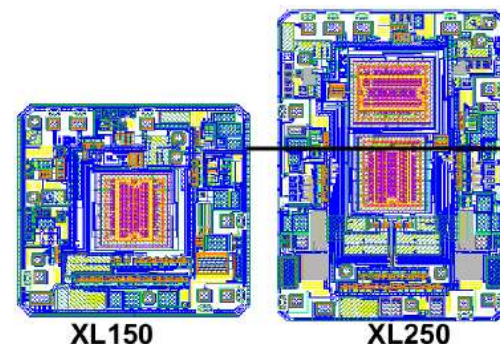


# 6. AKCELEROMETRY

**Přednášející:** prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
[husak@fel.cvut.cz](mailto:husak@fel.cvut.cz)  
<http://micro.feld.cvut.cz>  
tel.: 2 2435 2267

**Cvičící:** Ing. Adam Bouřa, Ph.D.  
Ing. Alexandr Laposa, Ph.D.  
Ing. Tomáš Teplý

MEMS eCompass



# Akcelerometr:

## Akcelerometr - senzor pro měření:

- **dynamické zrychlení** - síla vzniklá změnou rychlosti pohybujícího se předmětu (senzoru)
- **statické zrychlení** - síla vzniklá působením zemské gravitace

(Pozn.: Při měření dynamického zrychlení je nutné přítomnou statickou složku filtrovat)

### Měření náklonu (úhlu)

Detekce změny náklonu měřením zemské gravitace (statické zrychlení).



### Měření setrvačných sil

Měření rychlosti, vzdálenosti nebo síly - zrychlení integrované přes čas se rovná rychlosti objektu a rychlost integrovaná přes čas je rovná vzdálenosti.

Použití - airbag aut, navigační systémy, řízení výtahů apod.



### Měření otřesů (nárazu) nebo vibrací

Měření vibrací (např. stroje nebo zemětřesení), kontrola „správného“ chodu stroje (predikce zadření ložisek apod.)



## Accelerometers Measure “*g*”

To sell accelerometers, it is important to understand the concept of “*g*”, the unit that measures the earth’s gravitational pull. Resolution is the minimum amount of *g*’s a device can measure. Here’s a brief guide to some relative *g* measurements.

<b>1 <i>g</i></b>	The acceleration exerted by the Earth’s gravity on an object (for example, a laptop sitting on your desk experiences 1 <i>g</i> of acceleration)
<b>0-2 <i>g</i></b>	The acceleration range experienced when a human moves, for example, walking
<b>5-30 <i>g</i></b>	The acceleration experienced by the driver in a typical car crash
<b>100-2000 <i>g</i></b>	The acceleration your laptop would experience if you dropped it from 3 feet high onto a concrete floor
<b>10,000 <i>g</i></b>	The acceleration your laptop would experience if you shot it from a cannon

$$1\text{ g} \approx 9,82\text{ m.s}^{-2}$$



# Akcelerometr: Princip činnosti

Zkouška

- Měření **absolutního** zrychlení - měření zrychlení vůči zemi, např. zemská přitažlivost
- Měření **relativního** zrychlení - měření zrychlení hmoty vůči pohybujícímu se předmětu

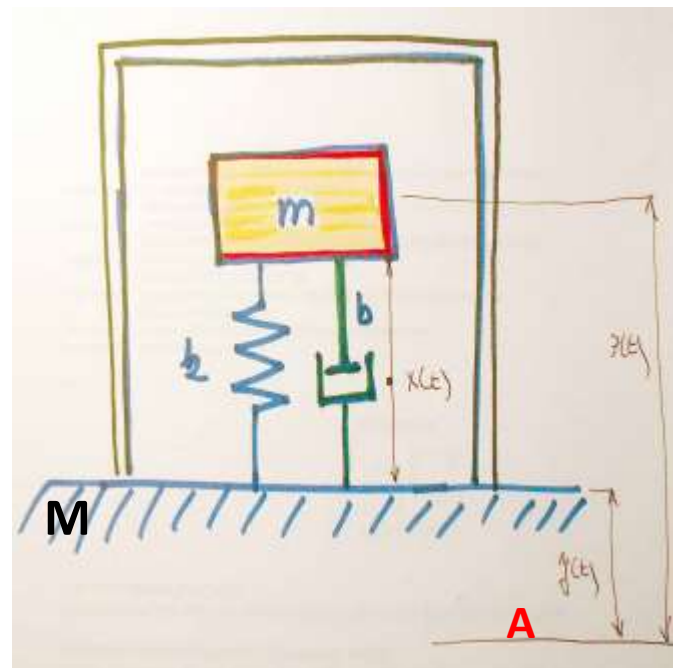
## Relativní / absolutní senzory

- **absolutní senzory** využívají vztažný bod vytvořený uvnitř senzoru
- poloha vůči tomuto bodu se pak měří **relativním senzorem** umístěným uvnitř absolutního senzoru

## Akcelerometr se skládá z:

- **základna** pevně spojená s měřeným objektem (M)
- **pružně** (k) uložena **setrvačná hmota** (m), jejíž výchylka vůči základně je vyhodnocována
- **tlumení** (viskózní) (b) reprezentováno jak fyzickými tlumiči, tak např. prouděním vzduchu při pohybu hmoty

Model absolutního akcelerometru



? Akcelerometr: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti, co je to seismická hmota, napište základní rovnici popisující pohyb hmoty u jednoosého akcelerometru.



# Akcelerometr: Princip činnosti

Zkouška

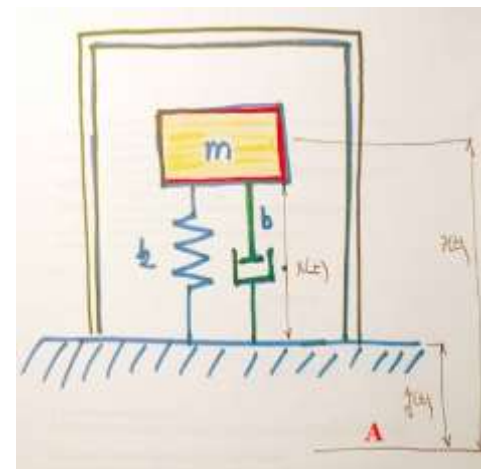
## Pohybová rovnice pro mechanickou soustavu

při vztažném bodu **A**, vůči kterému měříme kmity objektu  $y(t)$  - mechanická soustava je popsána rovnováhou setrvačné hmoty. Direktivní a tlumící síly, tj. pohybovou rovnicí:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + ky = 0$$

Pro časově proměnné složky (základní rovnice):

$$z(t) = x(t) + y(t)$$



? Akcelerometr: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti, co je to seismická hmota, napište základní rovnici popisující pohyb hmoty u jednoosého akcelerometru.





# Akcelerometr: Nejpoužívanější principy

## Accelerometer

### Competing technologies

	Delphi Delco Electronics	SensoNor
Analog Devices	Honeywell	Silicon Sensing Systems
Bosch	Memsic	VTI Hamlin
Conti TEMIC	Motorola	Xfab

### Main characteristics

#### Piezo-resistor principle

- Most widely used principle
- Use of silicon material
- Sensitive to temperature and stress

#### Capacitive principle

- Large measurement range
- Low sensitivity to temperature
- Sensitive to electromagnetic interference

#### Thermal principle

- Usually used for low-frequency tilt measurement

#### Resonating principle

- Use of quartz material
- Good performance but sensitive to temperature, vibration and shocks

#### Piezoelectric principle

- Use of quartz material
- High performance (suitable for harsh environment)
- Relatively high cost



# Akcelerometr: Piezoodporový

- Princip zjišťování mechanického napětí v piezoodporové struktuře
- Piezoodporový akcelerometr ...
- Nejjednodušší **princip tzv. vetknutého (kmitajícího) nosníku**

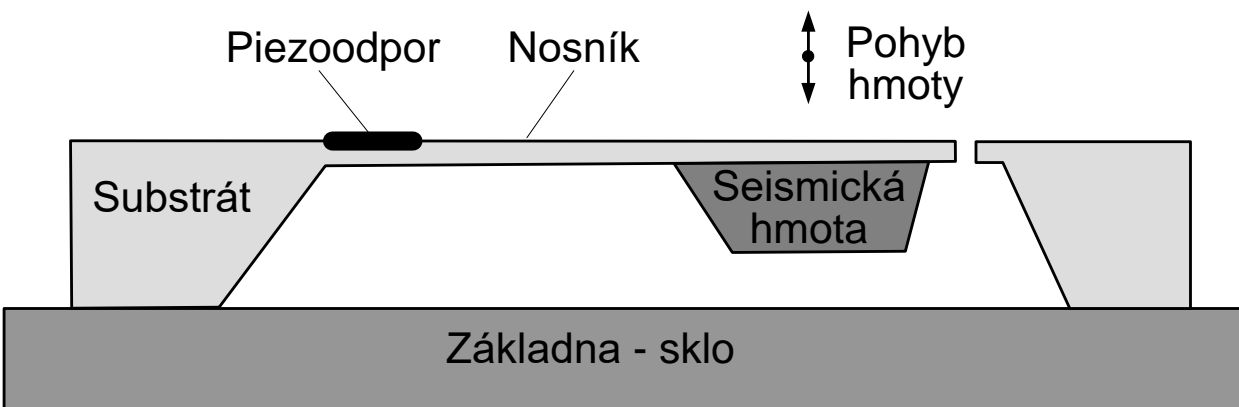
## Princip:

Pohybem hmoty dochází k prodlužování nebo zkracování piezoodporového elementu- princip tenzometru (změna ohmického odporu). Změna je úměrná výchylce hmoty.

## Použití:

Od stejnosměrných hodnot zrychlení asi do 13 kHz.

? Akcelerometr s principem piezoodporovým: Nakreslete zjednodušeně základní strukturu a popište princip činnosti akcelerometru

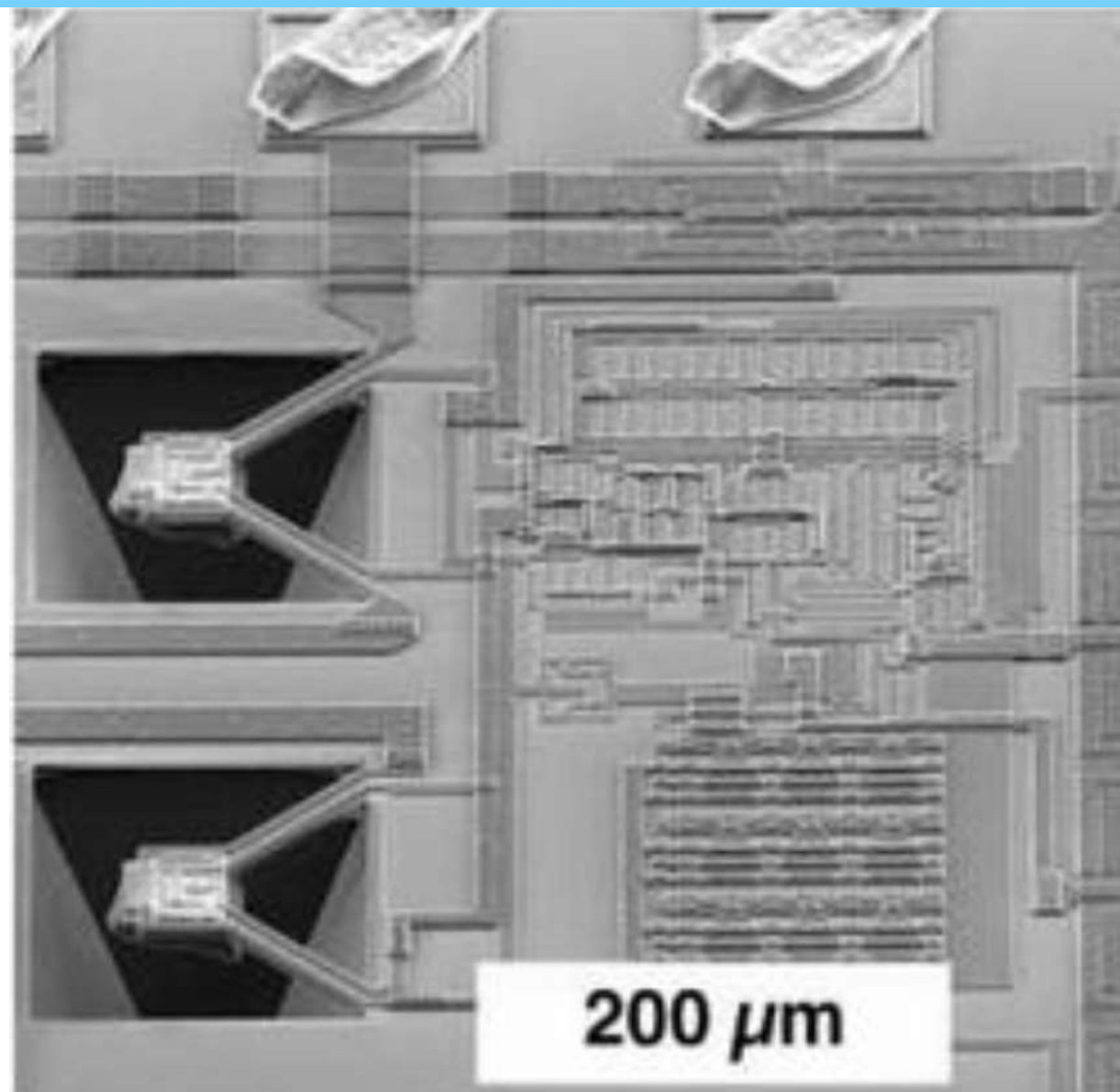


## Součásti:

- vetknutý nosník
- seismická hmota
- snímací prvky v místě deformace (vetknutí) nosníku (obvykle odporové tenzometry)

# Akcelerometr: Piezodoporový (MEMS)

Integrovaný piezodoporový  
akcelerometr s ohybovým  
nosníkem





# Akcelerometr: Piezoelektrický

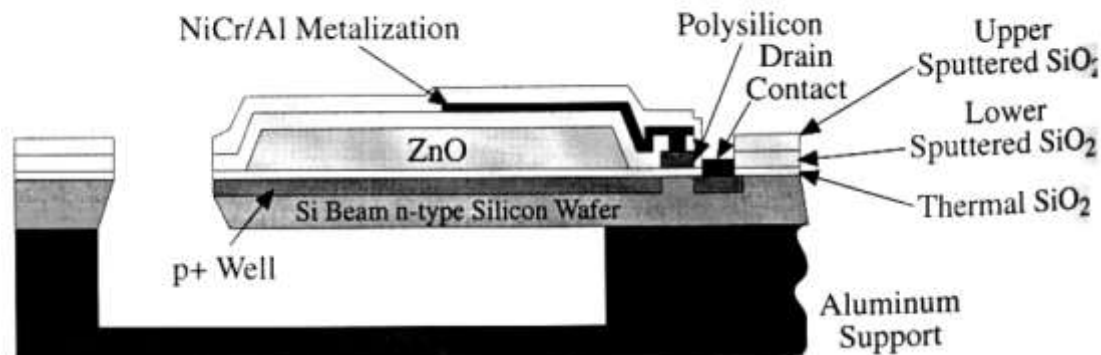
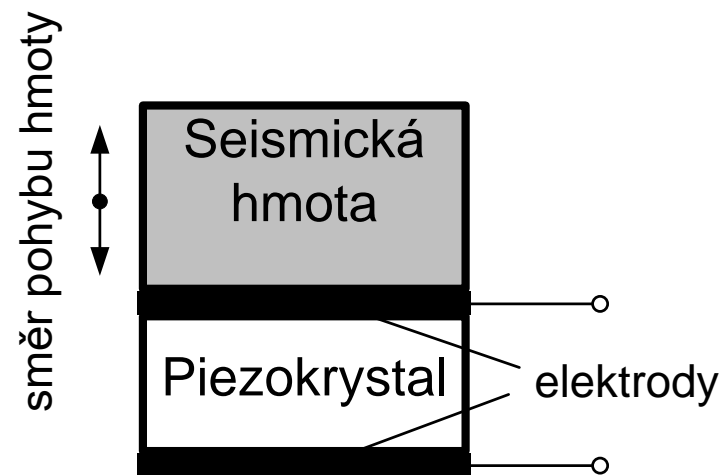
Zkouška

## Princip

- ❑ Měří se poloha seismické hmotnosti vůči pouzdru senzoru – piezoelektrické napětí
- ❑ Využití kompresní nebo především smykové deformace

## ☹ Nevýhoda

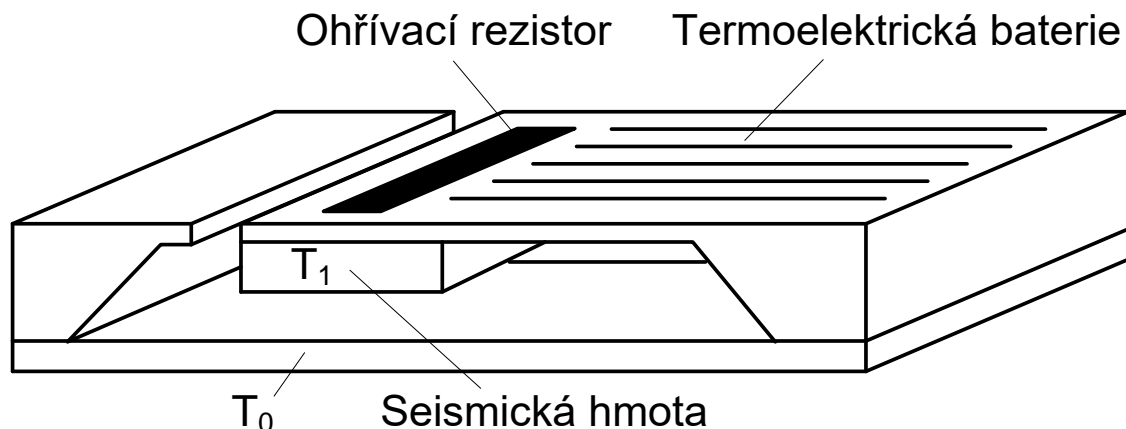
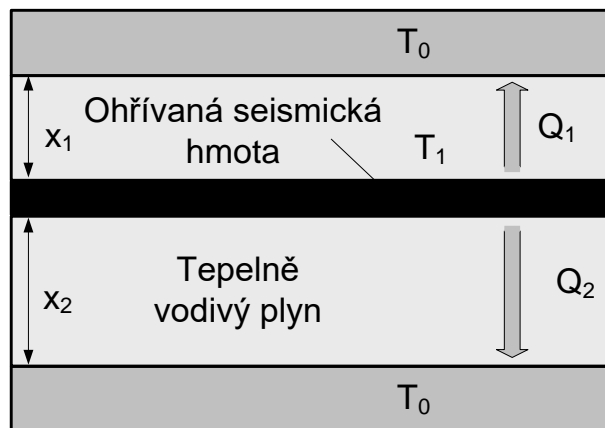
Piezoelektrický akcelerometr **nelze použít** pro měření **statického** zrychlení - vzniklý náboj se vybíjí přes vnitřní odpor a svody



? Akcelerometr s principem piezoelektrickým: Nakreslete zjednodušeně základní strukturu a popište princip činnosti akcelerometru



# Akcelrometr: Tepelný



## Princip:

Seismická hmota umístěna na tenkém nosníku a umístěna v blízkosti tepelné komory nebo mezi dvěma komorami. Hmota i nosník jsou vyrobeny mikroobráběním. Prostor mezi těmito komponenty je vyplněn teplotně vodivým plynem. Hmota je ohřívána na povrchu nebo zabudovaným ohříváčem na teplotu  $T_1$ . Pokud nepůsobí akcelerační zrychlení, potom je teplotní rovnováha mezi hmotou a ohříváči komorami. **Množství tepla  $Q_1$  a  $Q_2$  vedené od hmoty do komor přes plyn je funkcí vzdáleností  $x_1$  a  $x_2$ .** Měření teploty na nosníku teplotním senzorem.

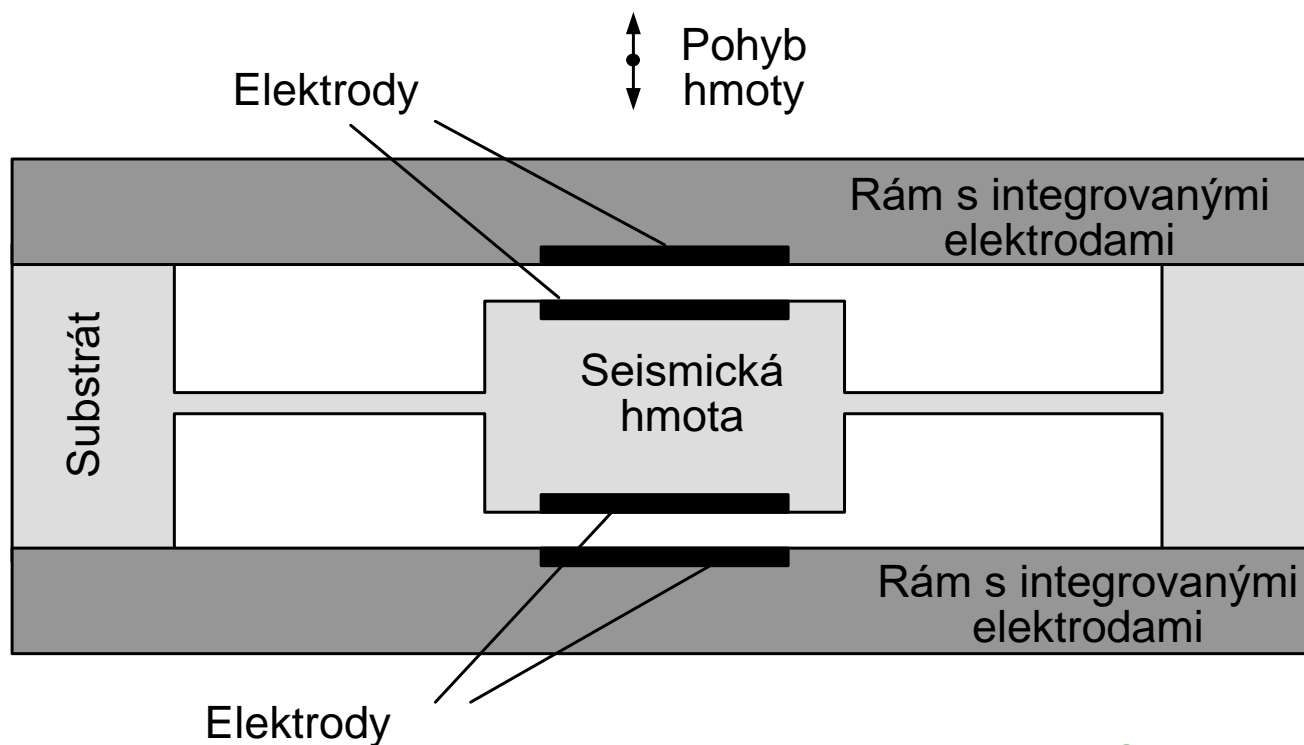
☹ **Nevýhoda:** Citlivost akcelrometru je  $(1\% \text{ změny výstupního signálu})/g$ , je mnohem menší než u kapacitních nebo piezoelektrických.

😊 **Výhoda:** menší náchylnost k elektromagnetickému nebo elektrostatickému rušení.



## Princip činnosti (Diferenciální uspořádání):

- Pevné elektrody tvoří vůči seismické hmotě 2 kapacity
- Při pohybu dochází ke změně vzdálenosti desek - změna kapacit (1 roste, 2. klesá)
- Základ složitějších používaných uspořádání např. hřebenové



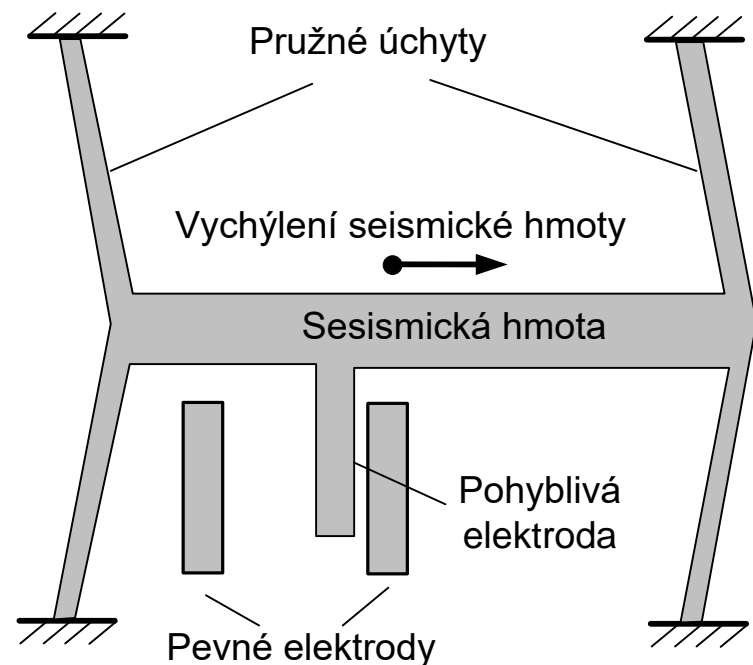
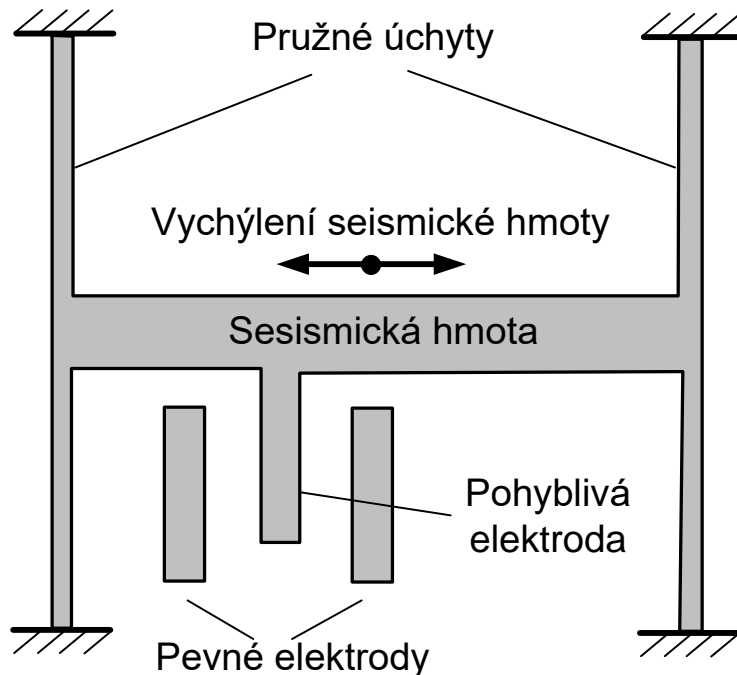
? Akcelerometr s principem kapacitním:  
Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

# Akcelerometr: Kapacitní s hřebenovým uspořádáním

Zkouška

## Hřebenové uspořádání kapacitního akcelerometru

- Paralelně pospojované diferenční kapacitory – **desítky až stovky**
- Část diferenčních kapacitorů může sloužit jako testovací-budící (elektrostatický princip) – používáno např. v ADXL akcelerometrech fy Analog Devices, viz dále
- Seismická hmota s pohyblivými elektrodami je upevněna na pružných závěsech, při akceleraci dojde k pohybu oproti rovnovážnému stavu

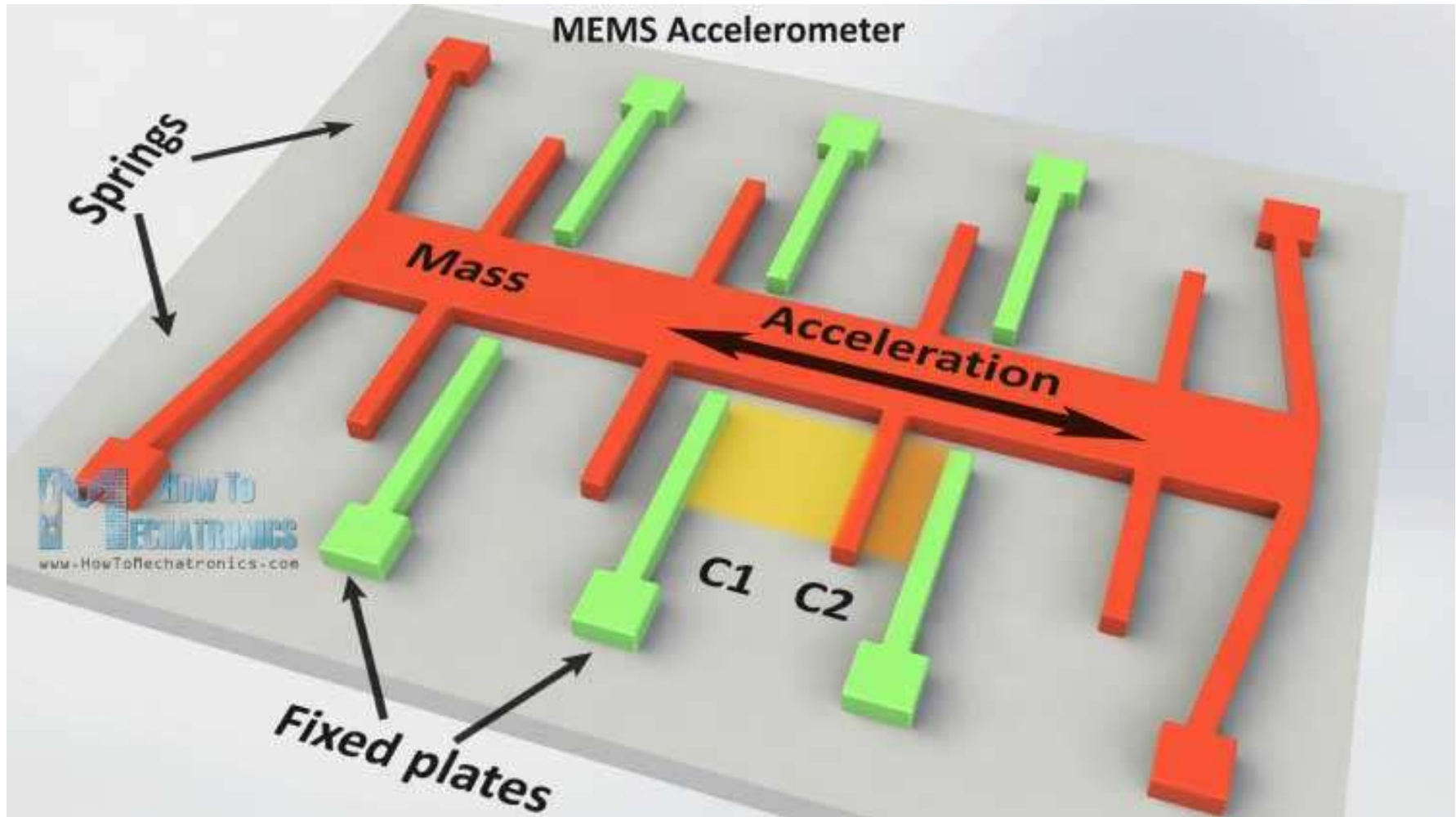


? Akcelerometr s principem kapacitním s hřebenovým uspořádáním: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti



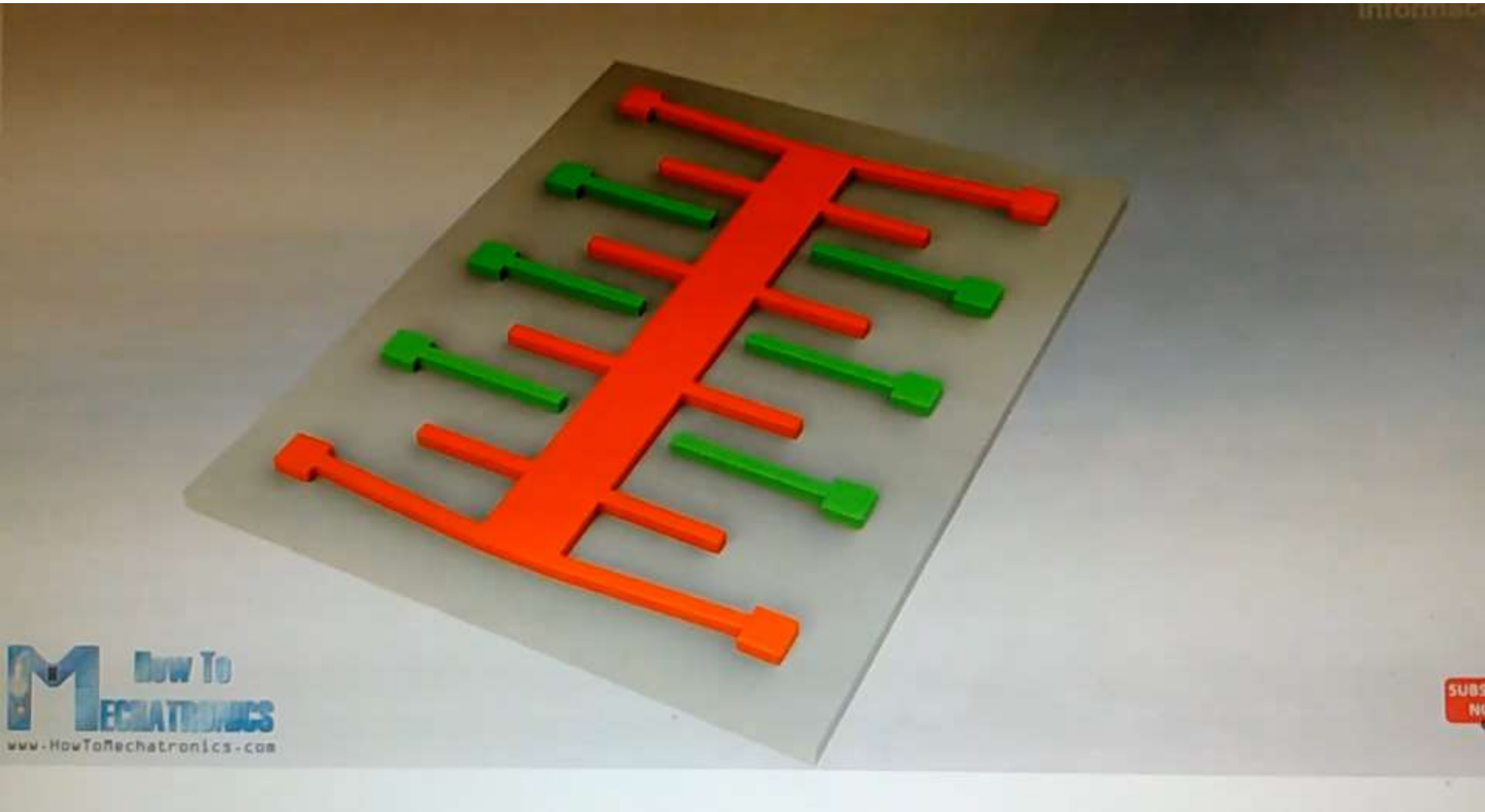
# Akcelerometr: Kapacitní s hřebenovým uspořádáním

## Hřebenové uspořádání kapacitního akcelerometru



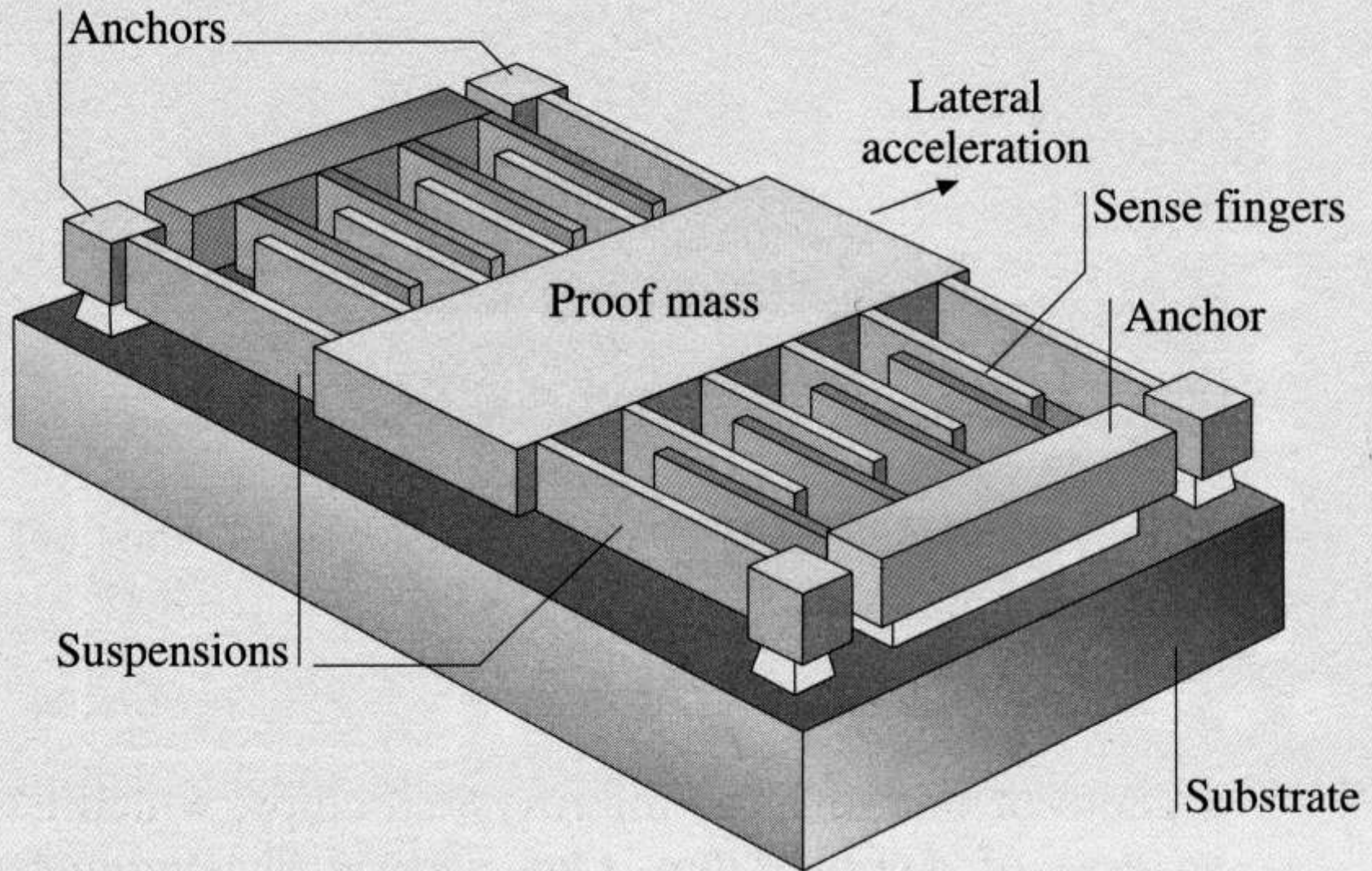


# Akcelerometr: Kapacitní s hřebenovým uspořádáním



# Akcelerometr: Kapacitní s hřebenovým uspořádáním

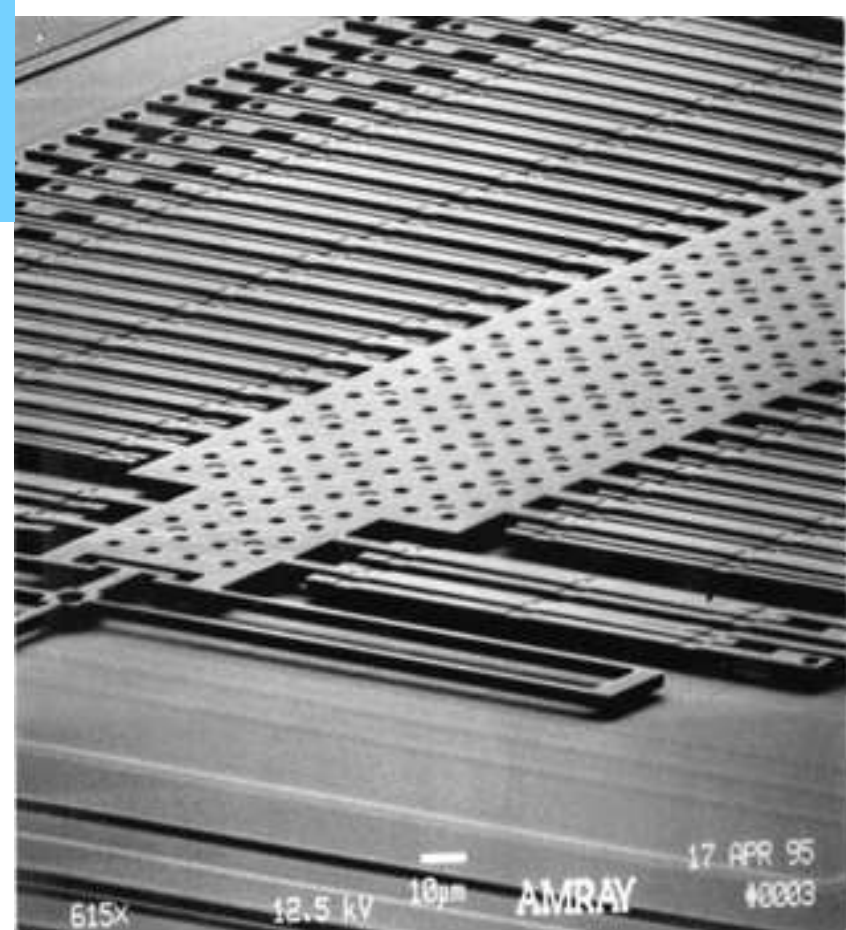
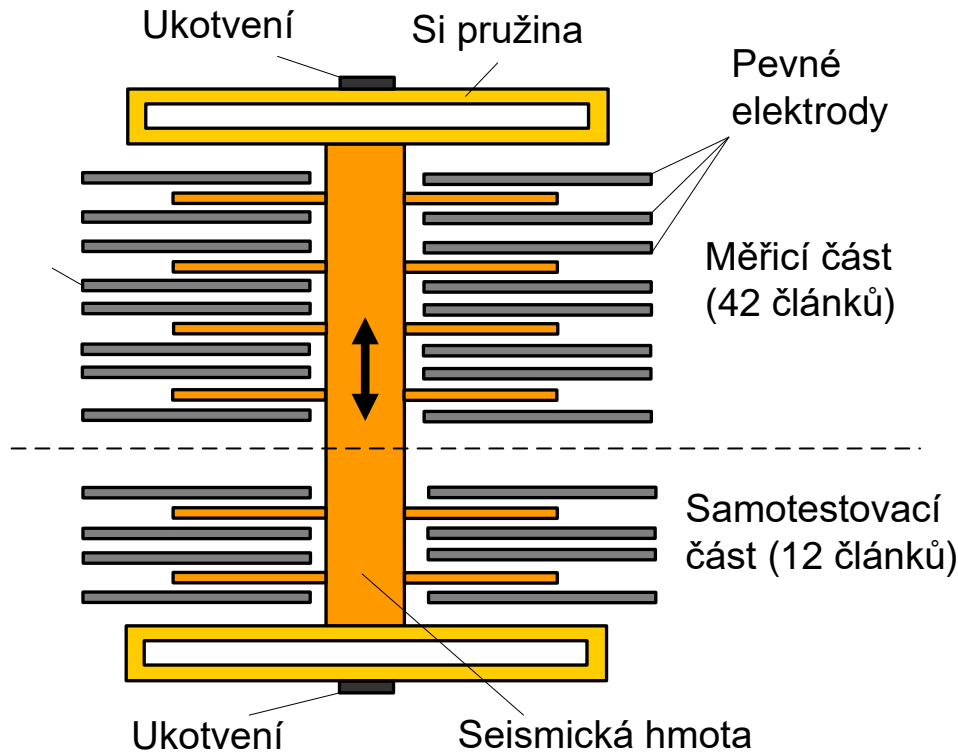
b) Lateral accelerometer schematic



# See World of Microsystems



# Akcelerometr: Kapacitní s hřebenovým uspořádáním



*Detail senzorové části MEMS akcelerometru*

- na okrajích senzoru 12 samotestovacích buněk (dif. kapacitorů)
- uprostřed 42 detekčních buněk
- vyrobeno technologií mikroobrábění Si
- seismická hmota je upevněna složenými pružinami (kotva)

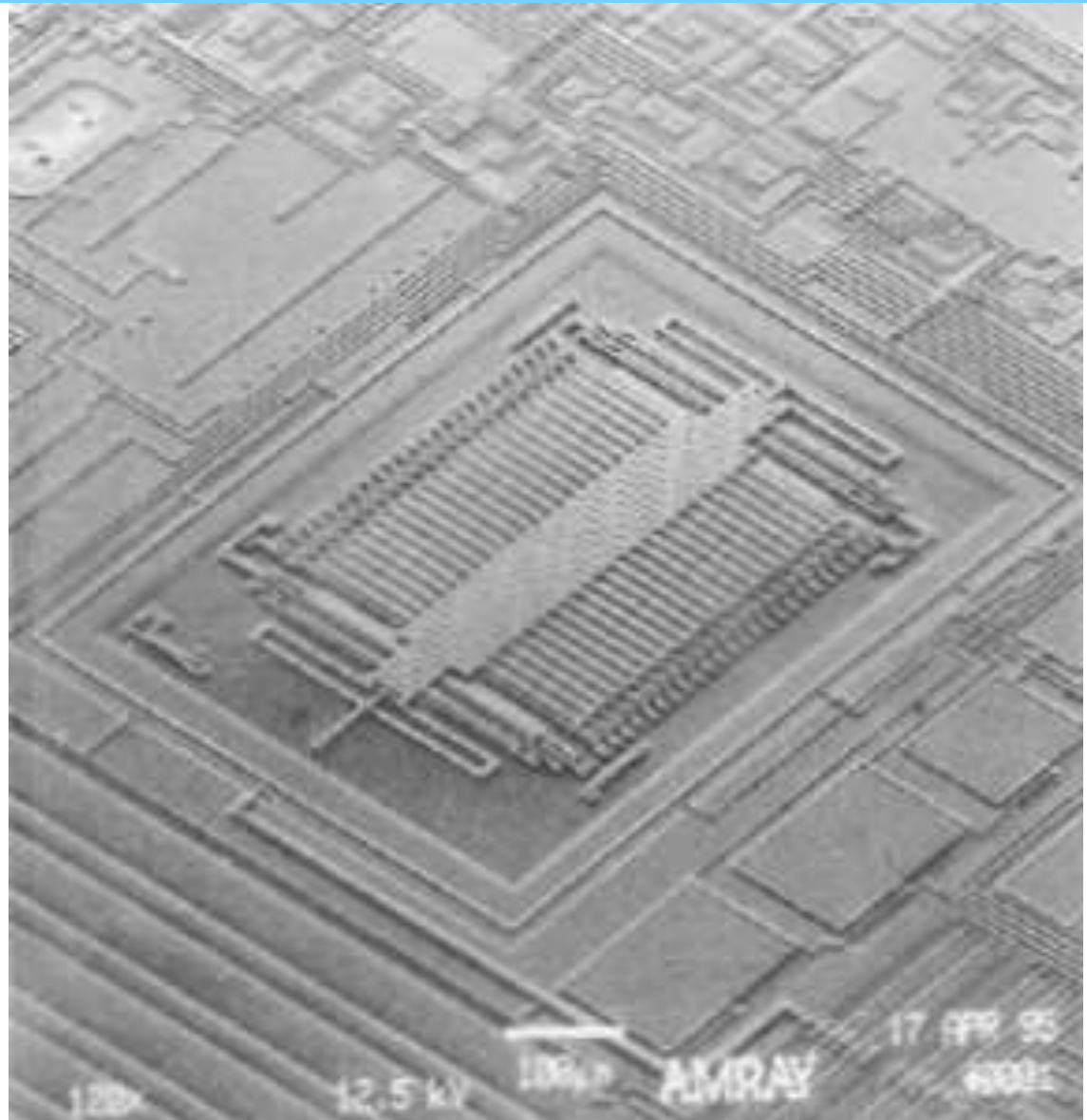


# Akcelerometr: Kapacitní s hřebenovým uspořádáním

## Hřebenové uspořádání kapacitního akcelerometru

- na okrajích senzoru 12 samotestovacích buněk (dif. kapacitorů)
- uprostřed 42 detekčních buněk
- vyrobeno technologií mikroobrábění Si
- seismická hmota je upevněna složenými pružinami (kotva), společné elektrody diferenčního kapacitoru vybíhají z této hmoty

MEMS akcelerometr s  
elektronickými obvody



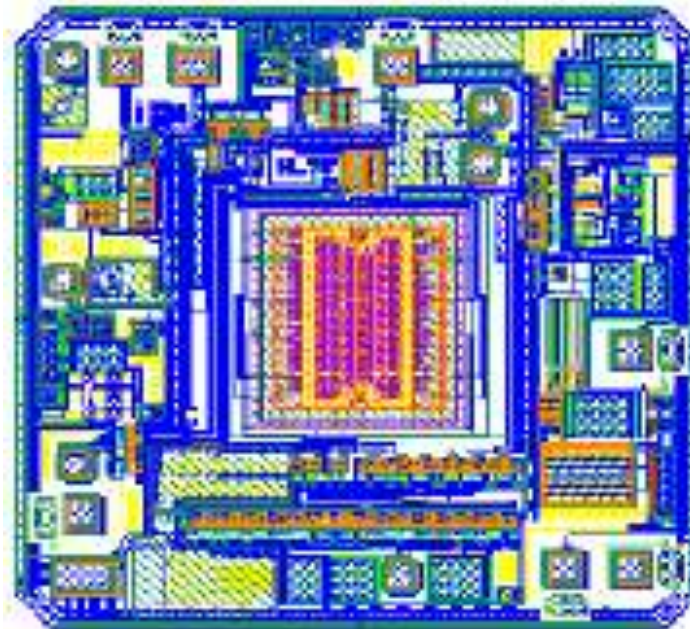
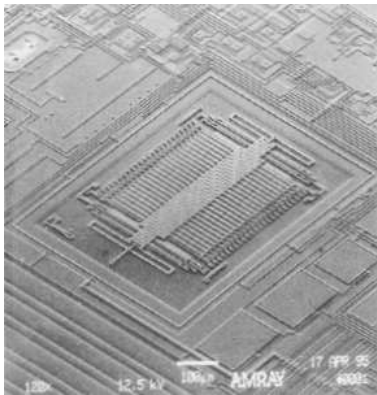


# Akcelerometr: Kapacitní 1D a 2D

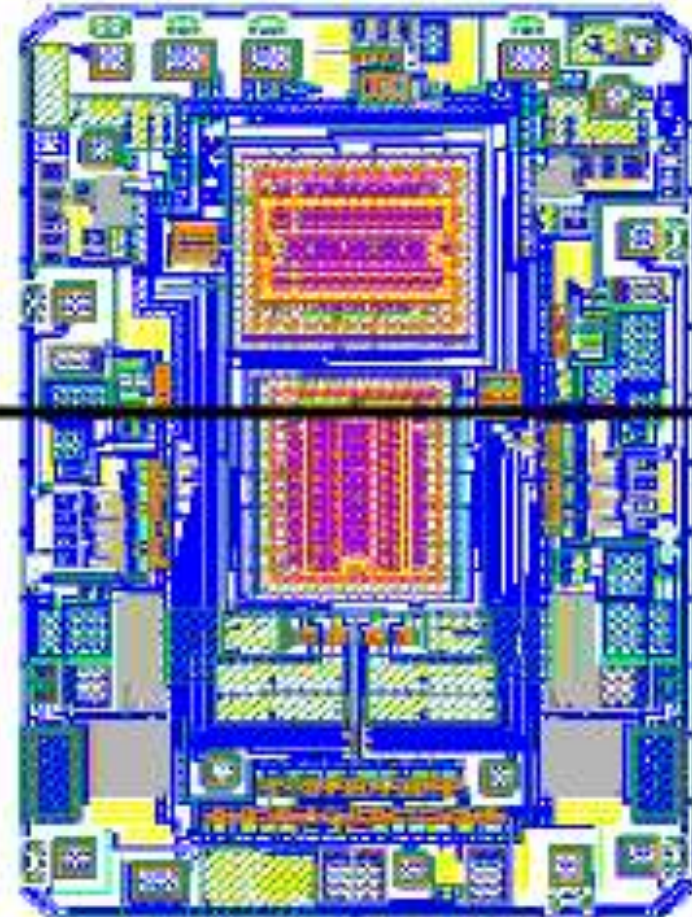
## Analog Devices ADXL:

- výroba MEMS technologií, integrují v sobě elektromechanický akcelerometr + vyhodnocovací elektroniku → analogový signál úměrný zrychlení

Čip ADXL 150; strana 1,94mm  
oblast senzoru 753x657 $\mu$ m



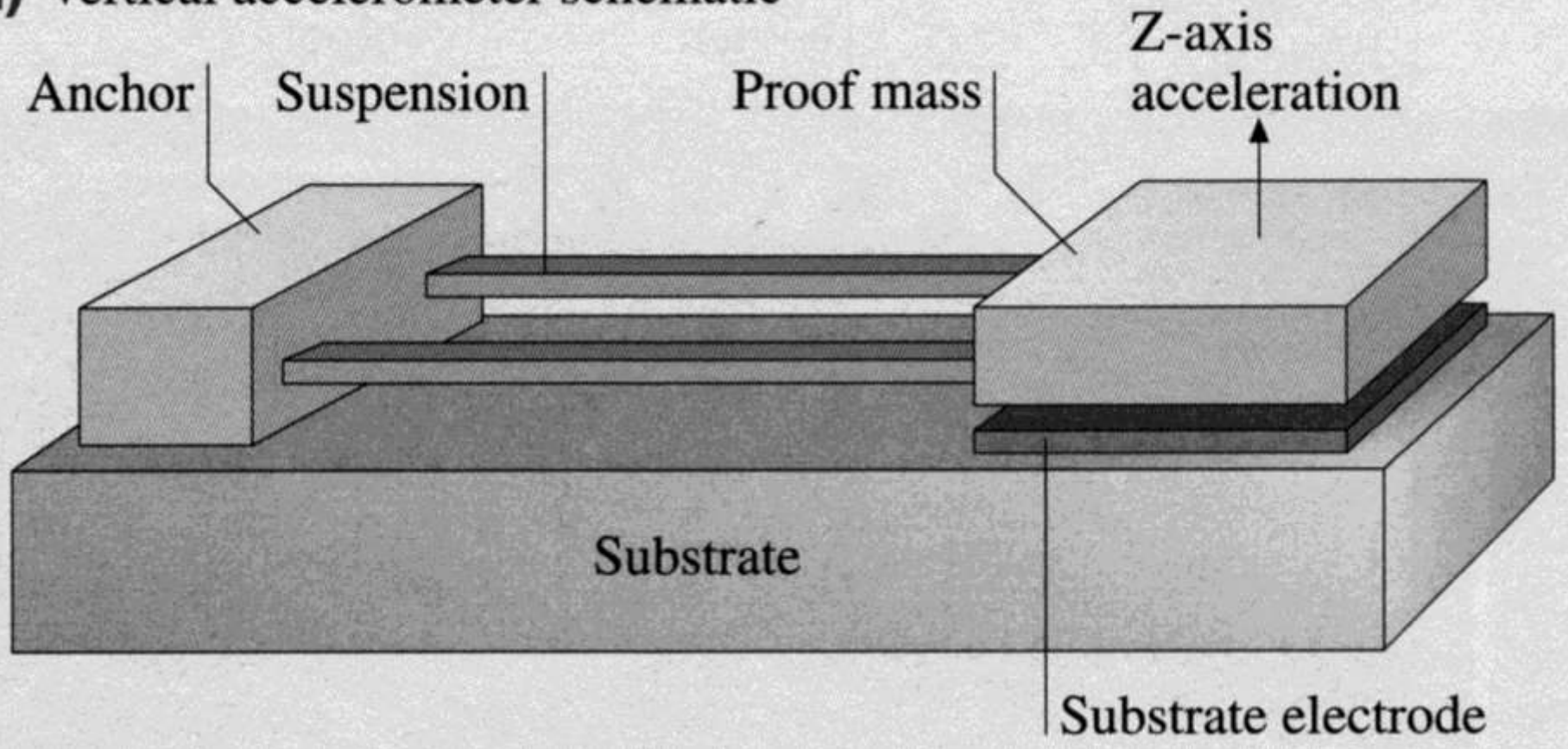
**XL150**



**XL250**

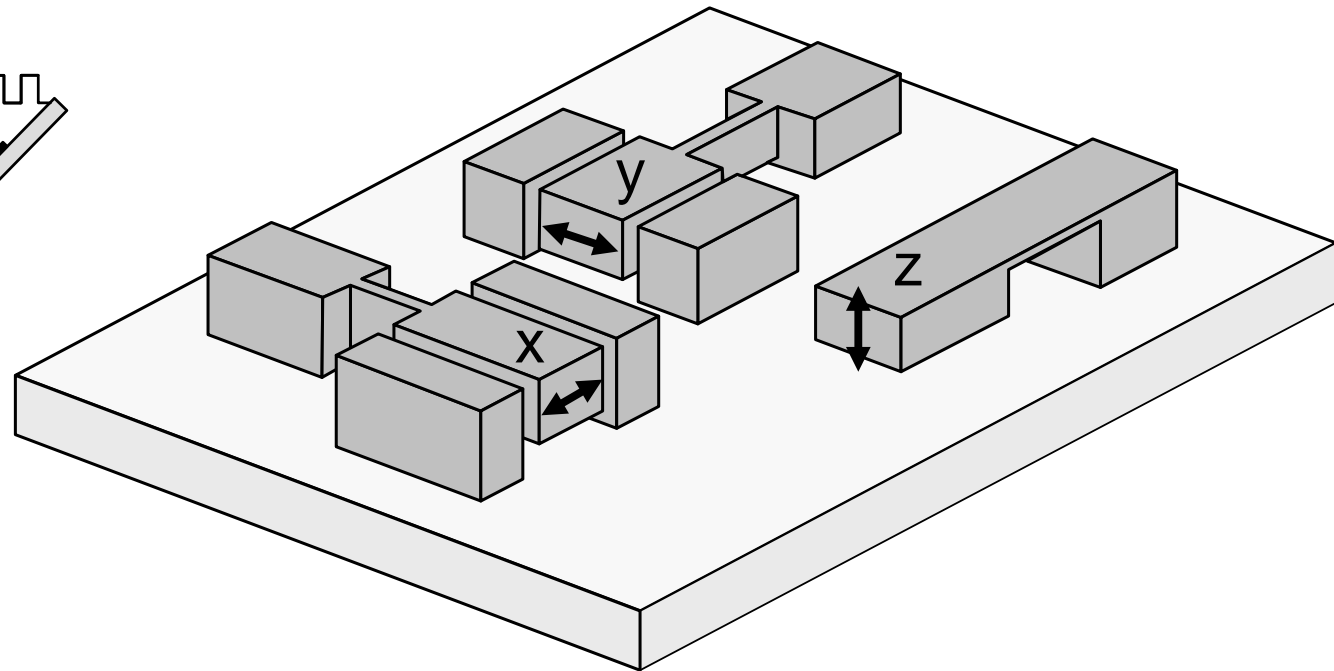
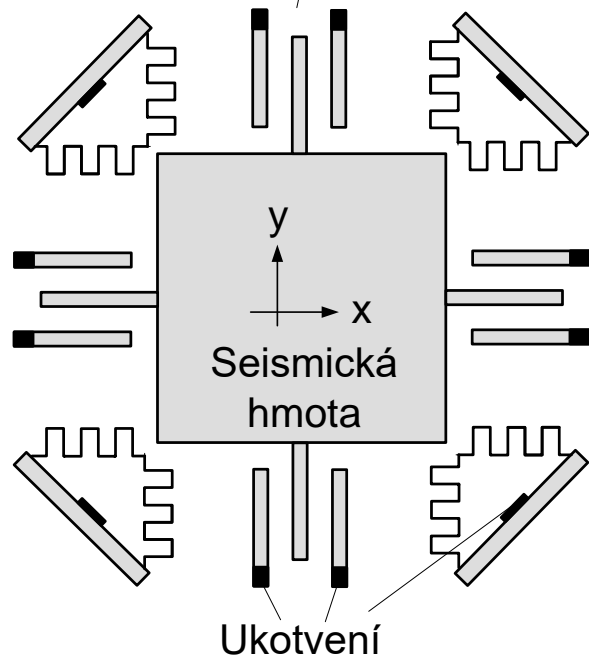
# Akcelerometr: Kapacitní 3D (osa z)

a) Vertical accelerometer schematic



# Akcelerometr: Kapacitní 2D a 3D

Diferenciální kapacitní senzor





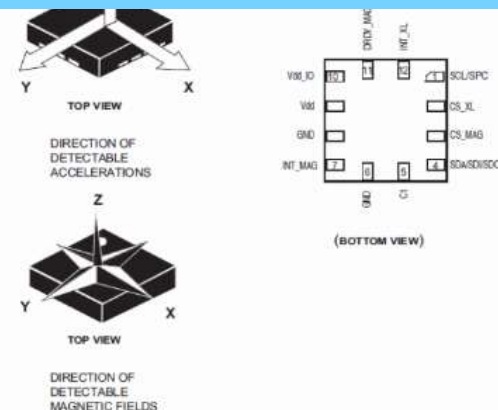
# Akcelerometr: Kapacitní - aplikace

## 3-osý akcelerometr a 3- osý magnetometr LSM303C od STMicroelectronics

Miniaturní čip, určený např. do smartphonů nebo „chytrých“ hodinek pro měření akcelerace a magnetického pole s 16bitovým číslicovým výstupem ve spojitosti s pokročilými možnostmi navigace nebo též funkcemi, citlivými na pohyb.

### Vlastnosti:

- 3-osý magnetometr + 3-osý akcelerometr .
- pouzdro 2 mm x 2 mm
- akcelerometr - volitelně  $\pm 2$ ,  $\pm 4$  či  $\pm 8$  g.
- Magnetometr -  $\pm 16$  Gauss nebo  $\pm 1\,600\ \mu\text{T}$
- 16bitový datový výstup s údaji ze 3 měřicích kanálů
- Nízká hladina šumu včetně minimální vlastní spotřeby
- pokročilé řízení napájení, teplotní kompenzace, dostatečně široký rozsah napájecího napětí
- analogové části, programovatelné generátory přerušení pro pohyb, volný pád a detekci magnetického pole

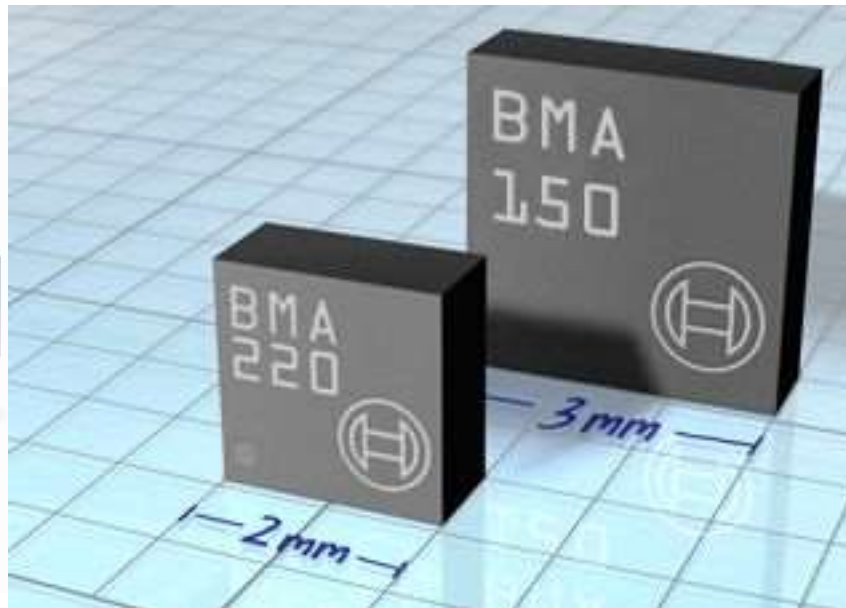


MEMS eCompass



# Akcelerometr: Kapacitní - aplikace

- Digitální MEMS akcelerometr (3-osý akcelerometr) pro každý mobilní telefon.
- Pro Samsung a Sony Ericsson je vyrábí firma Bosch Sensortec.
- Akcelerometry od Bosch Sensortec: miniaturními rozměry a velmi nízká spotřeba
- Pouzdro **2 x 2 mm**.





# Akcelerometr: Kapacitní - aplikace



# Otázky

1. Akcelerometr: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti, co je to seismická hmota, napište základní rovnici popisující pohyb hmoty u jednoosého akcelerometru
2. Akcelerometr s principem piezoelektrickým: Nakreslete zjednodušeně základní strukturu a popište princip činnosti akcelerometru
3. Akcelerometr s principem piezodoporovým: Nakreslete zjednodušeně základní strukturu a popište princip činnosti akcelerometru
4. Akcelerometr s principem kapacitním: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti
5. Akcelerometr s principem kapacitním s hřebenovým uspořádáním: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

