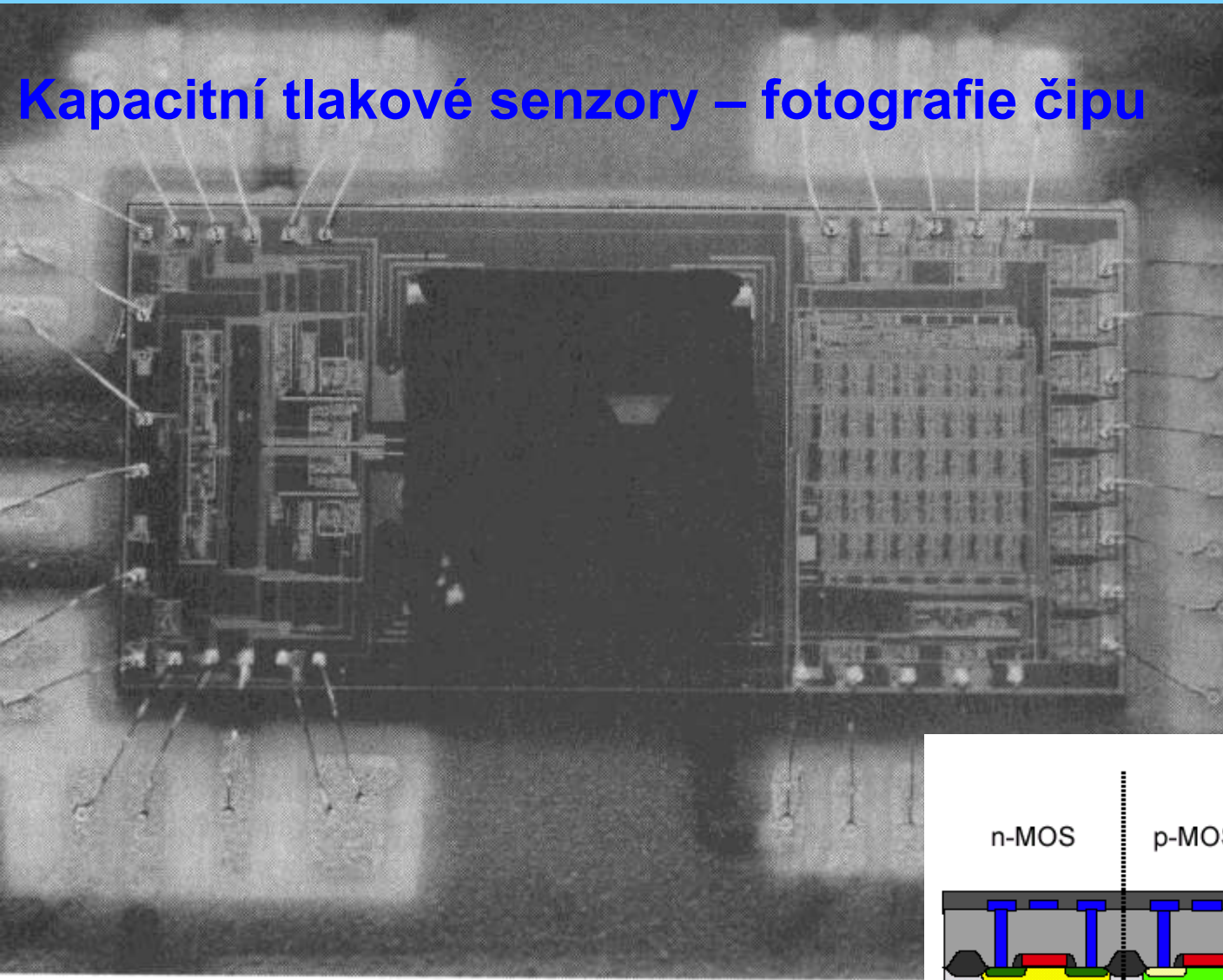
# Kapacitní tlakové senzory – integrované

## Dvouprstencová struktura



# Kapacitní tlakové senzory – integrované

## Kapacitní tlakové senzory – fotografie čipu



# Zpracování signálu z integrovaných kapacitních tlakových senzorů

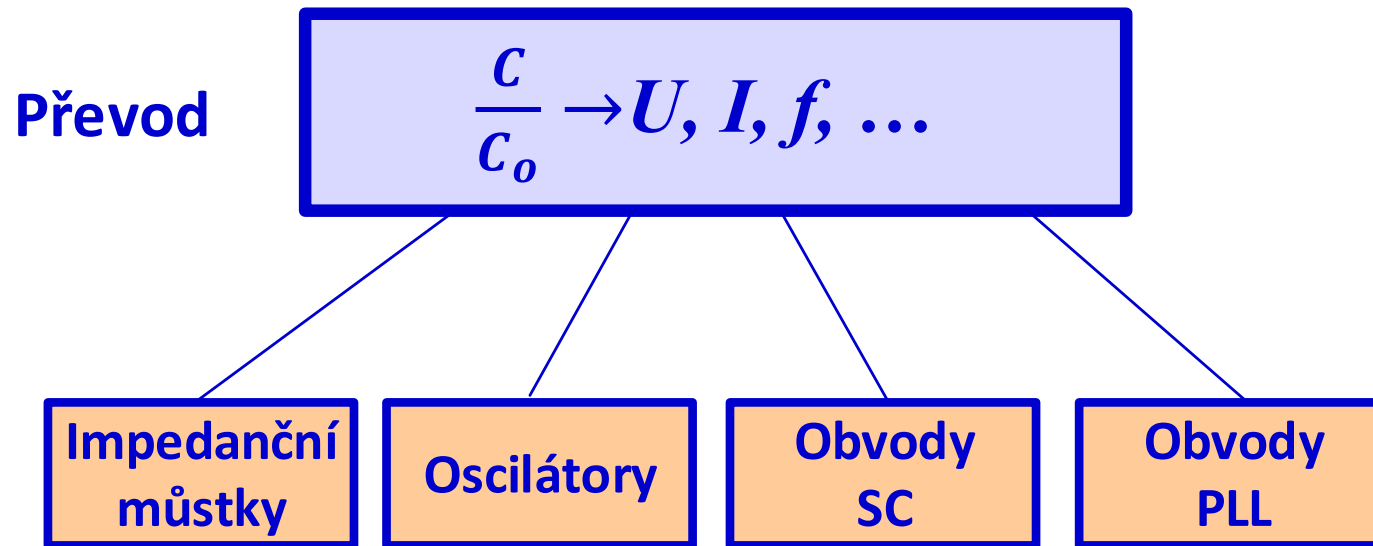


# Kapacitní tlakové senzory – zpracování signálu

Vyhodnocovací obvody vhodné pro integraci na čipu

Vyhodnocování relativních změn

Rozdělení základních typů vyhodnocovacích obvodů



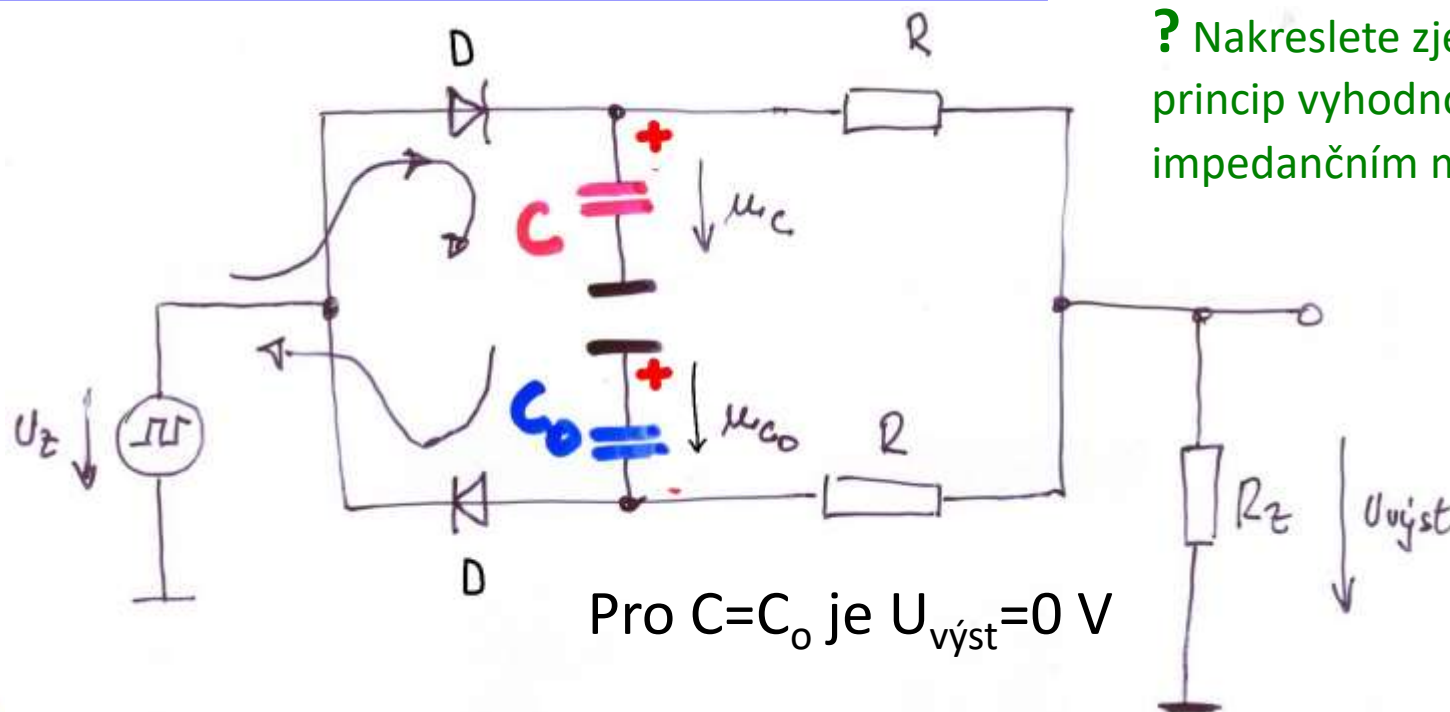


## 1) Impedanční můstky

$$Q = C \cdot U$$

$$U_{\text{výst}} = \text{konst} \cdot U_z f c e (C - C_o)$$

? Nakreslete zjednodušeně princip vyhodnocování kapacity impedančním můstkem



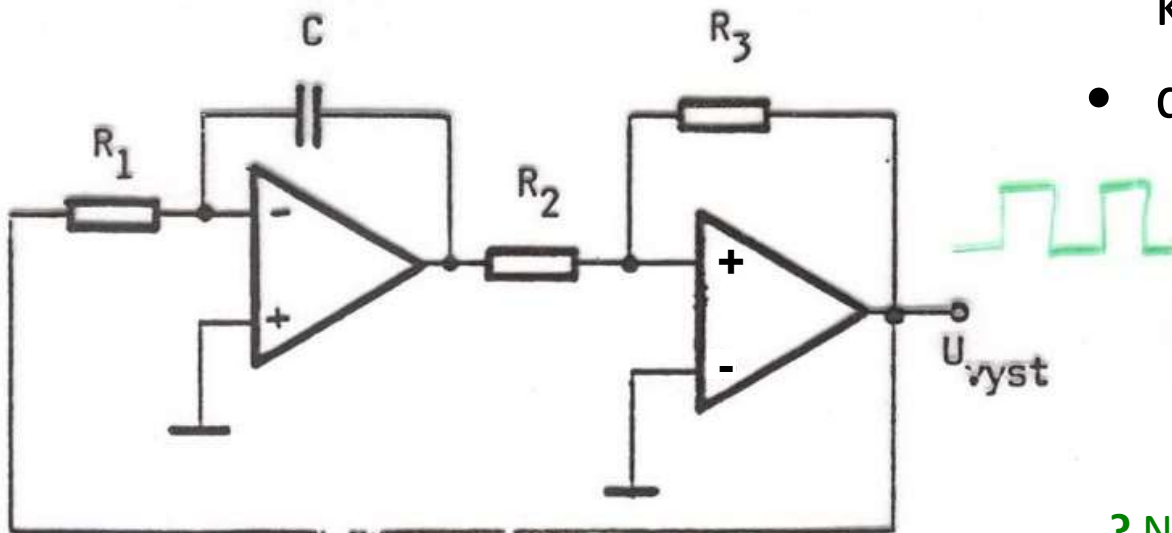


## 2) Kapacitně řízené oscilátory

### a) Převodník C/f

$$f = f_{ce}(C)$$

**Příklad:** spojení integrátor a komparátor



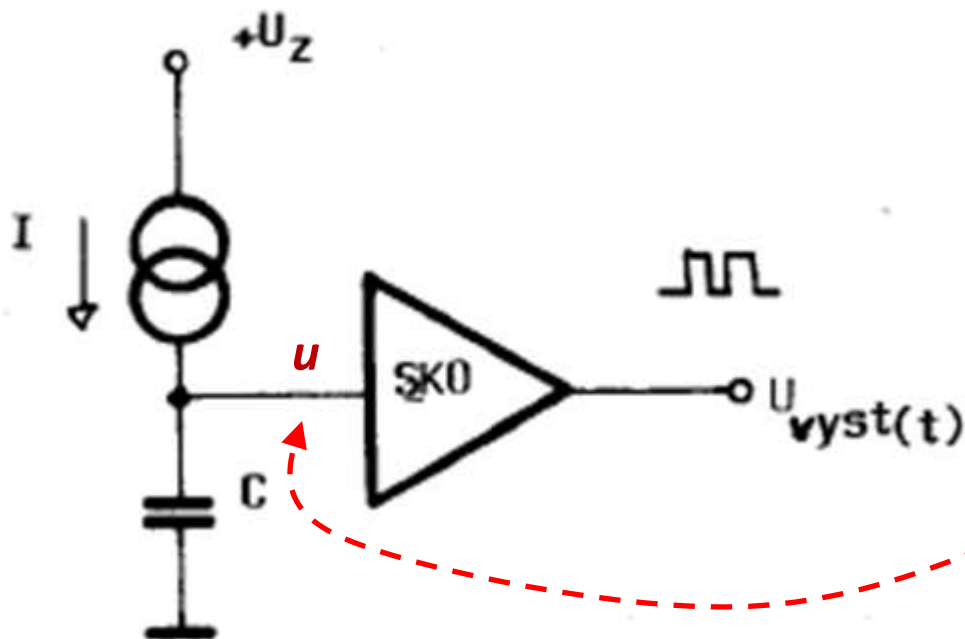
- sinusový oscilátor
- relaxační oscilátor
- Multivibrátor
- spojení integrátor a komparátor
- další

$$f = f_{ce}(C)$$

? Nakreslete zjednodušeně kapacitní vyhodnocovací obvody s kapacitně řízenými oscilátory

## 2) Kapacitně řízené oscilátory

### b) Převodník C/t



$$t = fce(C)$$

$$I \cdot t = C \cdot u$$

$$u = \frac{1}{C} I \cdot t = \text{konst} \cdot t$$

**C** - nabíjený ze zdroje konstantního proudu **I**

**t** - čas

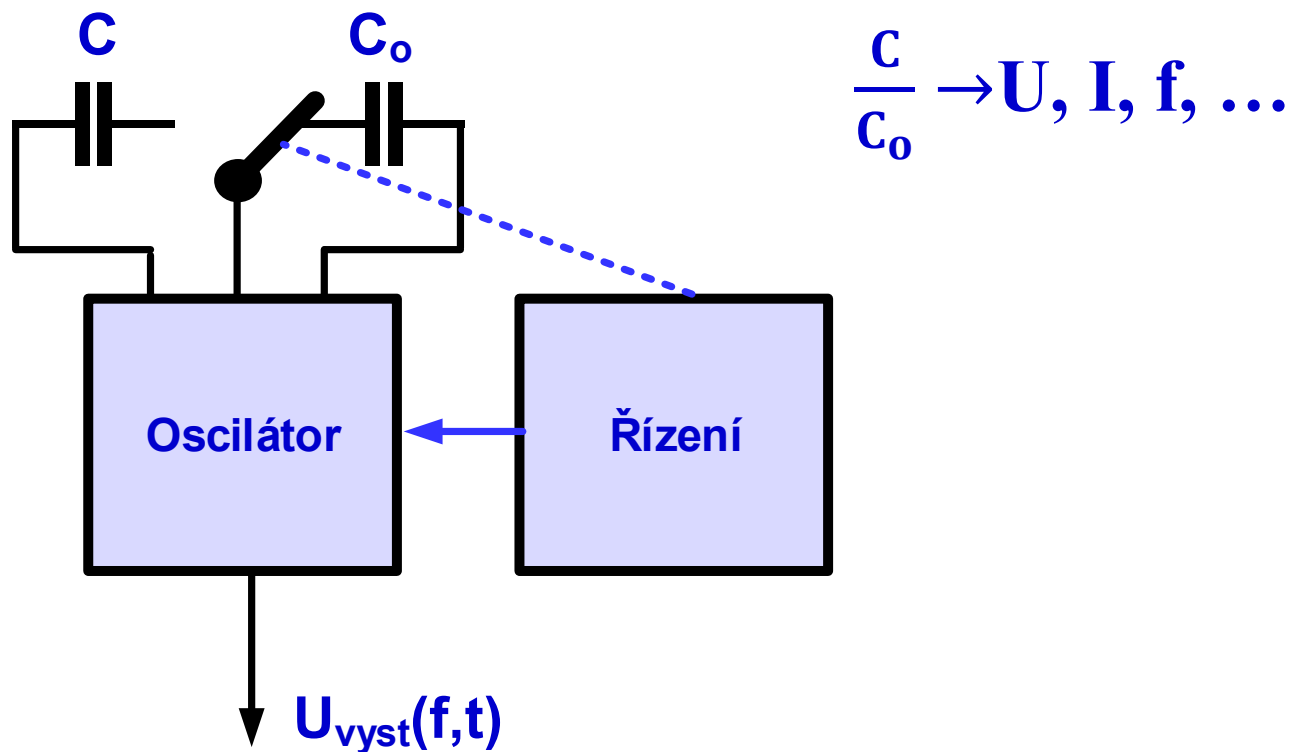
Princip integrace napětí na kapacitě, kterou prochází konstantní proud

? Nakreslete zjednodušeně kapacitní vyhodnocovací obvody s kapacitně řízenými oscilátory

# Zpracování signálů – oscilátory

## 2) Kapacitně řízené oscilátory, princip využití C a C<sub>o</sub>

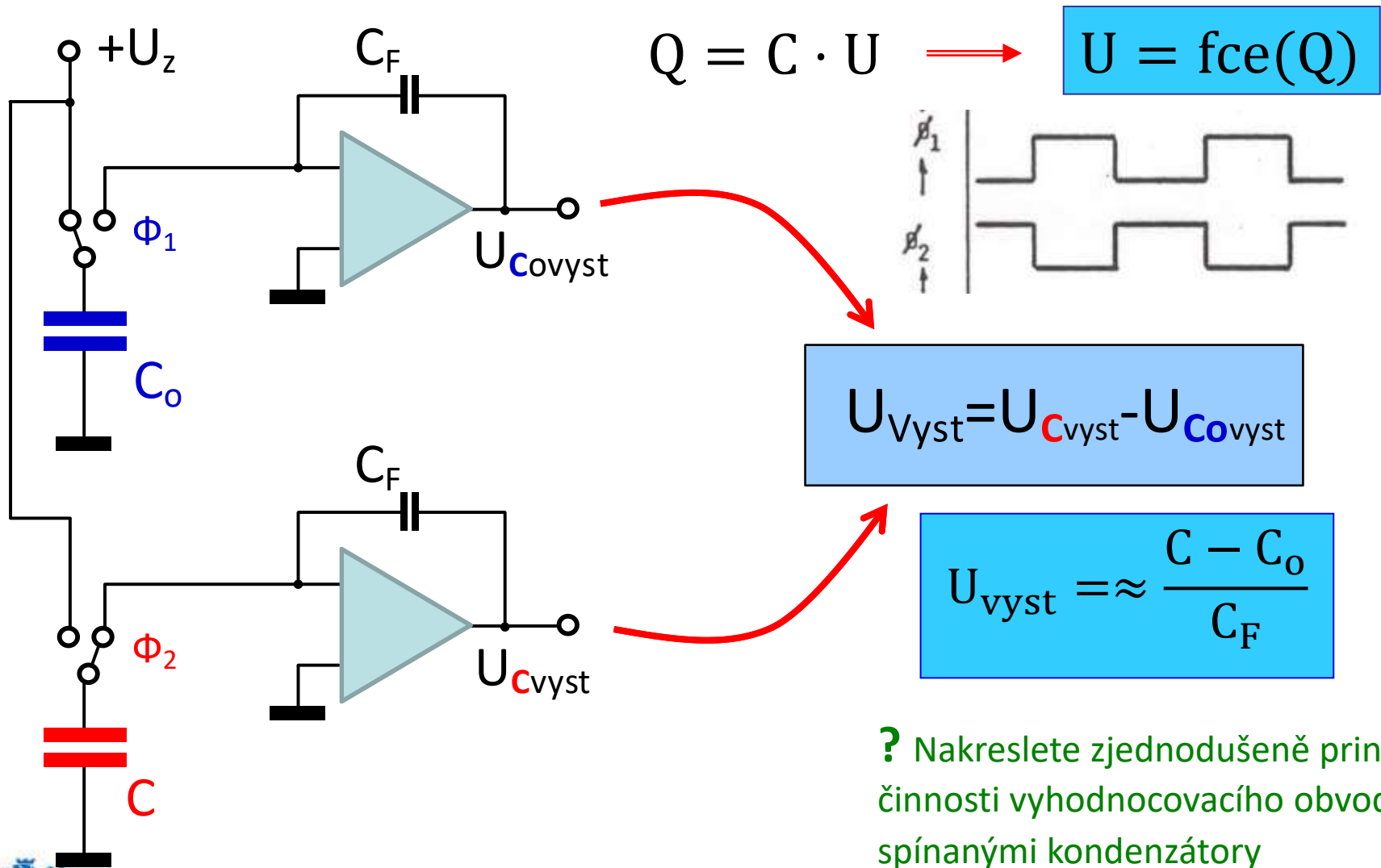
K odstranění parazitních vlivů porovnáváním C a C<sub>o</sub>



# Zpracování signálů – spínané kondenzátory

## 3) Obvody se spínanými kondenzátory - princip

Zkouška



? Nakreslete zjednodušeně princip činnosti vyhodnocovacího obvodu se spínanými kondenzátory

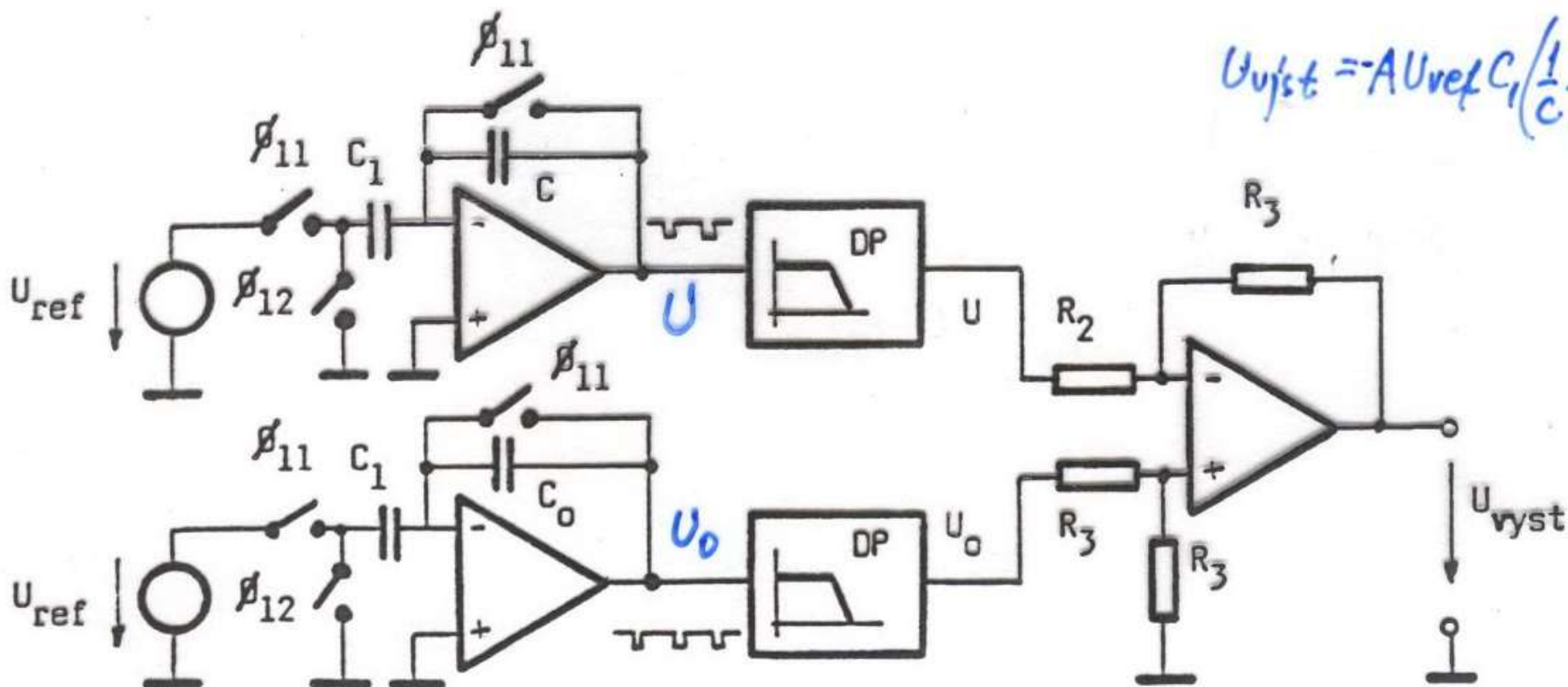


# Zpracování signálů – spínané kondenzátory

$$U \approx U_{\text{ref}} \frac{C_1}{C}$$
$$U_0 = U_{\text{ref}} \frac{C_1}{C_0}$$

## 3) Obvody se spínanými kondenzátory

### Zapojení

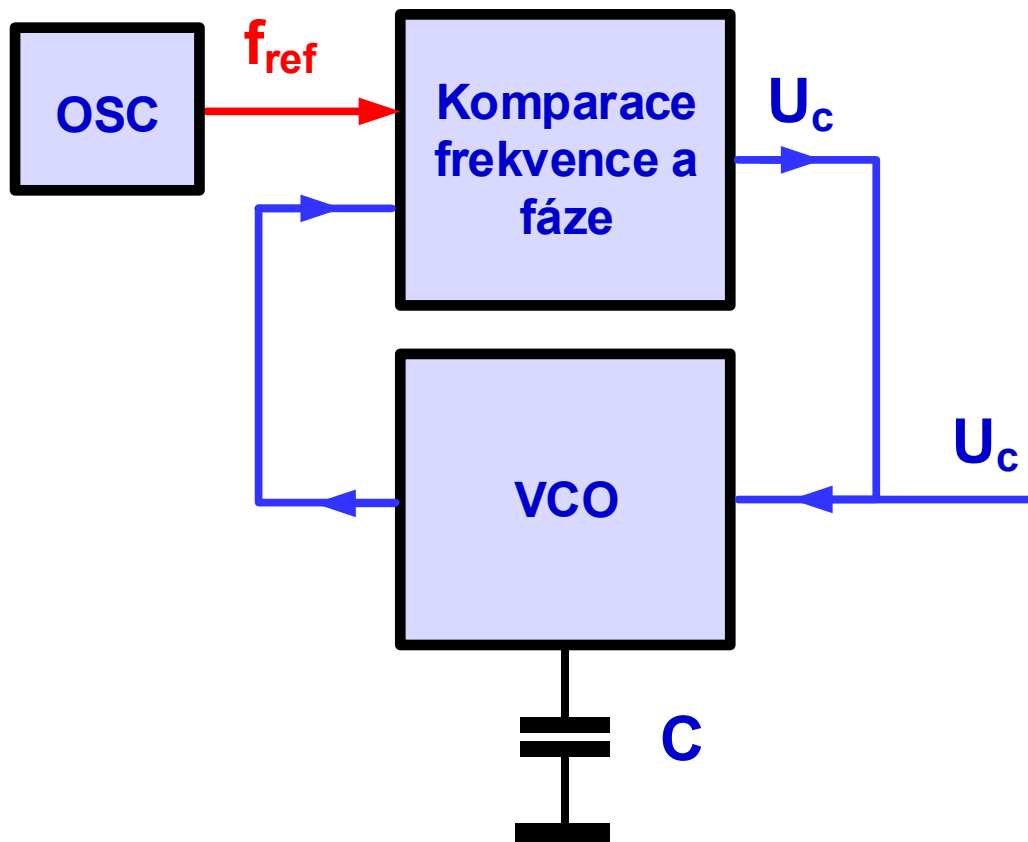


$$U_{\text{vyst}} = A(U - U_0)$$
$$U_{\text{vyst}} = -AU_{\text{ref}}C_1\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0}\right)$$



## 4) Obvody PLL

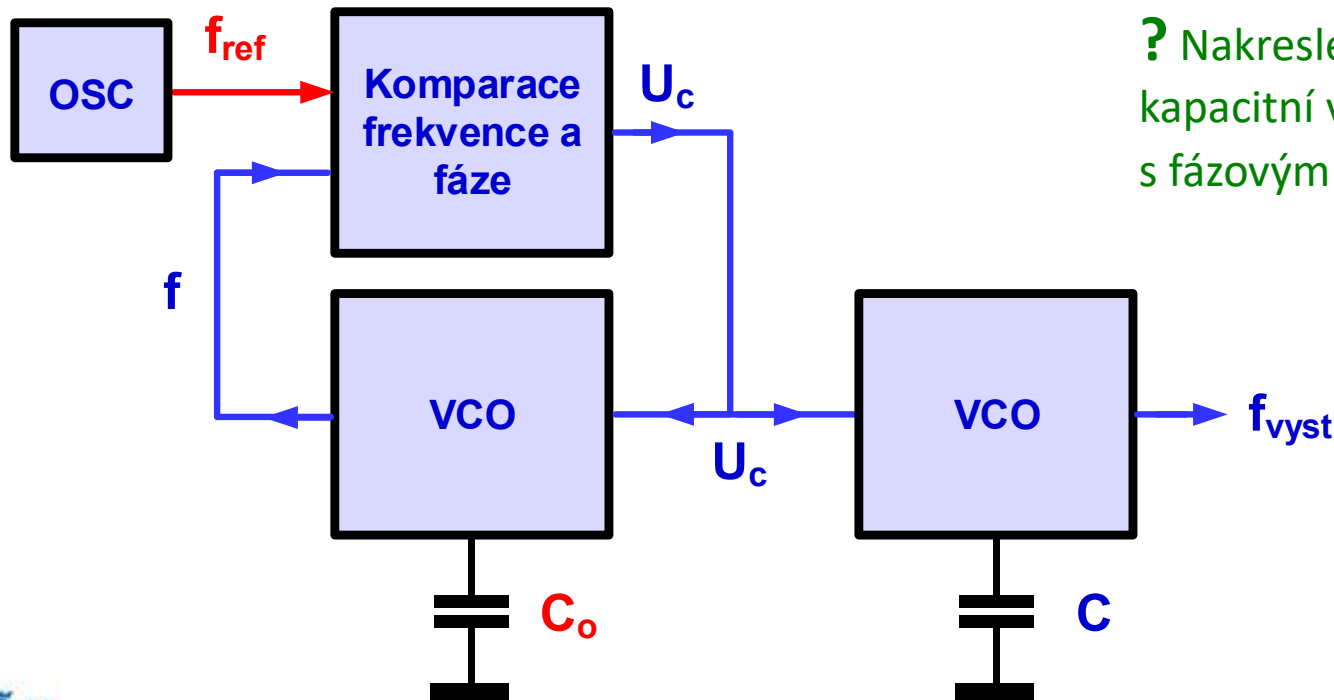
Výstupní frekvence VCO je řízena přiloženým vstupním napětím  $U_c$  a kapacitou  $C$ .



? Nakreslete zjednodušeně kapacitní vyhodnocovací obvody s fázovým závěsem (PLL)

## 4) Obvody PLL

- Výstupní frekvence VCO je řízena přiloženým vstupním napětím  $U_c$  a kapacitou  $C$ .
- Oba VCO jsou řízeny napěťovým signálem  $U_c$ .
- Pokud je obvod PLL řízený vstupní referenční frekvencí  $f_{ref}$ , vnitřní VCO kmitá na stejné frekvenci, tj.  $f_{ref}$  a napětí  $U_c$  má určitou hodnotu.
- Dva shodné VCO - kompenzace teplotních změn a změn dalších parametrů,



? Nakreslete zjednodušeně kapacitní vyhodnocovací obvody s fázovým závěsem (PLL)

# Otázky

1. Nakreslete zjednodušený model kapacitního tlakového senzoru, napište rovnici pro citlivost kapacitního senzoru
2. Nakreslete zjednodušeně základní integrovanou strukturu s referenční kapacitou a měřicí kapacitou, souvislost citlivosti s rozměrem elektrody (faktor  $\gamma$ )
3. Nakreslete zjednodušeně princip vyhodnocovací kapacity impedančním můstkem
4. Nakreslete zjednodušeně kapacitní vyhodnocovací obvody s kapacitně řízenými oscilátory
5. Nakreslete zjednodušeně základní vyhodnocovací obvody se spínanými kondenzátory
6. Nakreslete zjednodušeně kapacitní vyhodnocovací obvody s fázovým závěsem (PLL)

