

5a.

# Piezelektrický jev

## Piezelektrické senzory

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

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

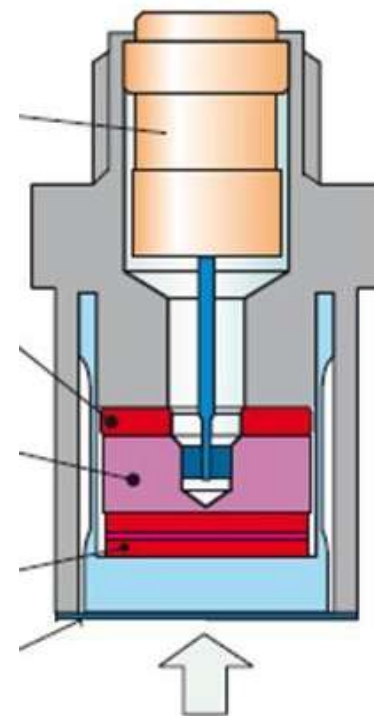
<http://micro.fel.cvut.cz>

tel.: 2 2435 2267

**Cvičící:**

Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

Ing. Alexandr Laposa, Ph.D.



# A) Piezoelektrický jev

<https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory.html>

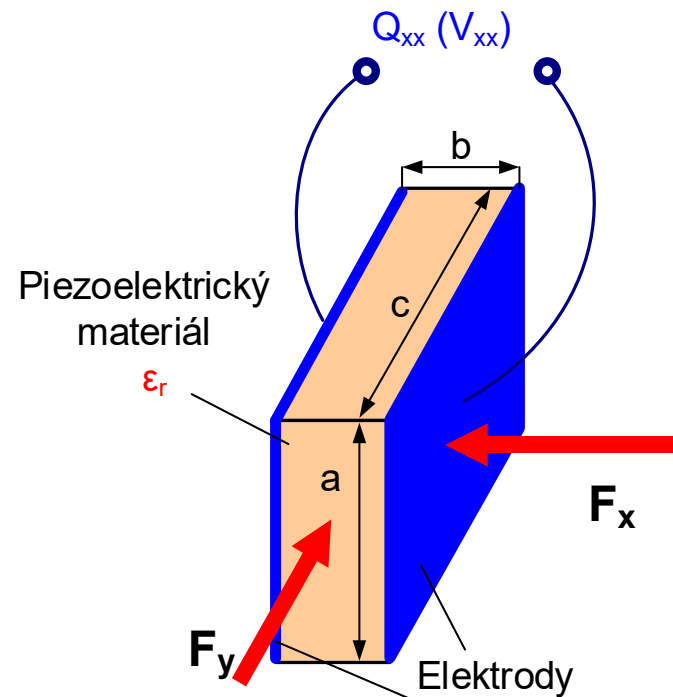
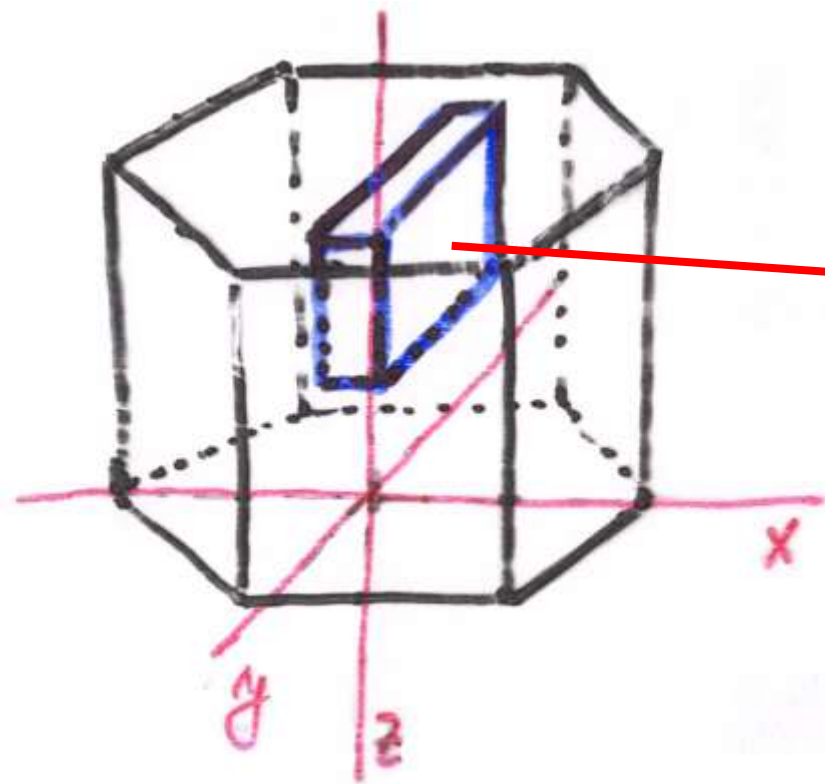


# Piezelektrický jev – historie

- ❑ 1880 – Pierre a Jacques Curie – Objev piezelektricity v krystalu turmalínu
- ❑ 40. léta 20. stol. – objev piezelektricity ve feroelektrických piezokeramikách
- ❑ 40. léta 20. stol. – výzkum piezelektricity v biopolymerech (biologický materiál z rostlin, zvířat a člověka)
- ❑ 1969 – objevena piezelektricitá v PVDF (piezelektrický syntetický polymer)



# Piezoelektrický jev – model



# Piezelektrický jev – podélný jev

Zkouška

$F_x$  - Deformační síla *působí* ve směru elektrické osy x.

$P_e$  - Vektor polarizace je rovnoběžný s osou x a je úměrný působícímu mechanickému tlaku

$$P_e = k_p p_x = k_p \frac{F_x}{S_x} \quad k_p \text{ piezelektrická konstanta}$$

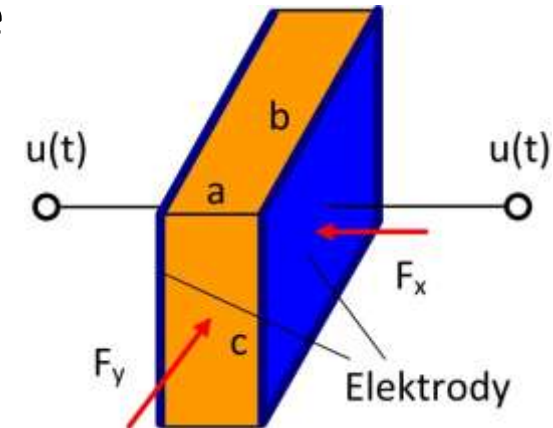
Na každé stěně kolmé k elektrické ose vznikne **elektrický náboj**

$$Q_x = P_e S_x = k_p F_x$$

**napětí na elektrodách**

$$U_x = \frac{Q_x}{C} = \frac{k_p}{C} F_x = k_u F_x \quad U_{xx} = k_u F_x$$

$k_u$  je napěťová citlivost



? Podélný piezelektrický jev:  
Nakreslete princip činnosti  
piezelektrického senzoru,  
Napište základní rovnice pro  
výpočet náboje a napětí



# Piezelektrický jev – příčný jev

Zkouška

$F_y$  - deformační síla působí kolmo na elektrickou osu ve směru mechanické osy  $y$ .

$P_e$  - Vektor polarizace působí rovněž rovnoběžně s osou  $x$ , ale má opačný směr.

$$P_e = -k_p p_y = -k_p \frac{F_y}{S_y}$$

náboj na elektrodách

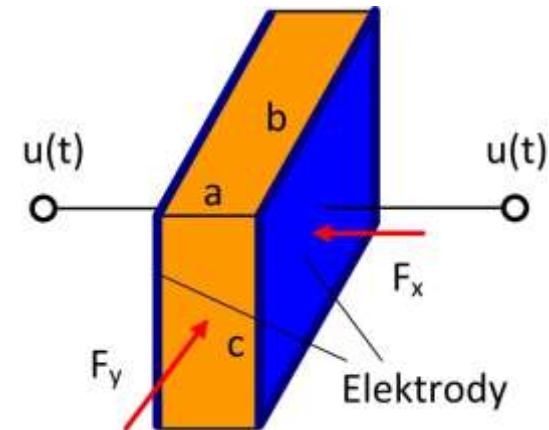
$$Q_x = P_e S_x = -k_p \frac{F_y S_x}{S_y} = -k_p \frac{b}{a} F_y$$

napětí na elektrodách

$$U_x = \frac{Q_x}{C} = -\frac{k_p}{C} \frac{b}{a} F_y = k_u \frac{b}{a} F_y$$

$$U_{xx} = k_u \frac{b}{a} F_y$$

kde  $k_u$  je napěťová citlivost piezelektrického elementu



? Příčný piezelektrický jev:  
Nakreslete princip činnosti piezelektrického senzoru, Napište základní rovnice pro výpočet náboje a napětí se zahrnutím vektoru polarizace, význam jednotlivých členů v rovnicích



# Piezelektrický jev – shrnutí

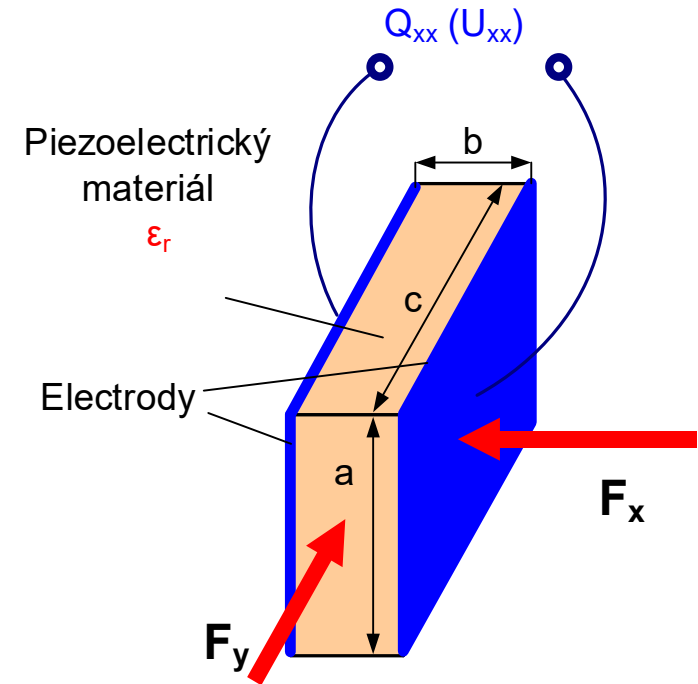
## Podélný piezelektrický jev ( $F_x$ )

$$Q_{xx} = k_p F_x$$

$$Q_{xx} = C U_x$$

$$U_{xx} = k_u F_x$$

$$k_u = \frac{k_p}{C}$$



## Příčný piezelektrický jev ( $F_y$ )

$$Q_{xx} = k_p \frac{b}{a} F_y$$

$$U_{xx} = k_u \frac{b}{a} F_y$$

$k_p$  – piezelektrická konstanta

$k_u$  – napěťová citlivost senzoru

# Piezelektrický jev – přímý, nepřímý, materiály

## Piezelektrický jev

je založen na **elastické deformaci a orientaci elektrických dipólů** v krystalové struktuře. Základem je nesymetrická struktura krystalu, ve které se neshodují centra elektrického náboje a tak vytvářejí dipóly.

## Přímý piezelektrický jev

Přiložením vnější mechanické síly se deformují dipóly a na povrchu krystalu tak vzniká náboj.

## Inverzní piezelektrický jev

Přiložené elektrické pole způsobí deformaci dipólů a vzniká konstantní intenzita mechanického napětí

## Dvě základní skupiny piezelektrických materiálů

- a) **materiály s vestavěnou sítí elektrických dipólových momentů** (krystalická piezelektrika)
- b) **Materiály bez piezelektrických vlastností, musejí být pólovány**, aby se staly piezelektrickými (Keramické a polymerní), Polyvinylfluorid - natahování nebo elektrické pólování, PZT - elektrické pole při zvýšené teplotě, aby se snížilo koercitivní pole s následným ochlazováním.



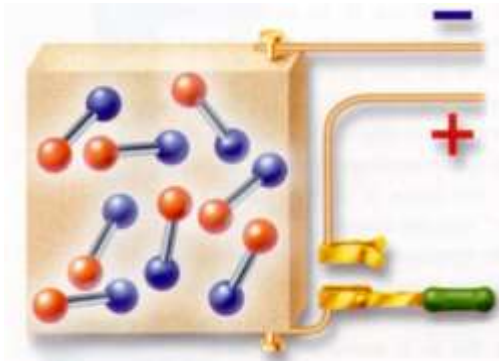


# Piezelektrický jev – princip polarizace

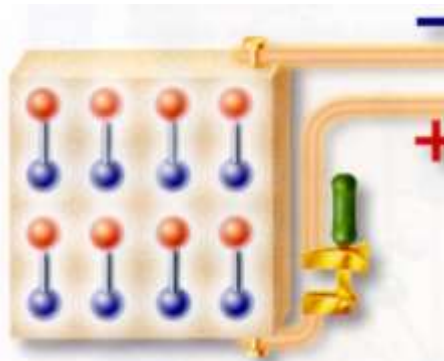
Zkouška

## Polarizace:

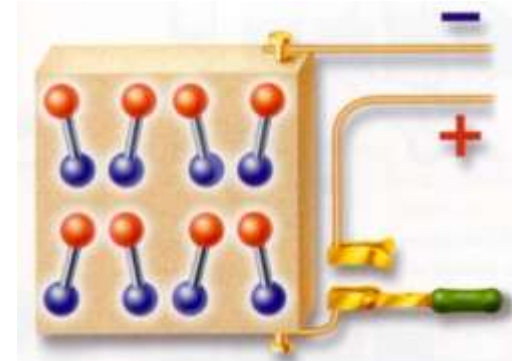
- Polarizace aplikací silného stejnosměrného elektrického pole při teplotě těsně pod Curierovou teplotou – spontánně orientovaná zrnka jsou orientována ve směru elektrického pole.
- *Keramické (PZT)* - nemá po výrobě piezelektrický efekt – získá se krátkým průchodem proudu (polarizací), elektrické pole při zvýšené teplotě, aby se snížilo koercitivní pole s následným ochlazováním
- *Polymerové (Polyvinylfluorid)* - natahování nebo elektrické pólování



Keramika bez  
piezelektrických vlastností



**Polarizace** - při průtoku  
elektrického proudu

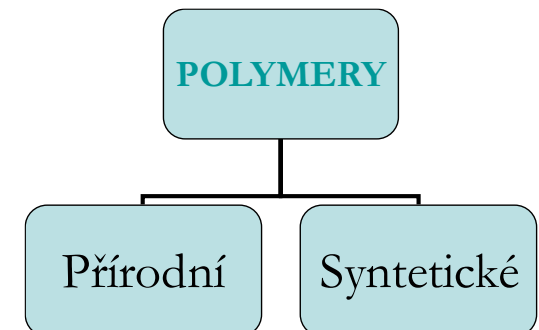


**Zbytková  
polarizace**



- ❑ **Monokrystaly** (křemen, lithium niobát a lithium tantalát, amonium dihydrogen sulfát, lithium sulfát a Rochellova sůl), pro SAW
- ❑ **Piezelektrická keramika** (Slinutá PZT keramika - olovo - zirkon – titan, PLZT keramika (přidává se lanthan, 2-8x větší napětí než PZT keramika), Titaničitan barnatý, Titaničitan zirkoničitoolovnatý ...
- ❑ **Piezelektrické polymery** (Polymery na bázi polyvinylfluoridu (PVFD))
- ❑ **Piezelektrické kompozity** keramika/polymer
- ❑ **Perovskity** (skupina materiálů  $ABO_3$ , se strukturou stejnou jako titaničitan Calcia ( $CaTiO_3$ ). Materiály: itaničitan baria ( $BaTiO_3$ ), titaničitan olova ( $PbTiO_3$ ), zirkoničitan titaničitan olova ( $PbZrTi_{1-x}O_3$  nebo PZT), zirkoničitan titaničitan olova lanthanu [ $Pb_{1-x}La_x(Zr_yTi_{1-y})_{1-x/4}O_3$  nebo PLZT] a niobát olova manganu [ $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$  nebo PMN].

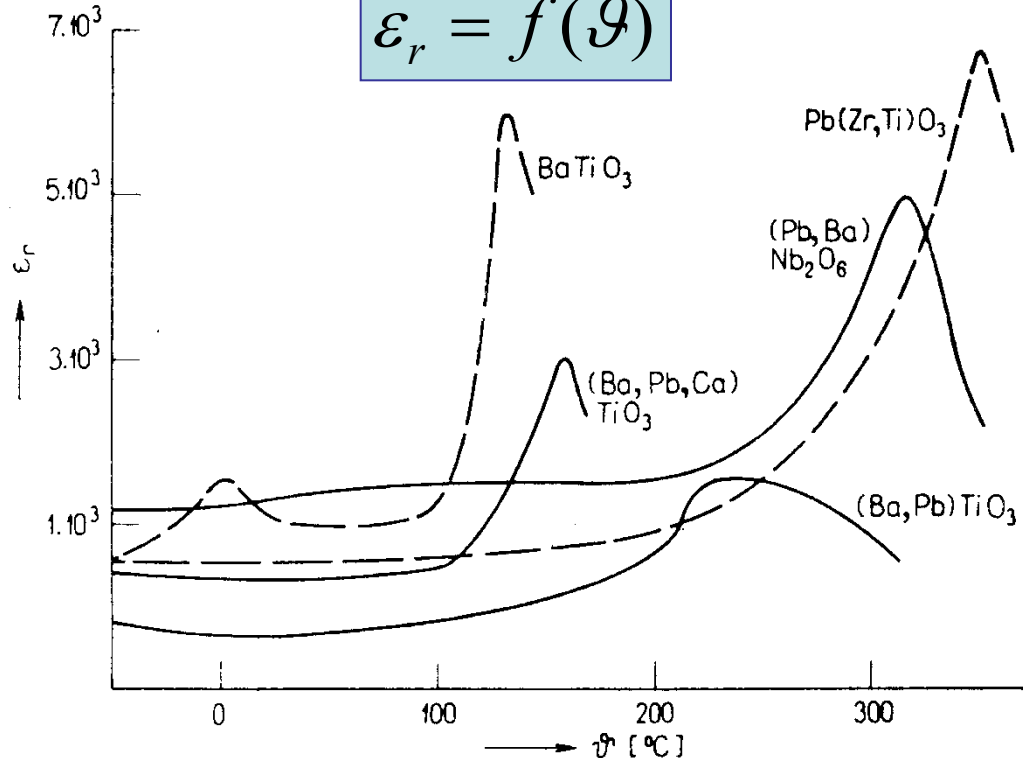
? Piezelektrické materiály: Napište alespoň 3 základní typy piezelektrických materiálů, vysvětlete pojem polarizace piezelektrického materiálu



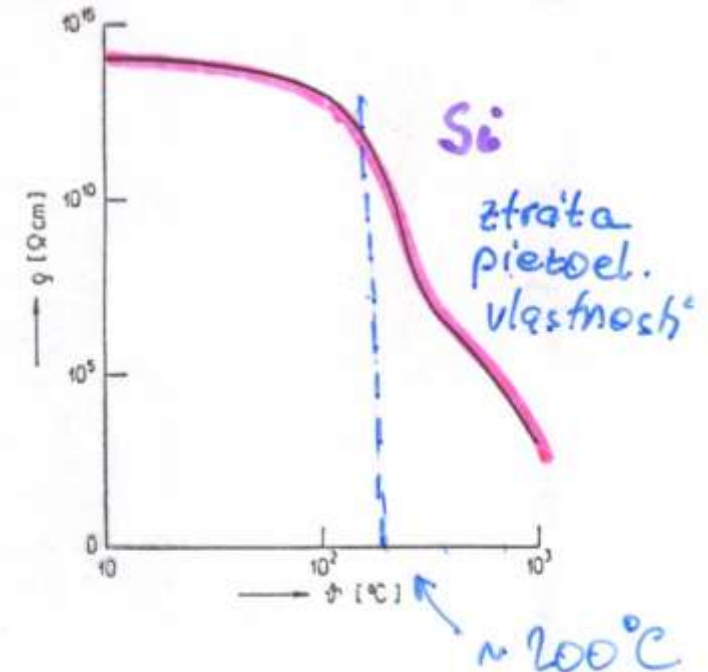
# Piezelektrický jev – vlastnosti materiálů (Curie tepl)

Zkouška

$$\varepsilon_r = f(\vartheta)$$



$$\rho_{Si} = f(\vartheta)$$



## ☹ Nedostatky:

- ☐ Hystereze
- ☐ Vliv teploty
- ☐ Stárnutí

? Piezelektrické materiály: Napište názvy 3 typických piezelektrických materiálů, nakreslete příklad teplotní závislosti s Curie teplotou, jaký význam má tato teplota



# Piezelektrický jev – porovnání vlastností

Parametr	Keramika	Polymer	Kompozit keramika/polymer
Akustická impedance	Vysoká (-)	Nízká (+)	Nízká (+)
Vazební faktor	Vysoký (+)	Nízký (-)	Vysoký (+)
Falešné módy	Mnoho (-)	Málo (+)	Málo (+)
Dielektrická konstanta	Vysoká (+)	Nízká (-)	Střední (+)
Pružnost	Tuhá (-)	Pružná (+)	Pružná (+)
Cena	Nízká (+)	Vysoká (-)	Střední (+)

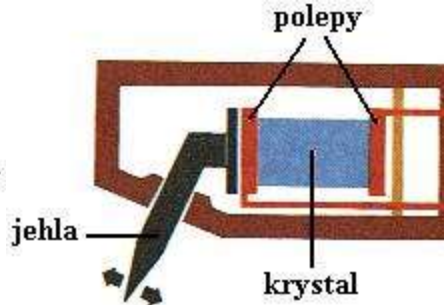
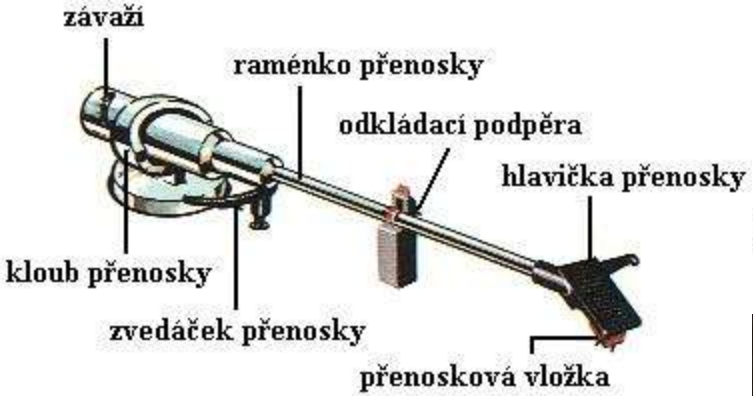


# Piezoelektrický jev – příklad používaných materiálů

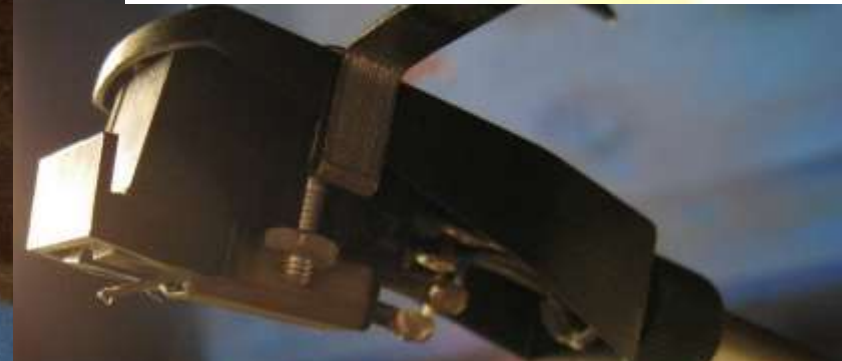
Název	seignettova sůl	křemen	titaničitan barnatý	titaničitan zirkoničitoolovnatý
chemický vzorec	$\text{Na KC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2$	$\text{BaTiO}_3$	$\text{PbZrTiO}_5$
$k_p [\text{CN}^{-1}]$	300	2.1	120	
$k_u [\text{VN}^{-1}]$	18	5	1	
max. teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	45	550	110	120
$\epsilon_r [-]$	350	4,5	1200 ÷ 1700	2700
mechanická pevnost [MPa]	$1.5 \cdot 10^4$	$1.10^5$	$8.10^4$	
meze relativní vlhkosti [%]	30 - 85	0 - 100	0 - 100	
hustota [ $\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ]	1.77	2.6	5.5	7.6







**TESLA VK-4302**

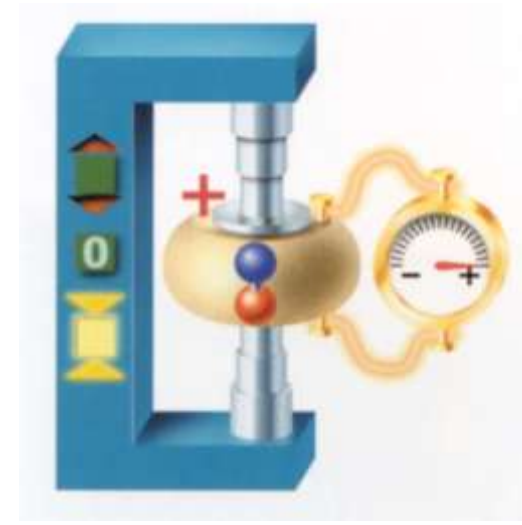
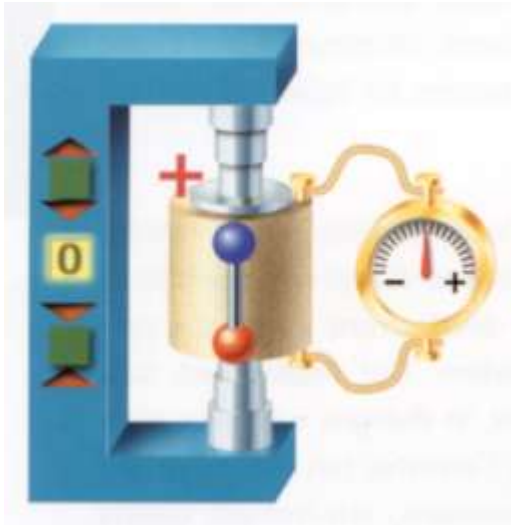


## **B) Senzory s piezoelektrickým principem**

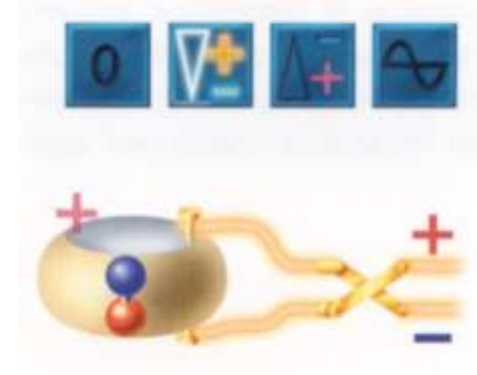
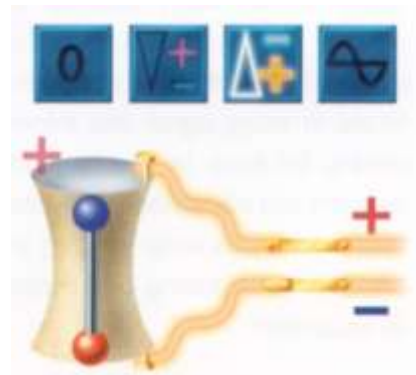
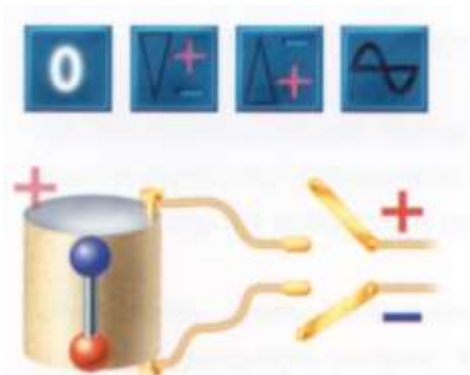


# Piezoelektrický jev – senzor, aktuátor

## Princip činnosti – piezoelektrický senzor

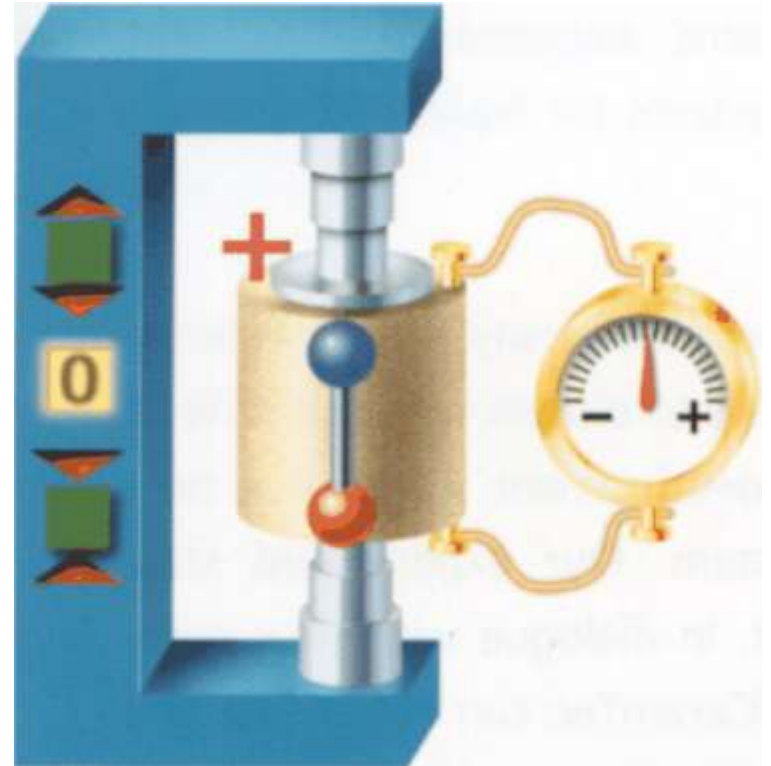
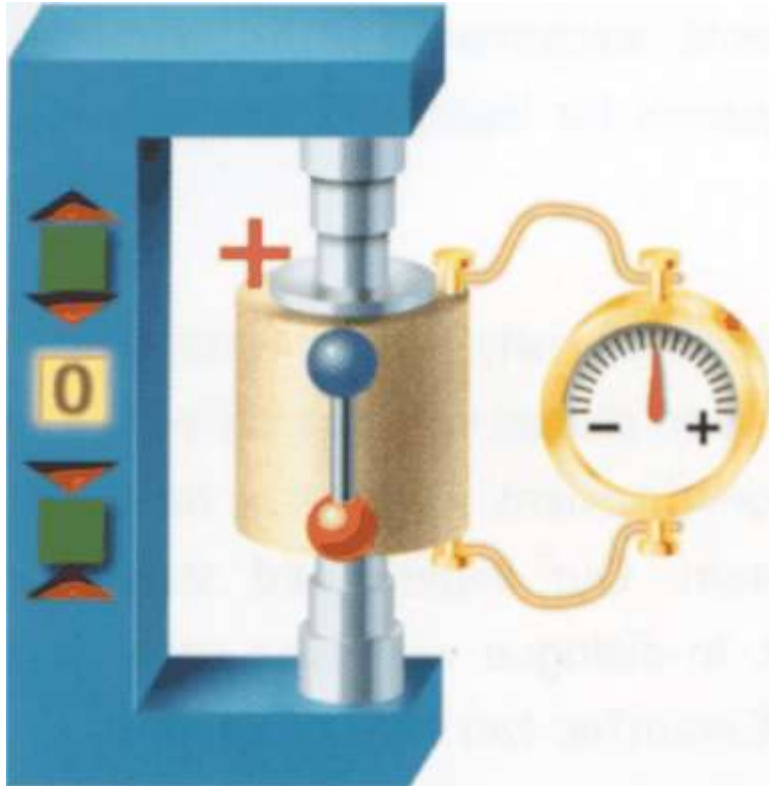


## Princip činnosti – piezoelektrický aktuátor

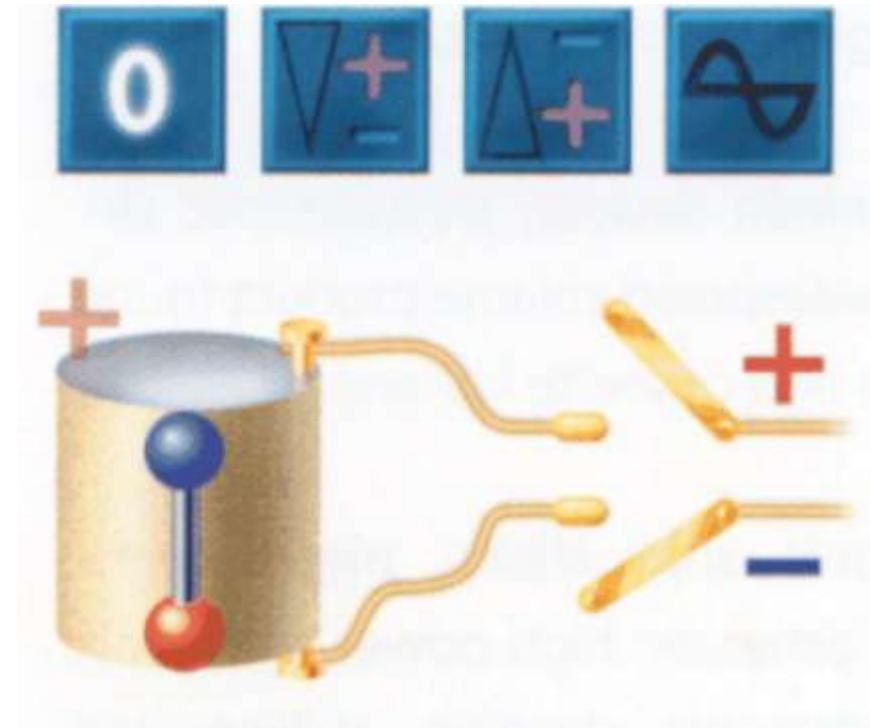
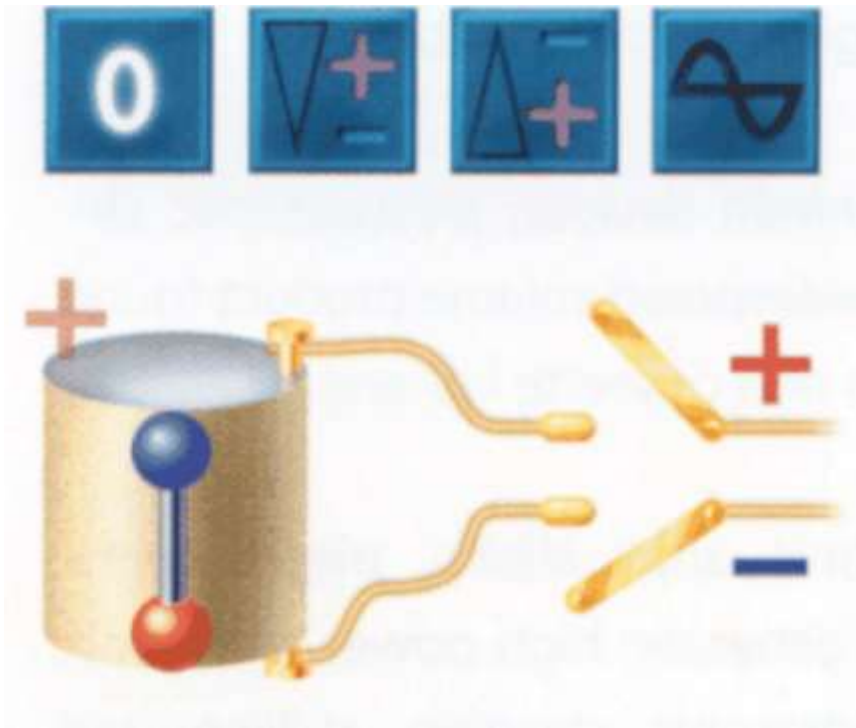




# Piezoelektrický jev – princip činnosti senzor vibrací



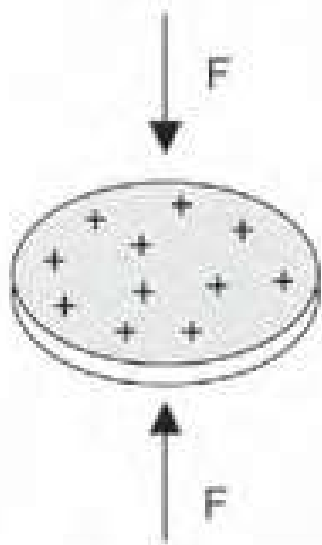
# Piezoelektrický jev – princip činnosti aktuátoru (zdroj vibrací)



# Piezoelektrický jev – způsoby mechanického zatěžování

Zkouška

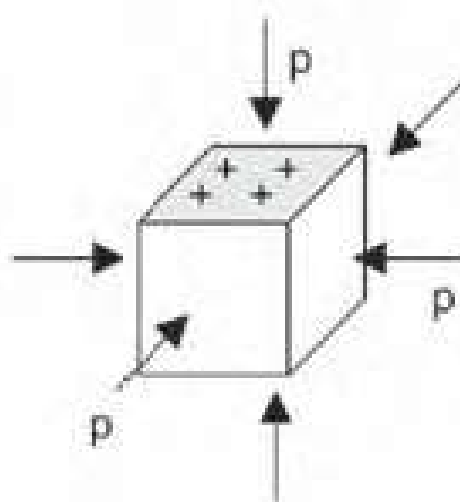
podélný



příčný

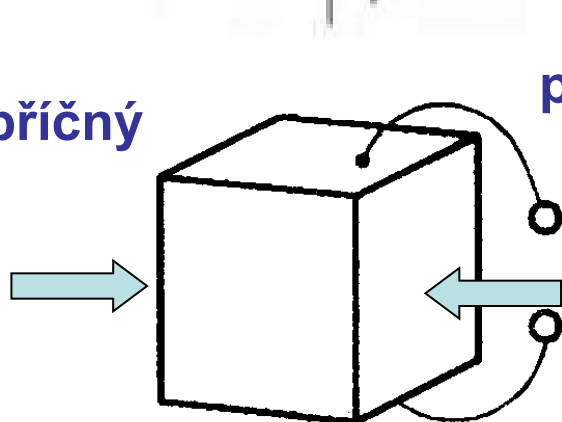


objemový

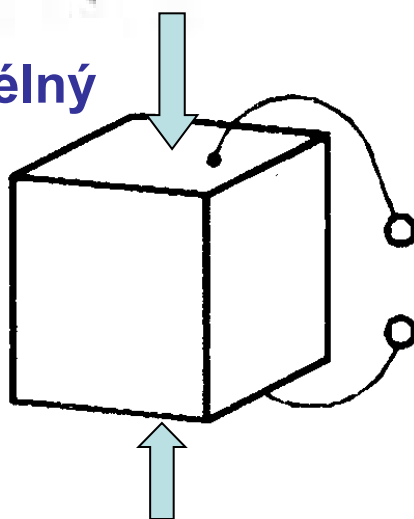


? Piezoelektrický senzor:  
nakreslete základní typy  
mechanického zatěžování  
piezoelektrické struktury

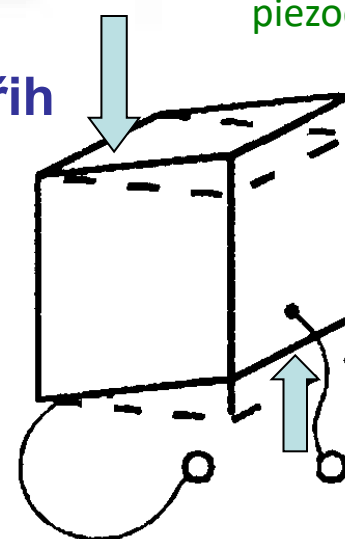
příčný



podélný

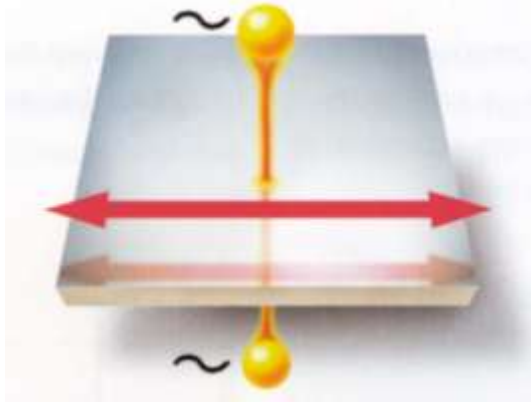


střih

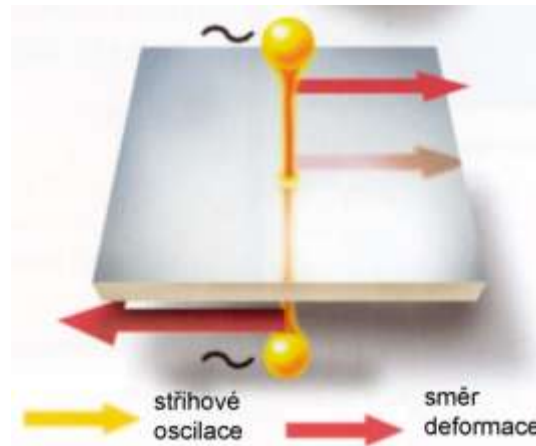


# Princip činnosti aktuátorů – oscilační módy piezoelektrických rezonátorů

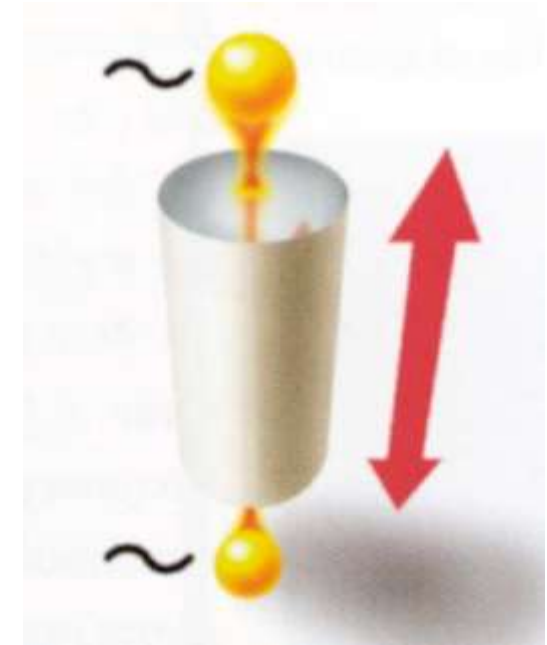
Změna podélného rozměru  
tenké pravoúhlé desky



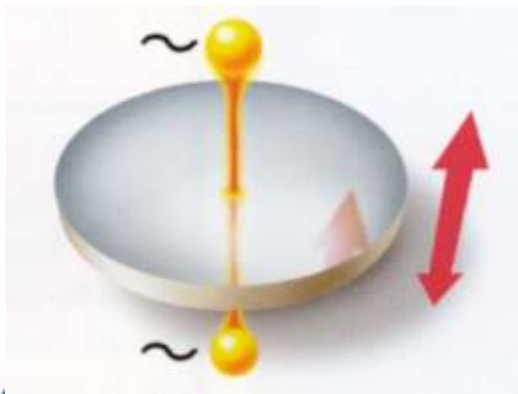
Změna ve stříhu



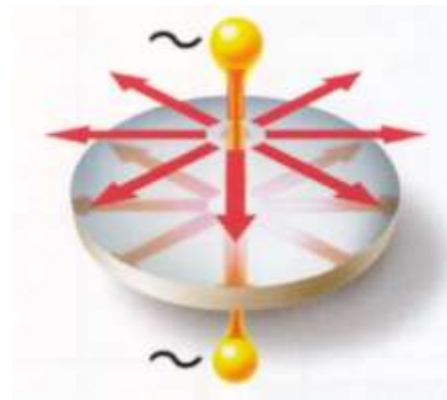
Podélná změna válce



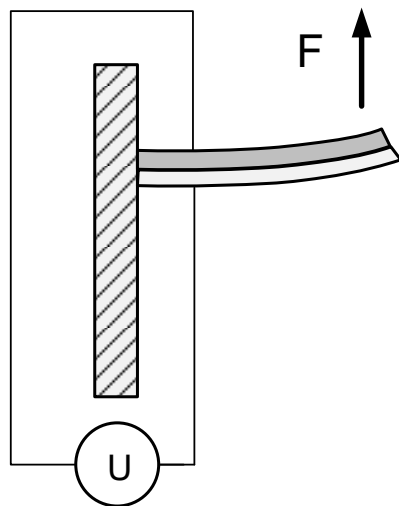
Změna tloušťky tenké  
kruhové desky



Planární změna tloušťky  
tenké kruhové desky



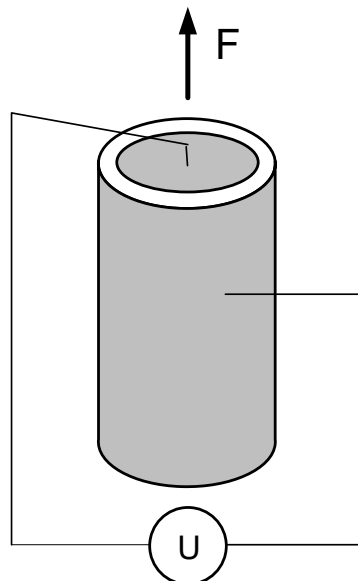
## Nosník



Posuv ( $\mu\text{m}$ )  $\leq 1000$   
Síla (N)  $\leq 5$   
Napětí (V)  $60 \div 400$

a)

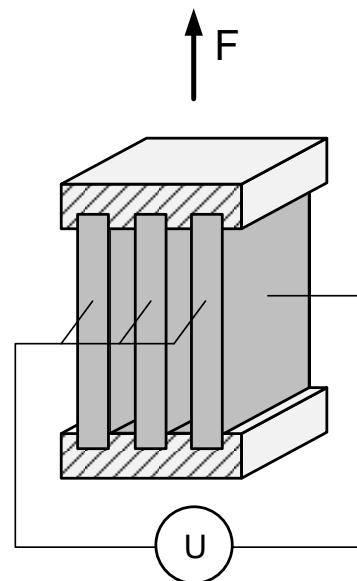
## Torze



$\leq 50$   
 $\leq 1000$   
 $120 \div 1000$

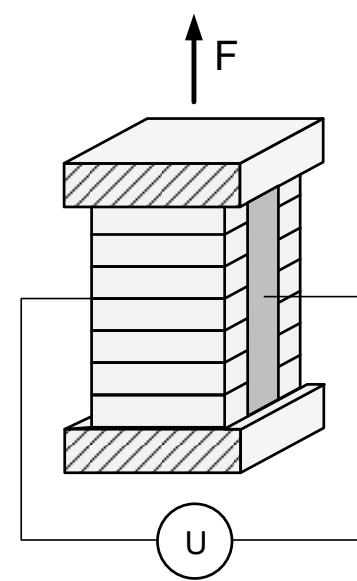
b)

## Dilatace



$\leq 50$   
 $\leq 1000$   
 $60 \div 500$

c)



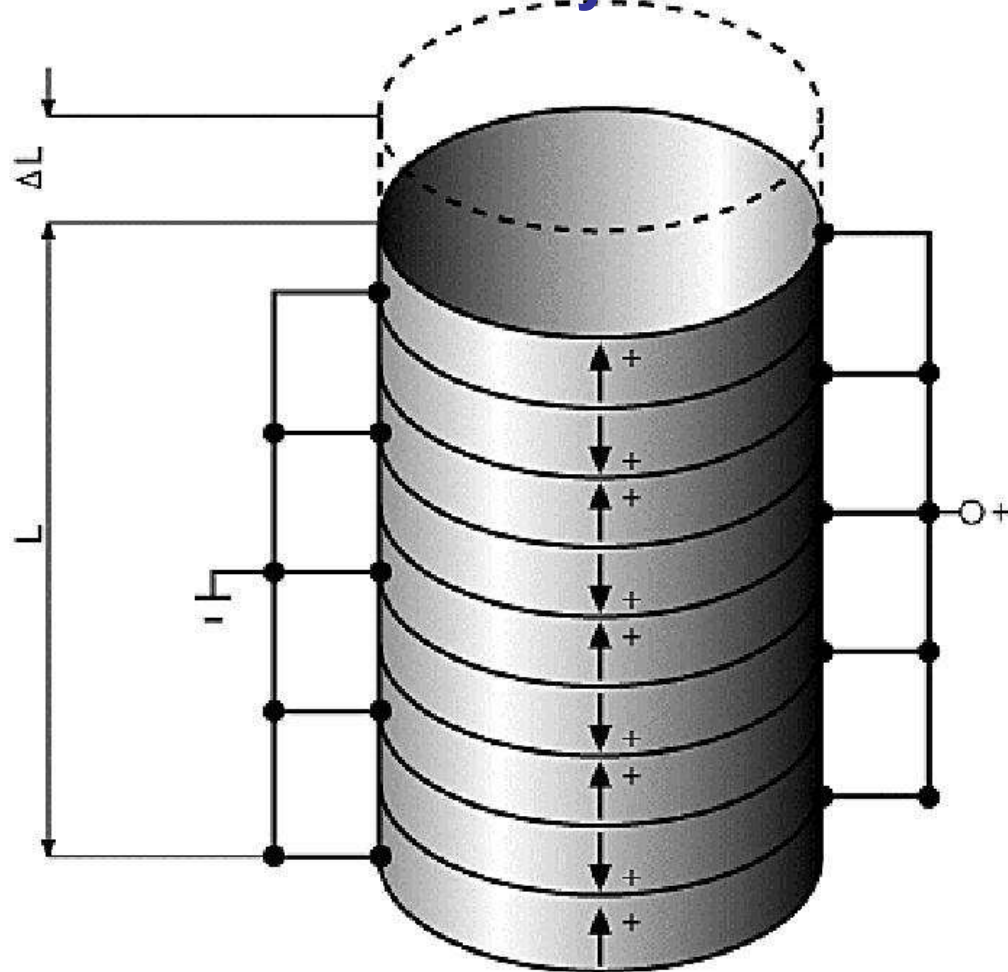
$20 \div 200$   
 $\leq 3000$   
 $60 \div 1000$

d)

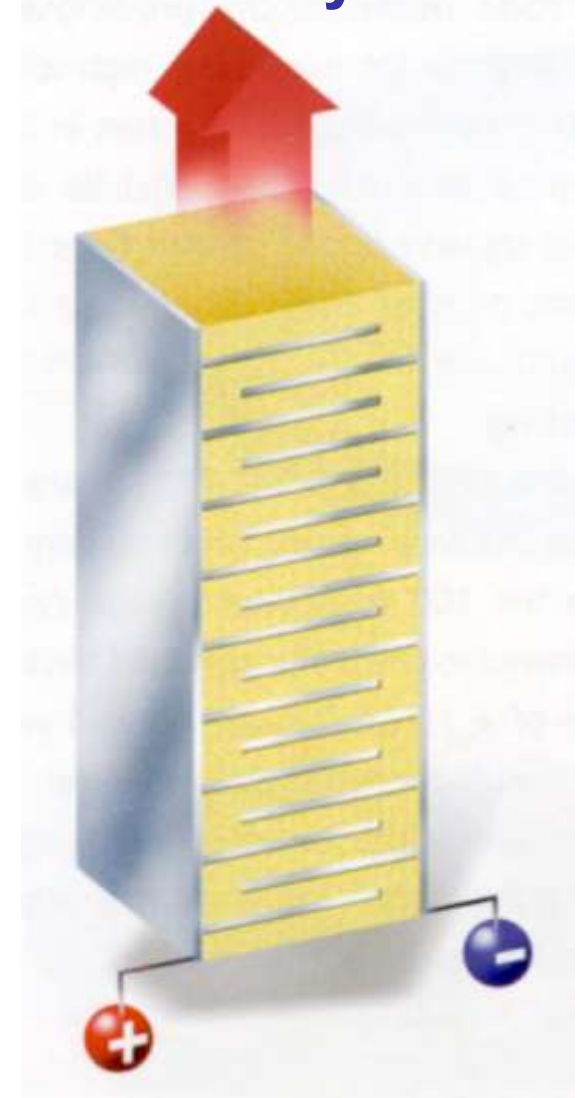
? Piezelektrický aktuátor: nakreslete alespoň 3 základní struktury piezelektrických aktuátorů (nosník, torze, dilatace), porovnejte sílu a posun u těchto struktur

# Piezelektrický jev – baterie aktuátorů

## Piezelektrický aktuátor



## Piezelektrický aktuátor



**c)**

# **Zpracování signálu z piezoelektrických senzorů**

## Piezoelektrické senzory lze modelovat jako:

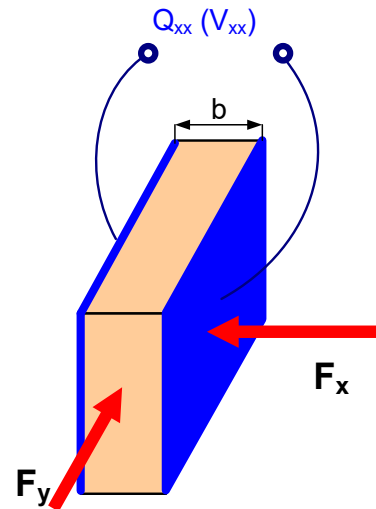
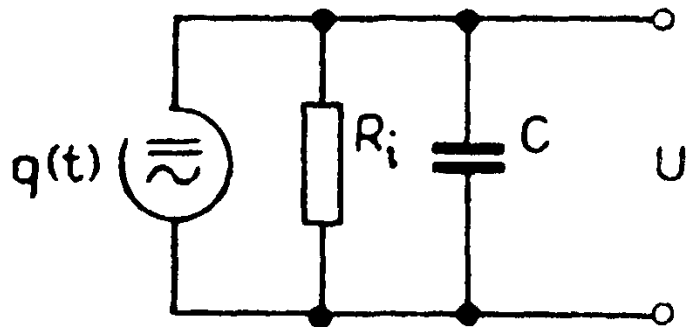
- ❑ Elektrický - jako kondenzátor
- ❑ Mechanický - jako tuhá pružina

System má dvě přirozené rezonanční frekvence, jedna je daná frekvencí vlastních oscilací pružiny a druhá je daná elektrickou kapacitou převodníku (typ. více než 200 MHz).

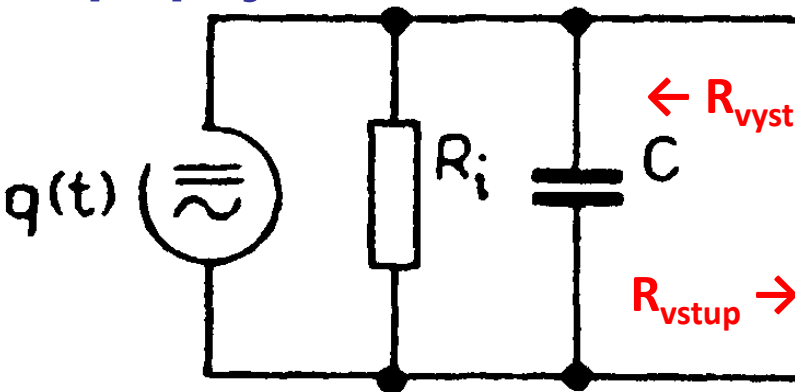
☹ **Nevýhoda** - nemohou být využity k měření statických sil



## senzor – náhradní obvod



## připojení



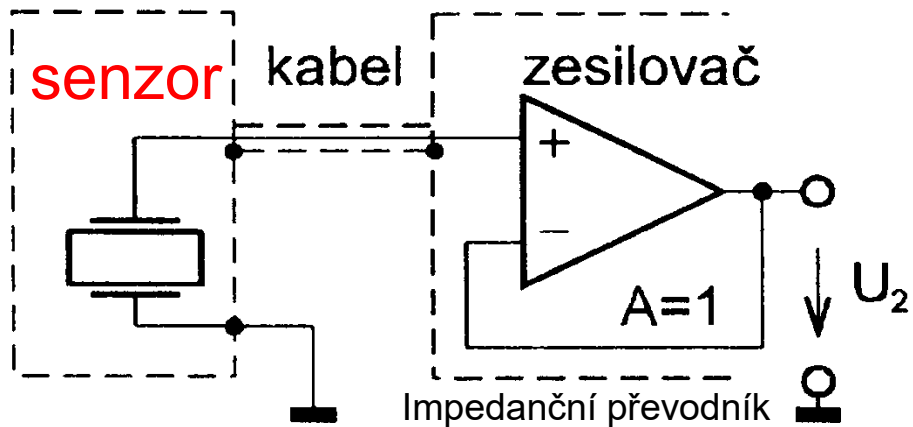
**Elektronický  
vyhodnocovací  
obvod**

$$R_{vstup} \gg R_{vyst}$$

? Vyhodnocování signálů z piezoelektrických senzorů: Nakreslete náhradní elektrický model piezoelektrického senzoru, nakreslete připojení vyhodnocovacího obvodu, Definujte podmínku pro vstupní impedanci připojeného elektrického vyhodnocovacího obvodu.

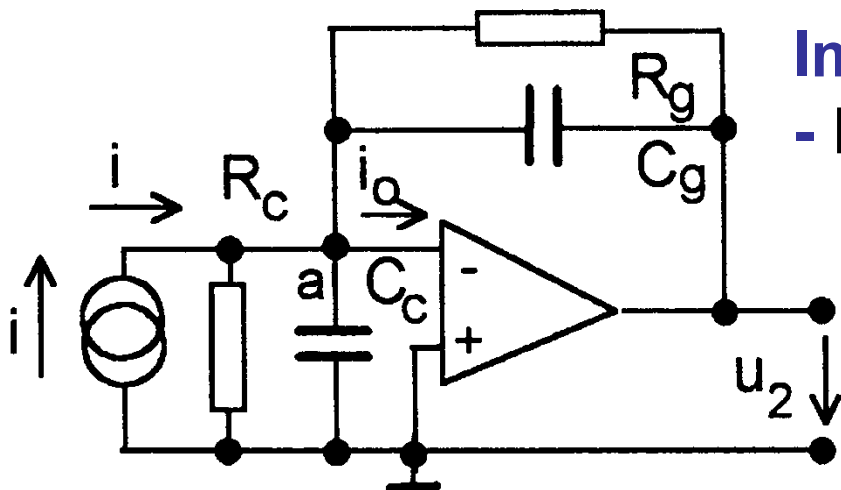
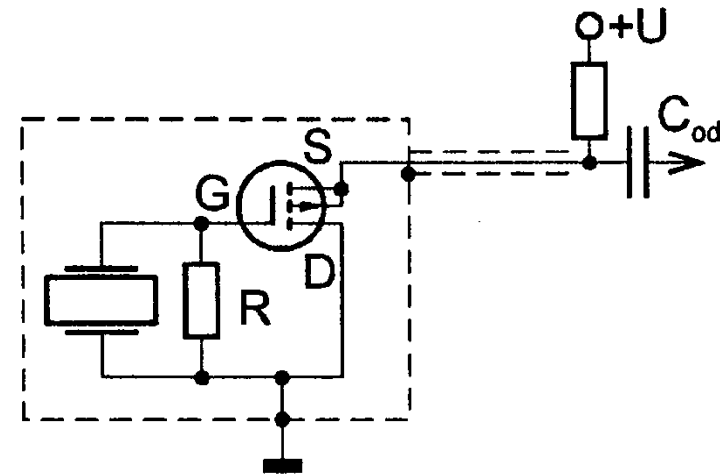
Senzor je zdroj náboje → nutné impedanční přizpůsobení

## Impedanční převodník



## Impedanční převodník

ve společném pouzdře se senzorem

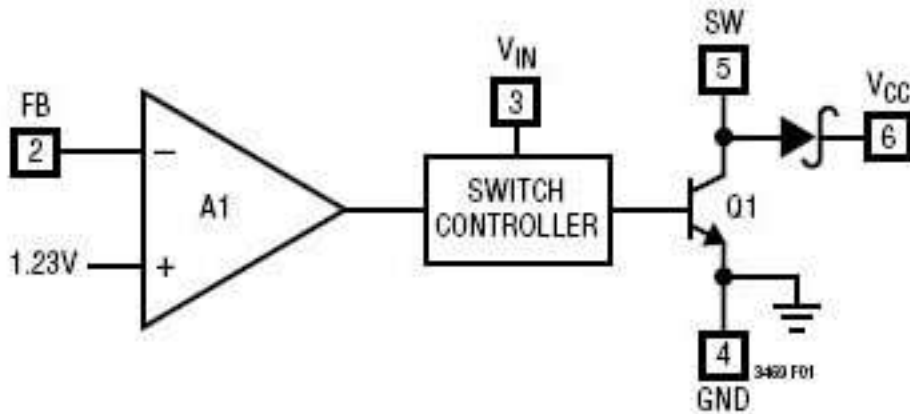


## Impedanční převodník

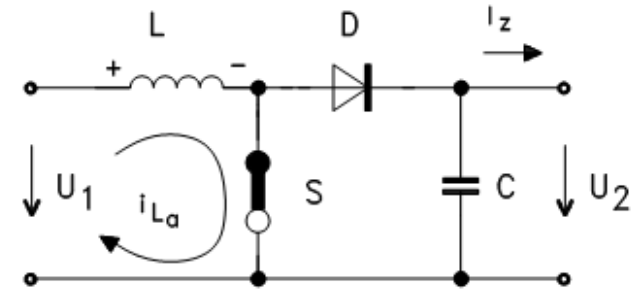
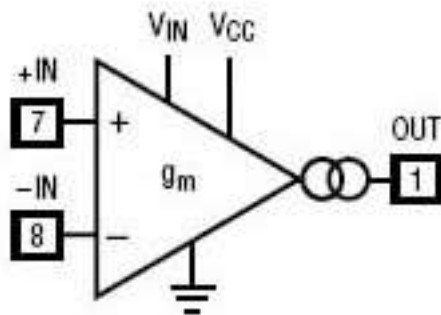
- Nábojový zesilovač

? Vyhodnocování signálů z piezelektrických senzorů: Nakreslete zjednodušeně příklady dvou impedančních oddělovačů připojovaných na výstup piezelektrického senzoru a převádějících vysokou impedanci na nízkou

# Piezelektrický jev – příklad zpracování signálů LT3469

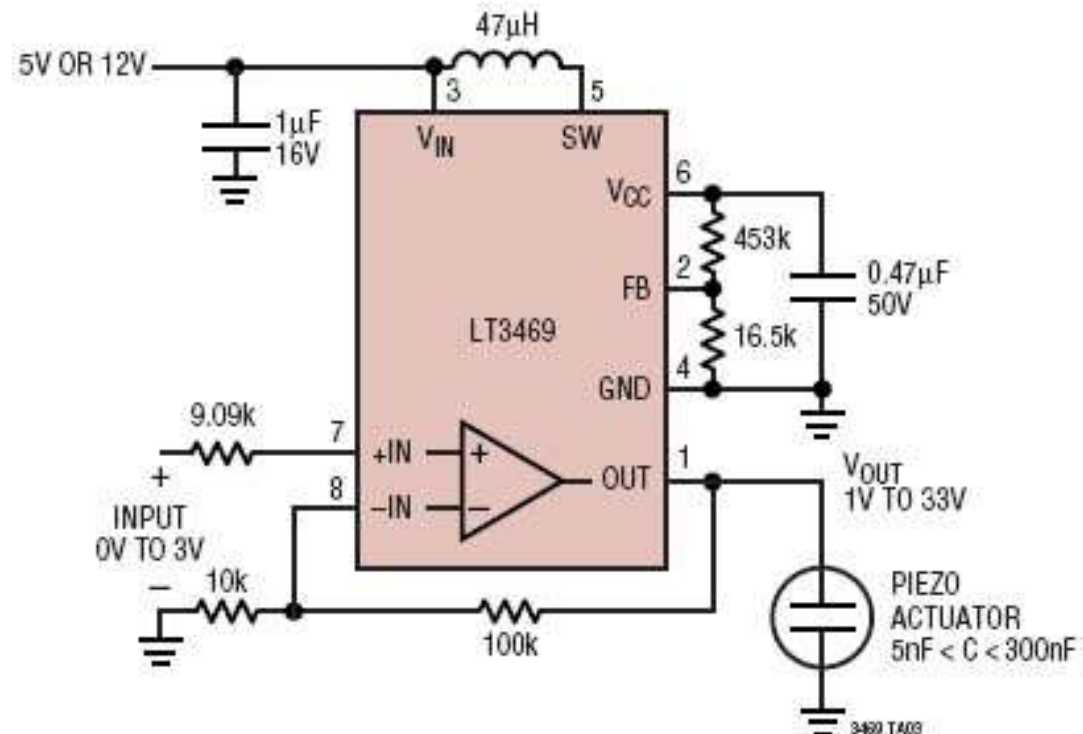


**Zesilovač** - vstupního řídicího signálu



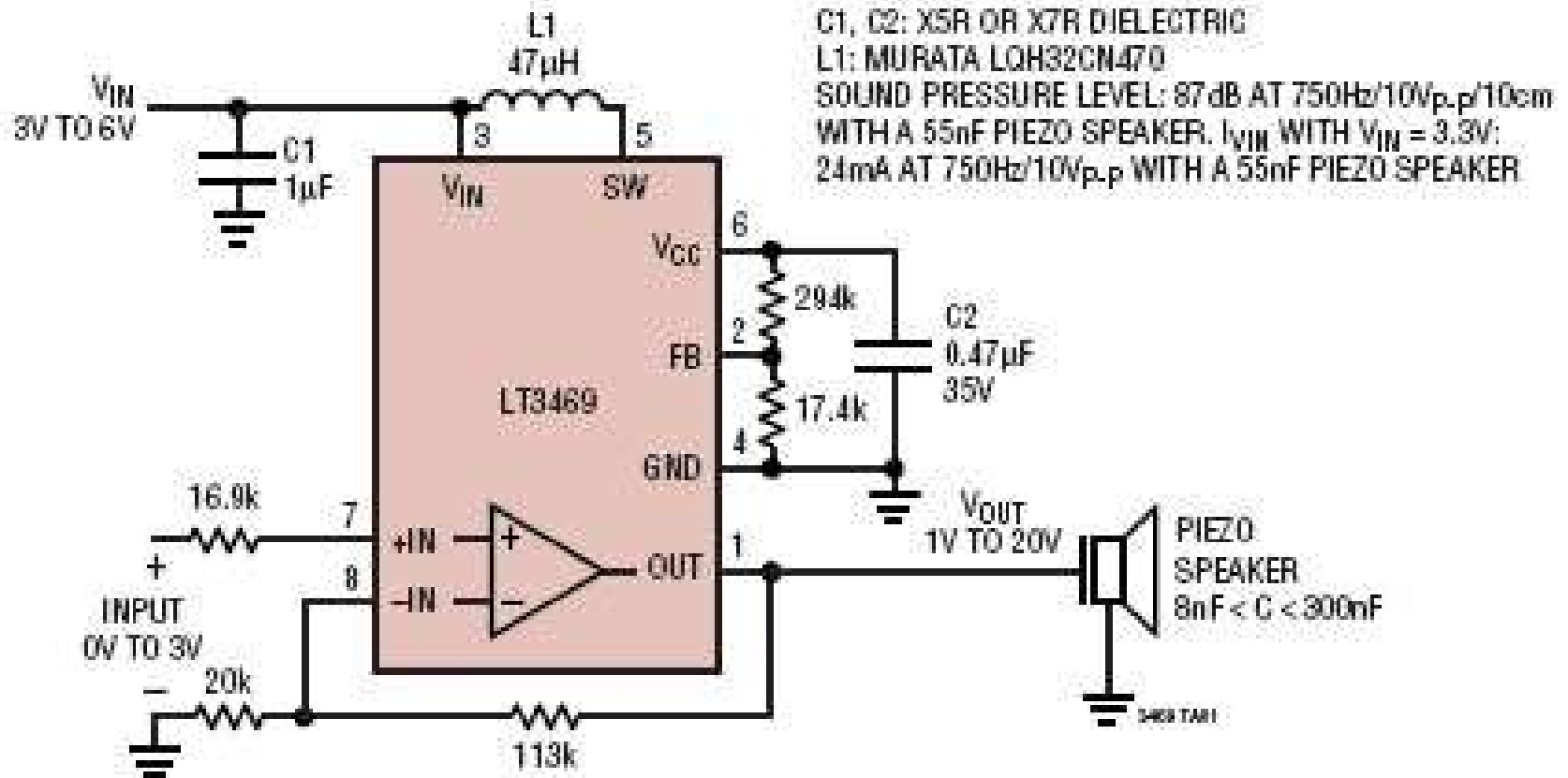
**Spínaný zdroj** – zvyšující zapojení

Piezo Microactuator Driver



# Piezelektrický jev – příklad zpracování signálů LT3469

## Piezo Speaker Driver



# **D) Aplikace piezoelektrických senzorů a akčních členů**

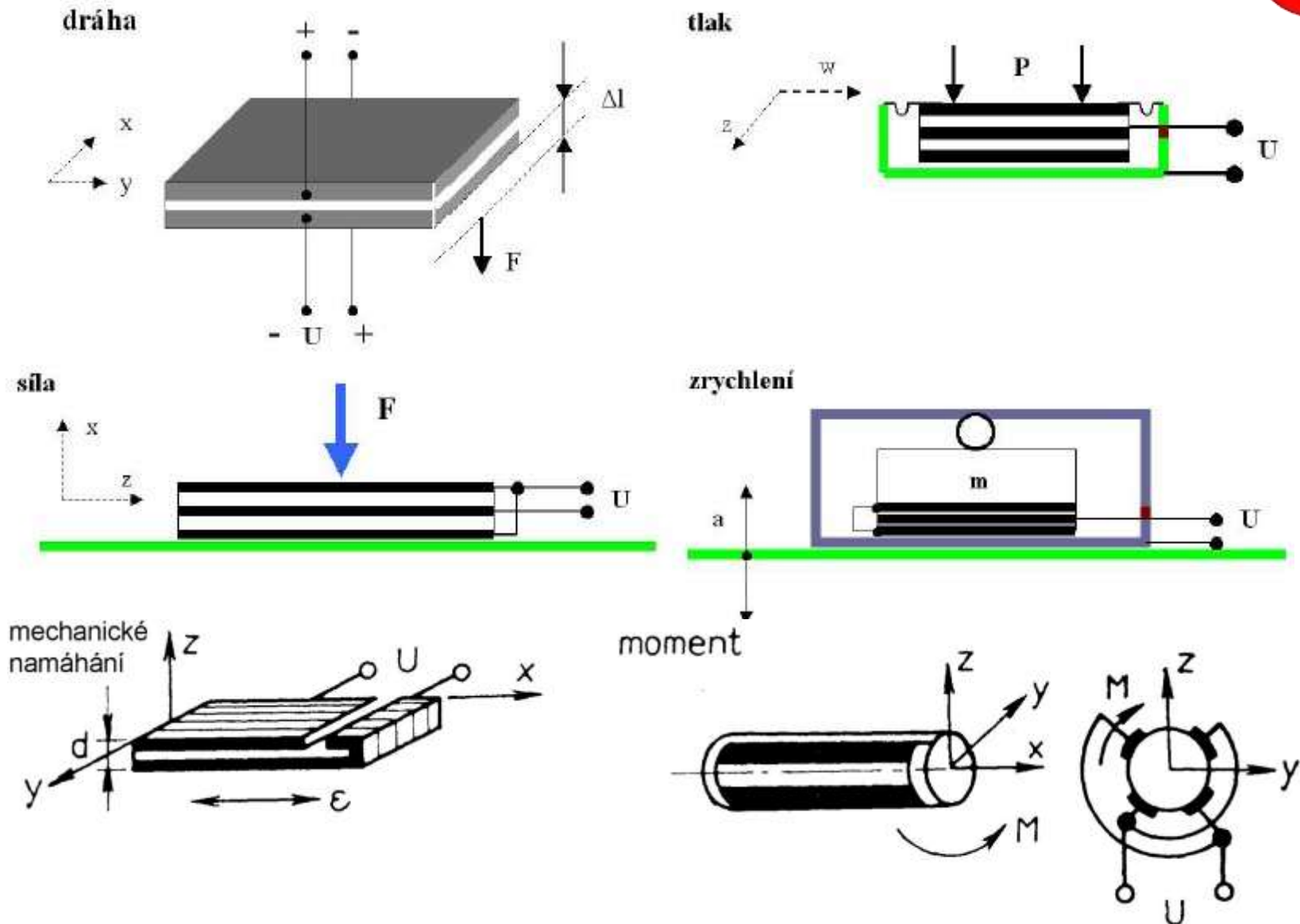


# Piezoelektrický jev – typické použití pro měření

- ☐ Mechanická deformace
- ☐ Síla
- ☐ Výchylka (dráha)
- ☐ Akcelerace - akcelerometry, jejichž setrvačná hmota působí na piezoelektrický element

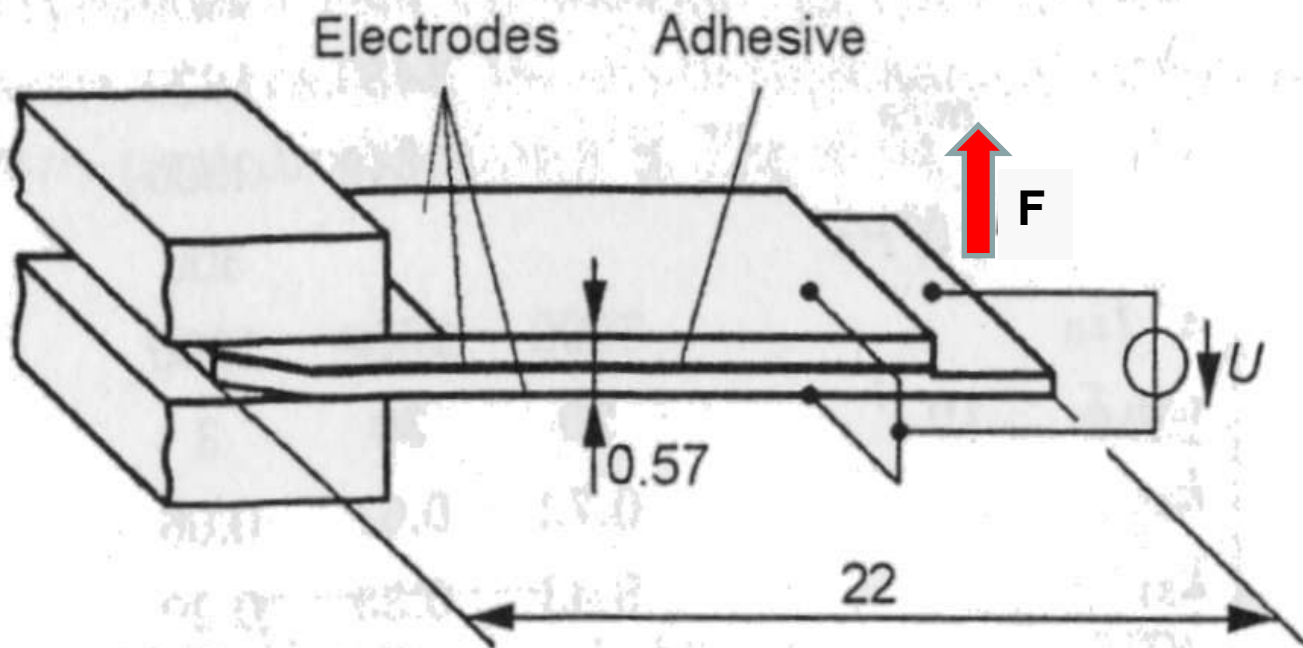


# Piezoelektrický jev – typické použití pro měření



# Piezoelektrický jev – typické použití pro měření

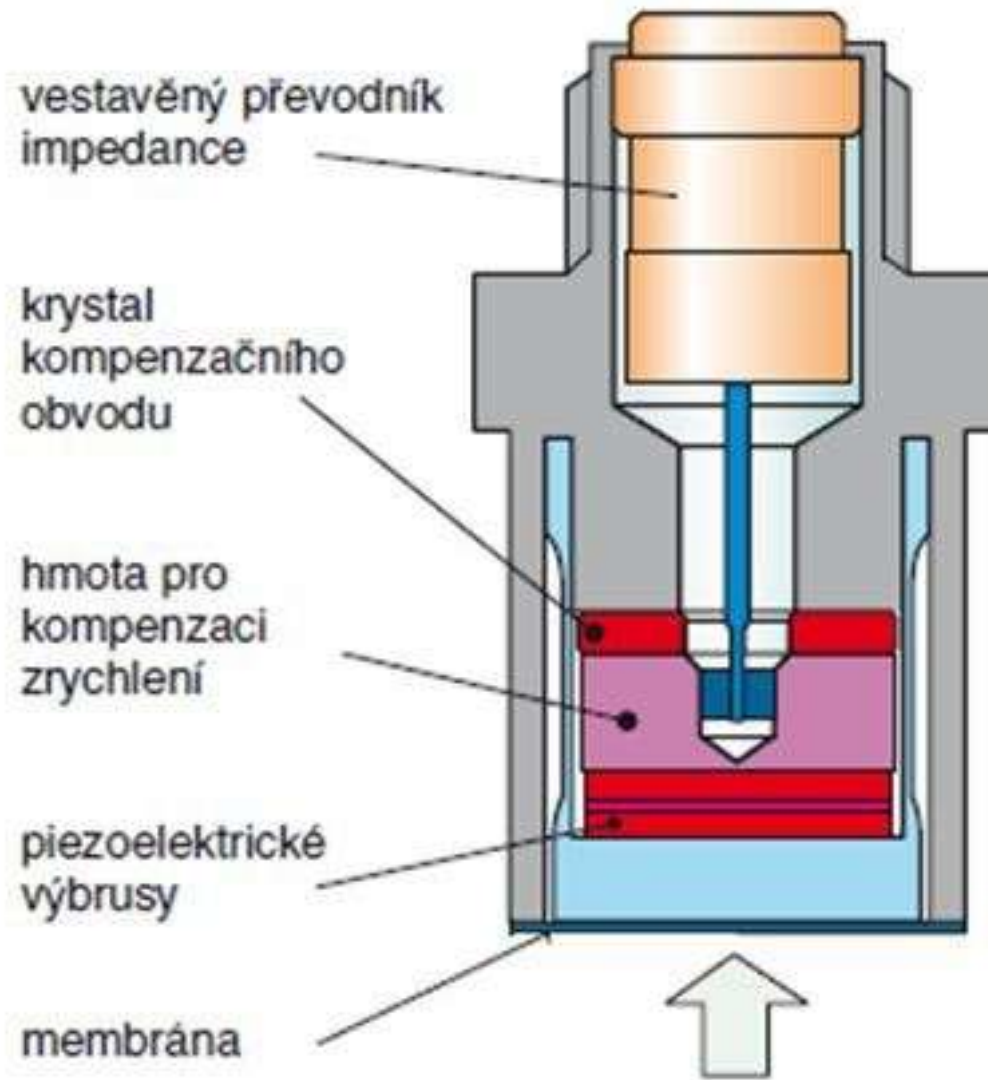
Piezoelektrický  
ohybový senzor





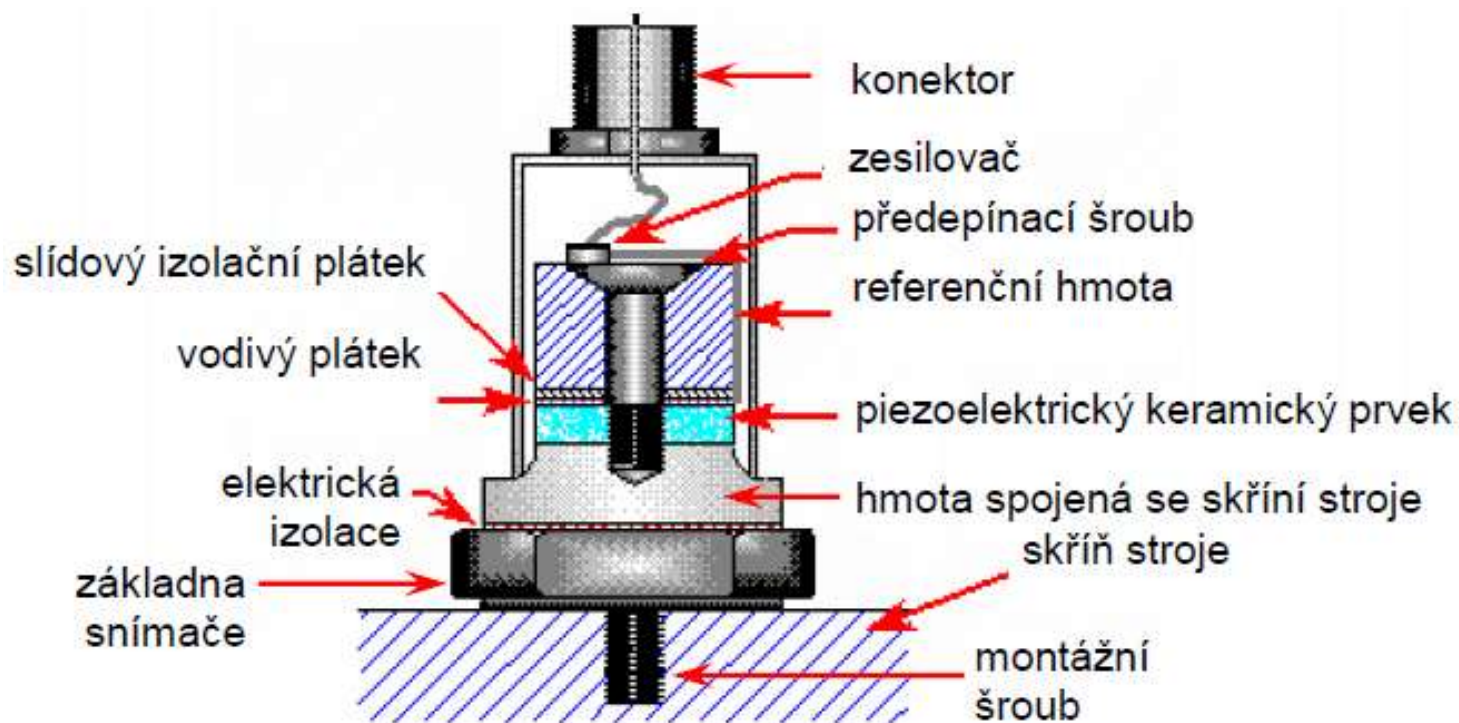
# Piezoelektrický jev – senzor tlaku

## Senzor tlaku



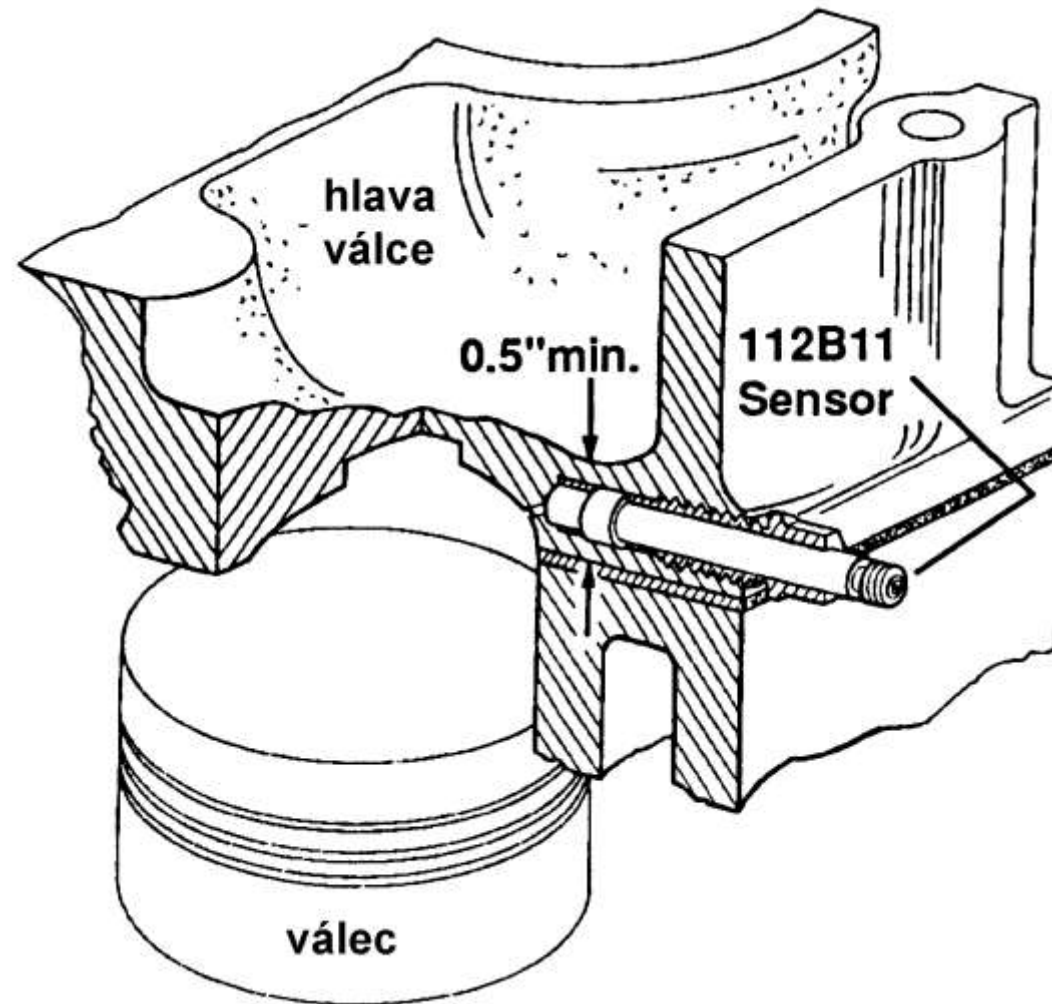
# Piezelektrický jev – senzor vibrací

## Senzor vibrací



# Piezelektrický jev – typické použití pro měření

## Měření tlaku v hlavě válců

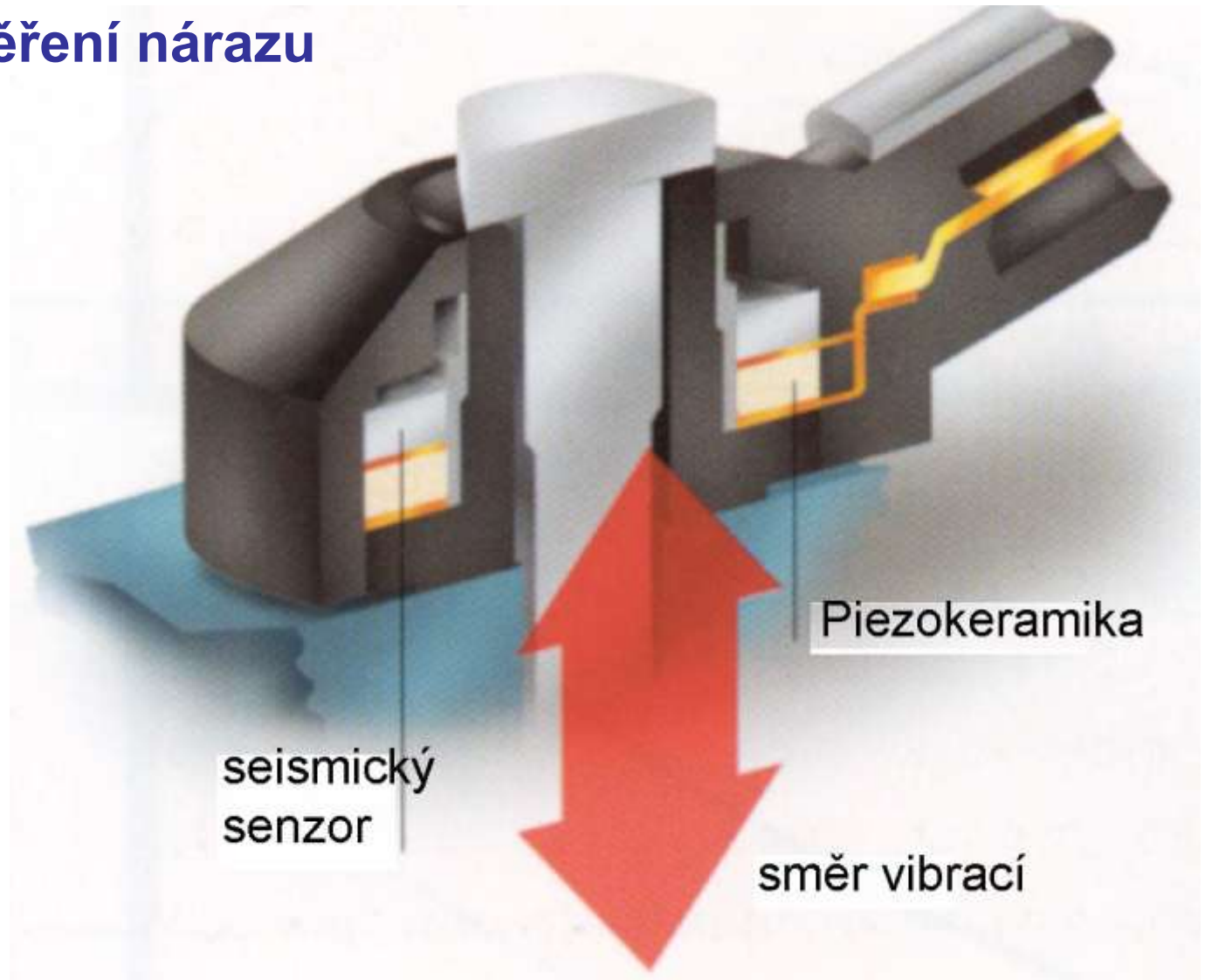


Model 112B11  
Engine Probe

Model 112B10\*

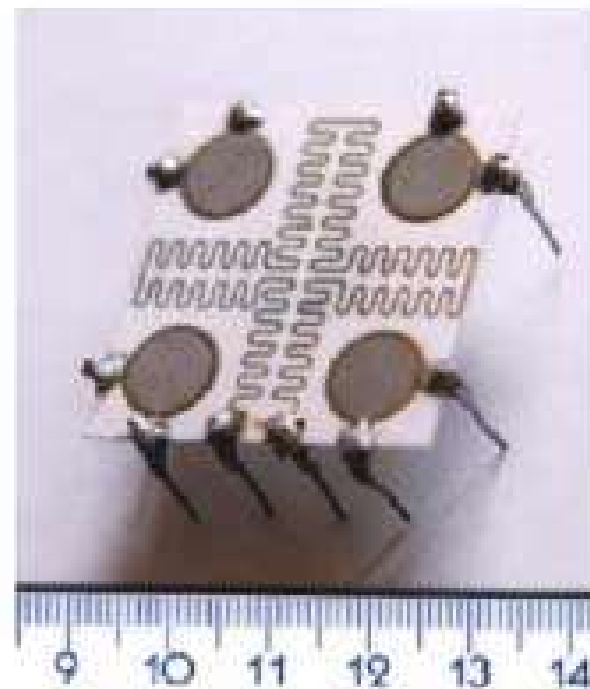
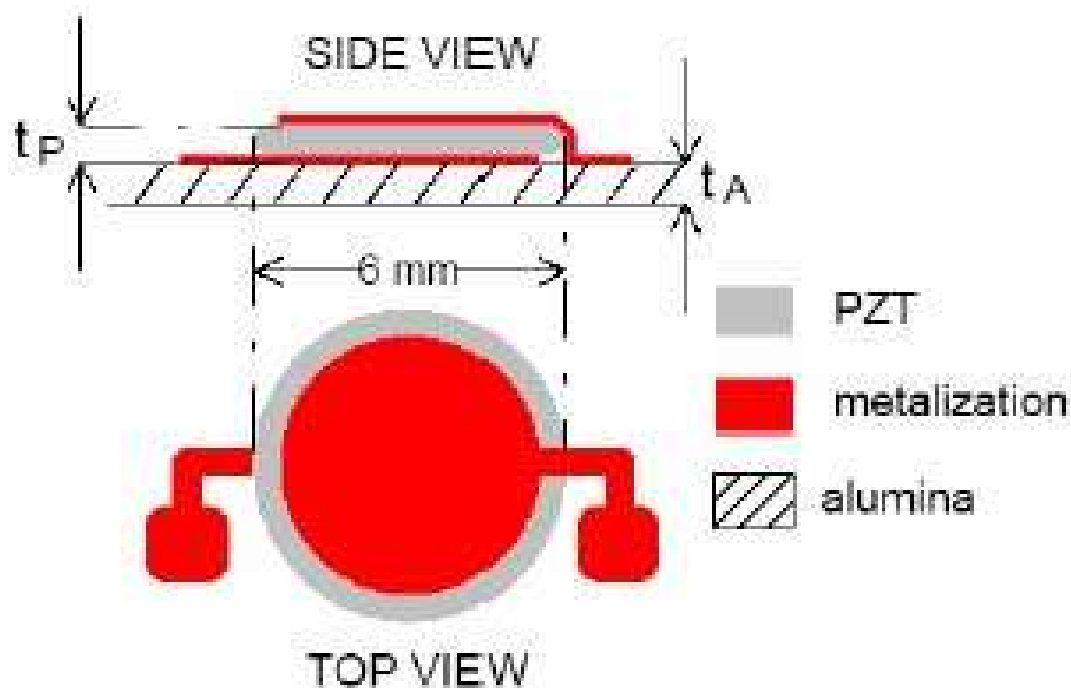
# Piezoelektrický jev – typické použití pro měření

## Senzor k měření nárazu



# Piezelektrický jev – typické použití pro měření

## Piezelektrická rezonanční mikrováha

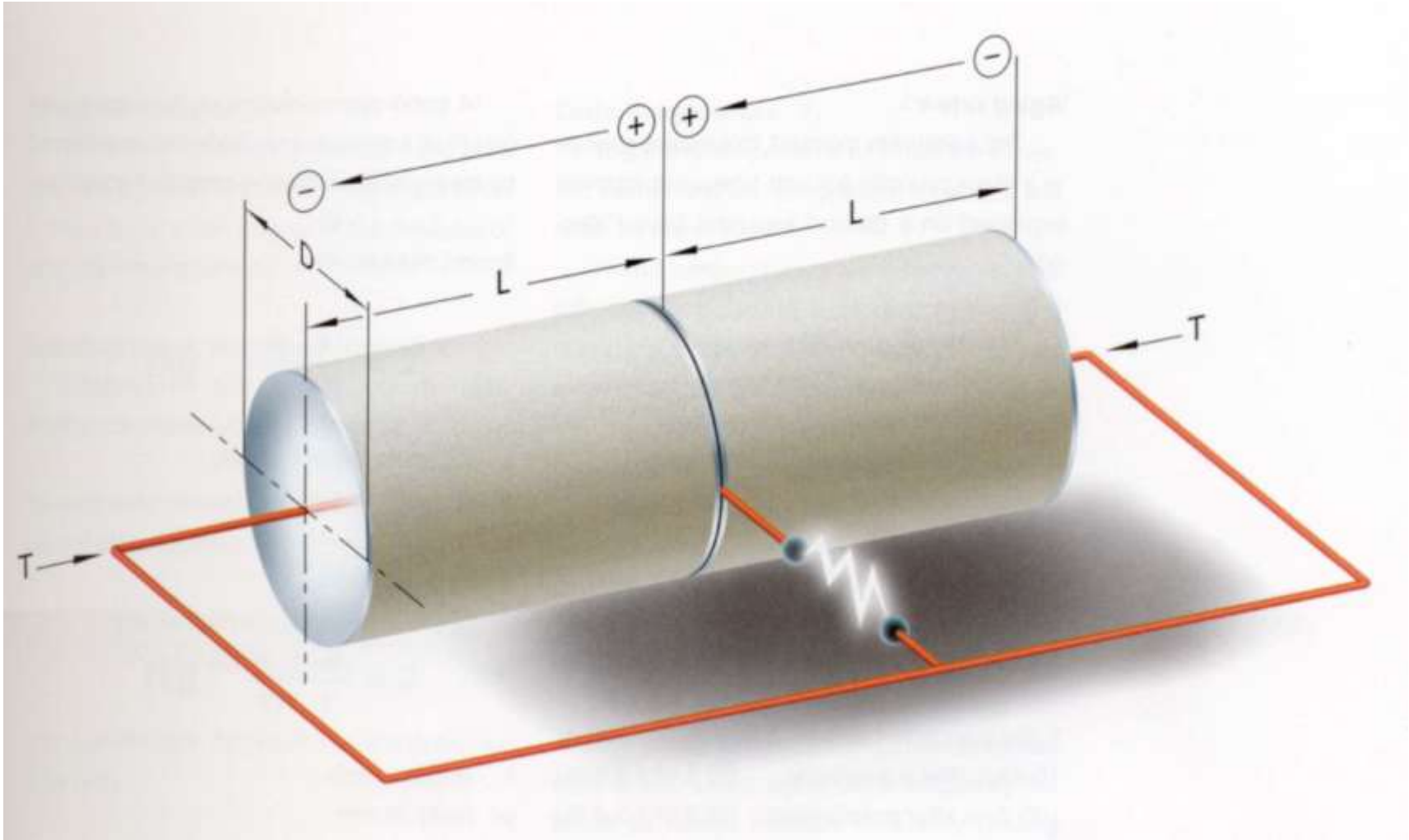


- Piezelektrický rezonátor
- Substrát obsahuje topný element, který udržuje pracovní teplotu na 45°C (teplotní stabilizace rezonančního kmitočtu senzoru)
- Oscilátor je zapojen do fázového závěsu - vstup je přepínán ze všech 4 senzorů  
Oscilátor pracuje na kmitočtu 7,16 MHz
- Citlivost - cca 510 Hz/ $\mu$ g
- Rozlišení 40 ng



# Piezelektrický jev – aktuátor (zapalovač plynu)

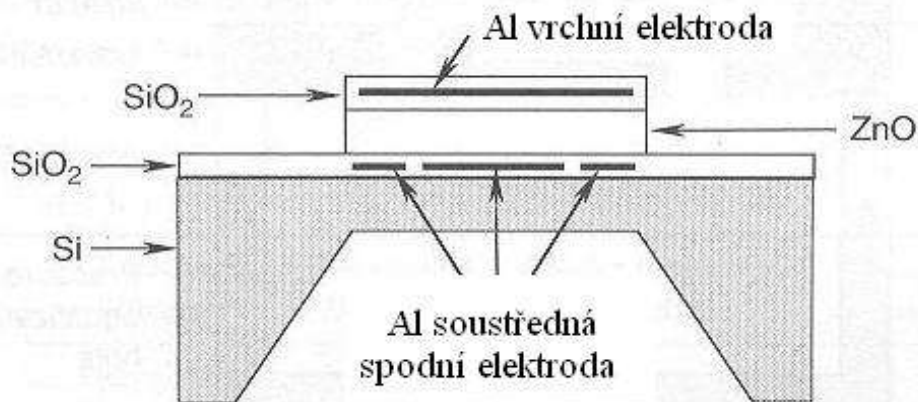
**Zdroj vysokého napětí** pro piezelektrický zapalovač plynu



# Piezelektrický jev – piezelektrický mikrofon

- Piezelektrický senzor obsahuje tenkou membránu, která je vyrobena z piezelektrického materiálu nebo mechanicky kontaktovaného nosníku skládajícího se ze dvou vrstev piezelektrického materiálu s opačnou polarizací.
- Vertikální pohyb membrány zapříčiňuje vznik mechanického napětí v piezelektrickém materiálu a dochází tak ke vzniku elektrického výstupního napětí.
- Mikrofony vykazují citlivost  $50 \mu\text{V} \cdot \text{Pa}^{-1}$  -  $250 \mu\text{V} \cdot \text{Pa}^{-1}$  a kmitočtovou odezvu 10 Hz – 10 kHz (pokles 5 dB).

**Využití:** Elektronické **stetoskopy**, **detekce dýchání**

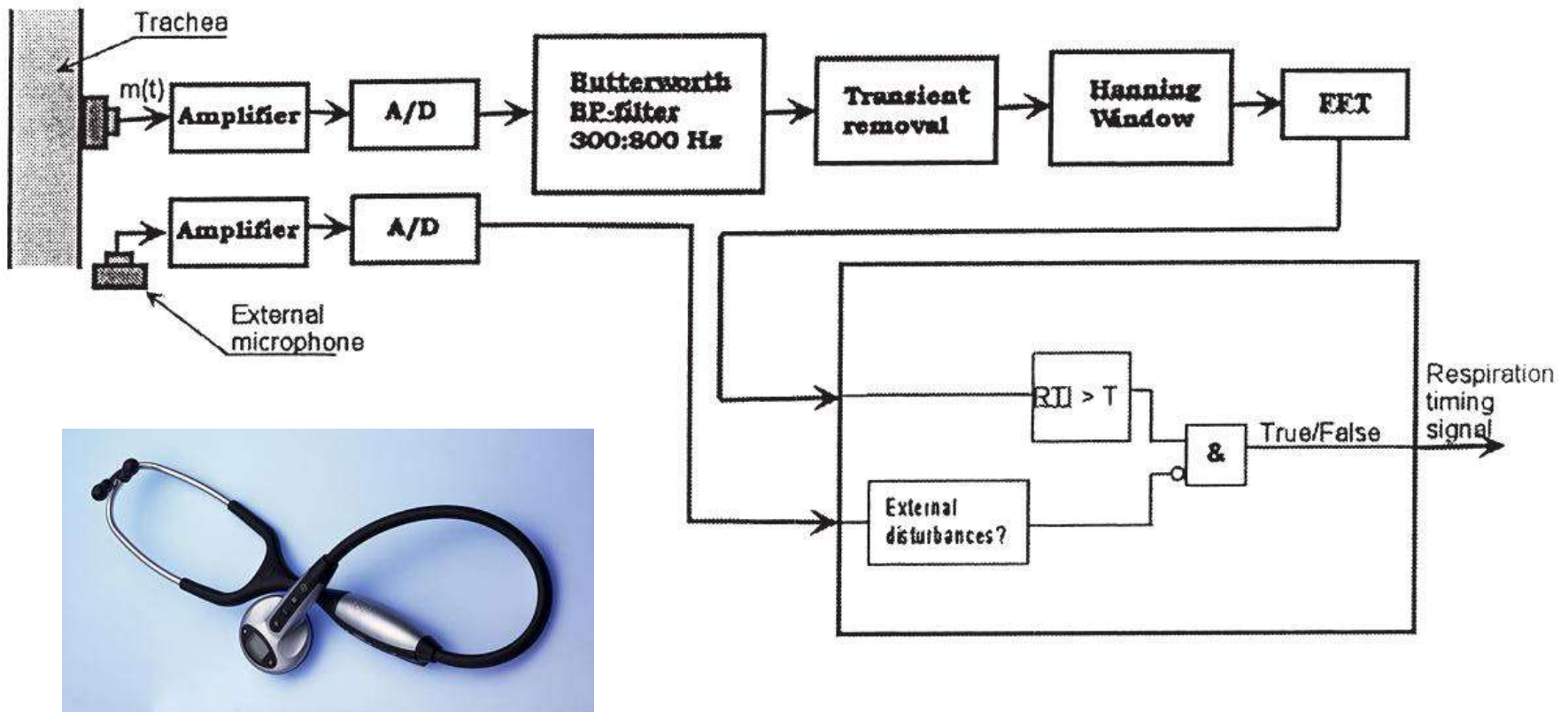


## Piezelektrický křemíkový mikrofon

obsahující 30  $\mu\text{m}$  silnou membránu z Si o průměru 3 mm. Na vrchní straně membrány deponována vrstva 3-5  $\mu\text{m}$

# Piezoelektrický jev – piezoelektrický mikrofón

- **Elektronický fonendoskop** – pomocí filtrů umožňuje zvolit oblast vyšetření: plíce, srdce, břišní dutina.
- **Detekce dýchání** – založena na snímání bioakustických signálů vznikajících v průdušnici při dýchání



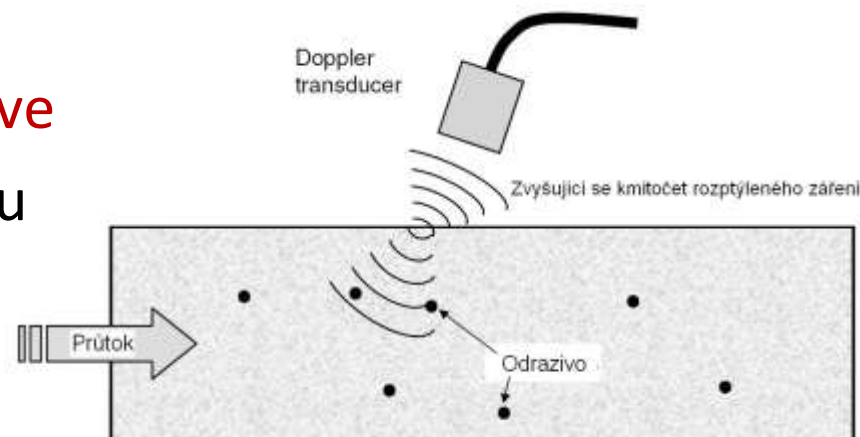


# Piezoelektrický jev – měření průtoku

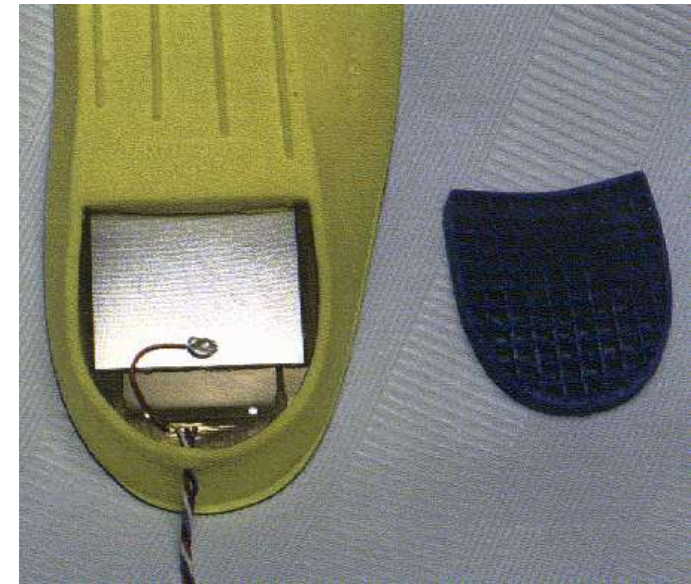
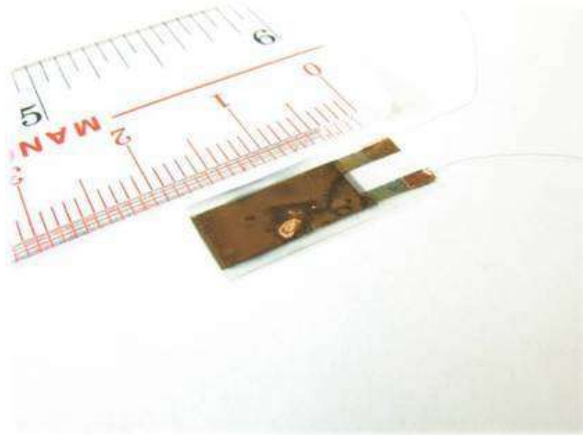
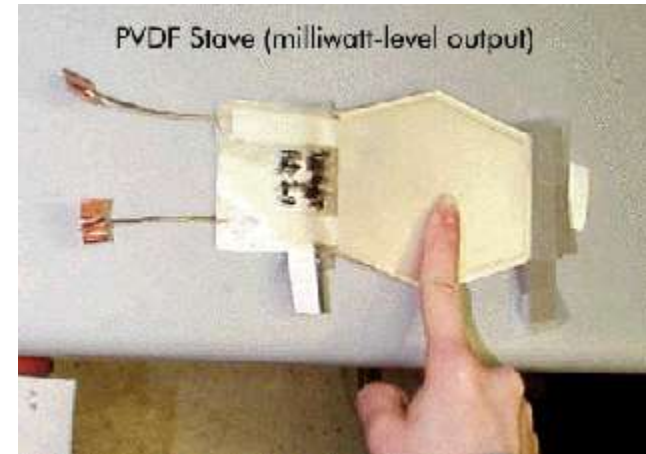
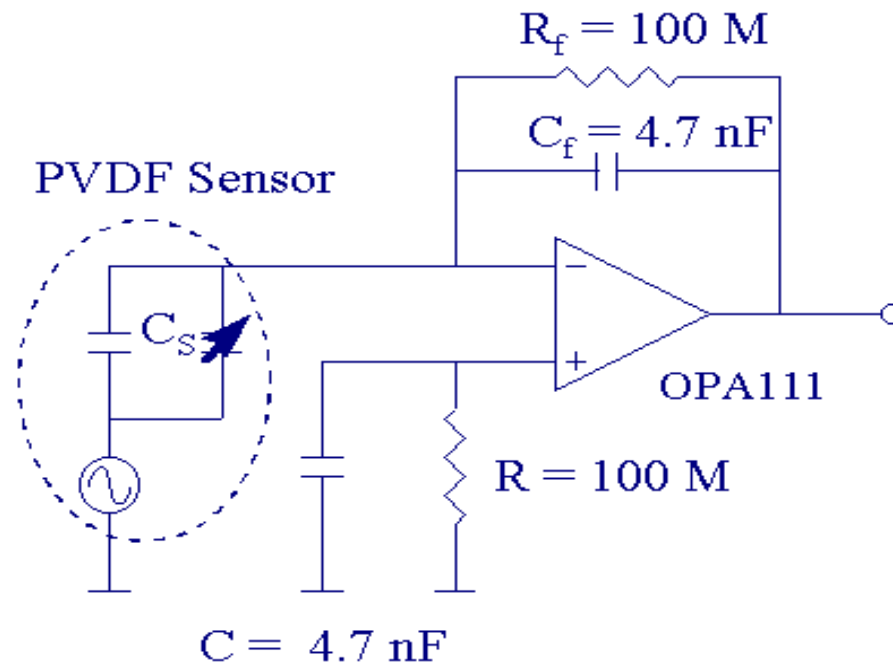
- Při měření průtoku se využívá **Dopplerova jevu**: generované vlny se odrážejí od pohybující se struktury a jejich kmitočet je posunut.
- Posun kmitočtu závisí proporcionálně na rychlosti pohybující se struktury vzhledem k vysílači/přijímači a směr posuvu závisí na směru pohybu.
- Zařízení pro monitorování obvykle pracuje v kontinuálním módu, používající piezoelektrický transducer

## Použití:

- Určení rychlosti a směru pohybu **krve**
- Monitorování **srdeční činnosti** plodu
- Detekce malých **sraženin**



# Piezoelektrický jev – generátor elektrické energie



# Piezoelektrický jev – typické použití piezoelektr. součástek

Huge Range of  
**Piezoelectric Transducers**  
For Sensing, Actuating, and Energy Harvesting



## Piezoelectric Sensors

- Measure Pressure
- Measure Acceleration
- Measure Strain Force

[More »](#)



## Piezoelectric Actuators

- Flow Valves
- Air Regulators
- Low Power Transducers

[More »](#)



## Flexible Piezoelectrics

- Conformable Actuator
- Adds Directionality
- For Curved Surfaces

[More »](#)



## Piezoelectric Fan

- Low Power
- Easy Intergration
- Cooling systems

[More »](#)



## Piezoelectric d33 effect

- Bonded Actuator
- High Strain Output
- Coupling Efficiency

[More »](#)



## Piezoelectric Energy Harvester

- Vibration Harvesting
- Robust Scavenger
- Reliable

[More »](#)



## Vibration Energy Harvester

Voltare

[More »](#)



## High Voltage Piezo Amplifier

- QPA200

[More »](#)



## Smart Materials Starter Kit

- SMA Kit

[More »](#)



## Piezoelectric Accessories

- Piezo Cables etc.

[More »](#)



## Control Forge Software

- Control Toolbox

[More »](#)



## DynaMod Software

- System Identification

[More »](#)



# Otázky ke zkoušce

1. Podélný piezoelektrický jev: Nakreslete princip činnosti piezoelektrického senzoru, Napište základní rovnice pro výpočet náboje a napětí.
2. Příčný piezoelektrický jev: Nakreslete princip činnosti piezoelektrického senzoru, Napište základní rovnice pro výpočet náboje a napětí se zahrnutím vektoru polarizace, význam jednotlivých členů v rovnicích.
3. Piezoelektrické materiály: Napište alespoň 3 základní typy piezoelektrických materiálů, vysvětlete pojem polarizace piezoelektrického materiálu.
4. Piezoelektrické materiály: Napište názvy 3 typických piezoelektrických materiálů, nakreslete příklad teplotní závislosti s Curie teplotou, jaký význam má tato teplota.
5. Piezoelektrický senzor: nakreslete základní typy mechanického zatěžování piezoelektrické struktury
6. Piezoelektrický aktuátor: nakreslete alespoň 3 základní struktury piezoelektrických aktuátorů (nosník, torze, dilatace), porovnejte sílu a posun u těchto struktur.
7. Vyhodnocování signálů z piezoelektrických senzorů: Nakreslete náhradní elektrický model piezoelektrického senzoru, nakreslete připojení vyhodnocovacího obvodu, Definujte podmínku pro vstupní impedanci připojeného elektrického vyhodnocovacího obvodu.
8. Vyhodnocování signálů z piezoelektrických senzorů: Nakreslete zjednodušeně příklady dvou impedančních oddělovačů připojovaných na výstup piezoelektrického senzoru a převádějících vysokou impedanci na nízkou.

