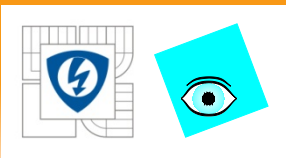


METROLOGIE VYBRANÝCH KINEMATICKÝCH VELIČIN

Milan Prášil

Český metrologický institut
Laboratoře primární metrologie
E-mail: mprasil@cmi.cz

Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

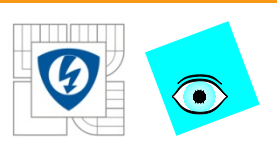


ÚVOD

18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Úvod

Kinematika - část mechaniky: klasifikace a popis pohybu

Dynamika - zkoumá pohyb z hlediska působení sil

Mechanický pohyb - dochází ke změně polohy tělesa

Metrologie kinematických veličin

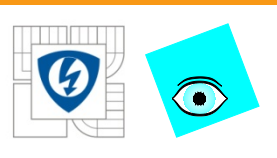
měření = stanovení hodnoty veličin mechanického pohybu

Vybrané kinematické veličiny

mechanické vibrace a rázy

přímočará a otáčivá rychlost

dynamická síla



Úvod

Kalibrace

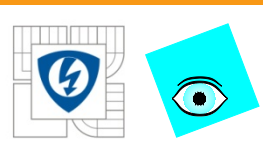
stanovení vztahu mezi údajem měřidla a etalonem

Etalon

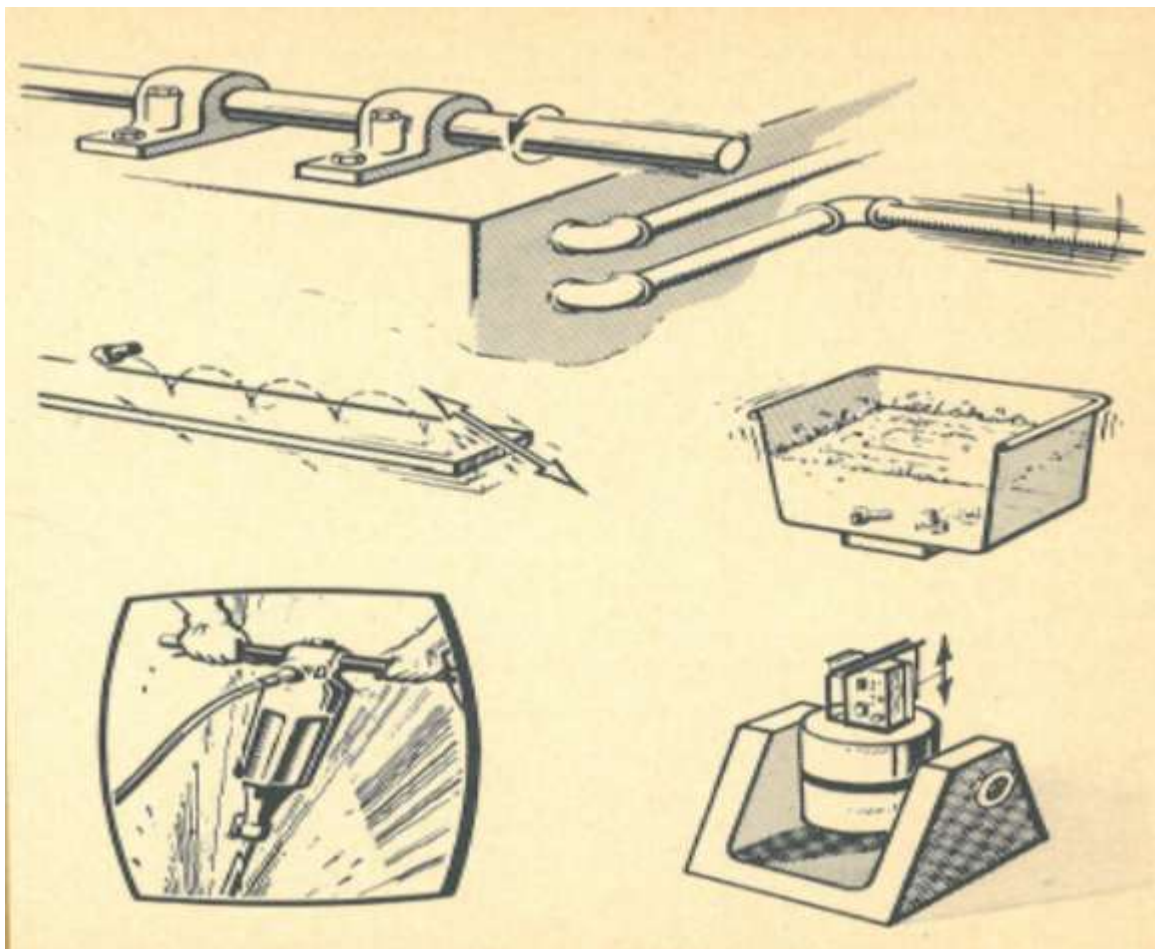
realizace jednotky

Etalonáž

činnost spojená s etalony



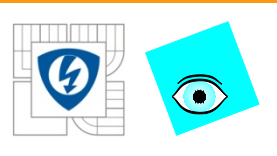
Zdroje vibrací



18.12.2012

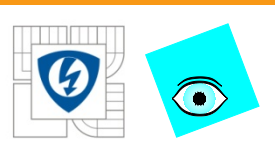
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Význam měření vibrací

- omezování a snižování vibrací
- bezdemontážní diagnostika strojů
- zkoušky odolnosti na působení vibrací
- ochrana zdraví



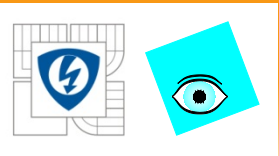
Zkoušky odolnosti na působení vibrací



18.12.2012

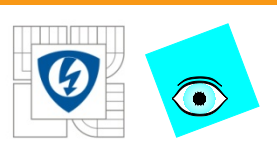
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





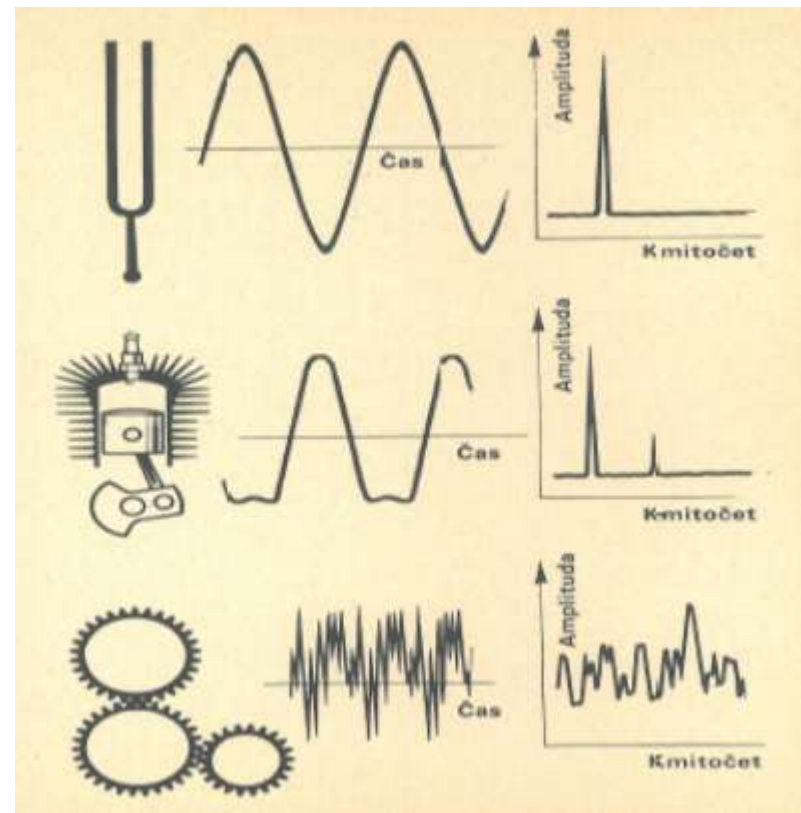
Definice vibrací

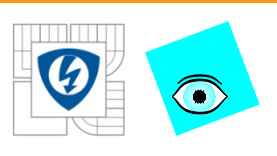
- Kmitavý pohyb hmotného bodu nebo pevných těles kolem určité, zpravidla rovnovážné polohy



Rozdělení vibrací

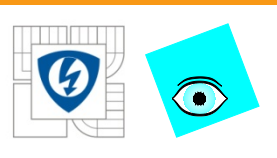
- **periodické**
 - jednoduché (harmonické)
 - složené (neharmonické)
- **nepravidelné** (náhodné, stochastické)





Základní metoda vyhodnocování:

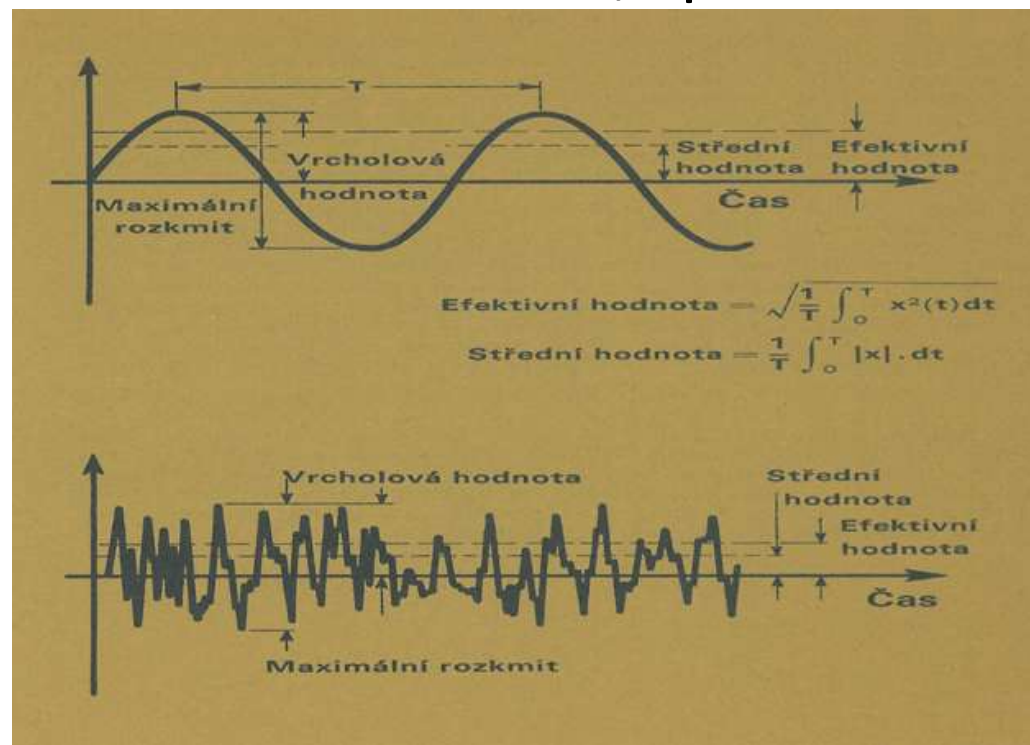
- rozklad na kmitočtové složky
- kmitočtová spektra
- spektogramy

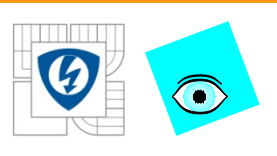


Kvantitativní hodnocení vibrací

- Maximální rozkmit (dvojitá amplituda, špička-špička)
- Amplituda (vrcholová, maximální hodnota, špičková hodnota)
- Střední hodnota
- Efektivní hodnota

$$x_{ef} = x_o / \sqrt{2}$$





Určující veličiny harmonických vibrací

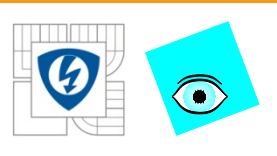
Kmitočet f

$$f = \frac{1}{T}$$

jednotka **hertz** [Hz], rozměr s-1

perioda T

jednotka **sekunda** [s]



Určující veličiny harmonických vibrací

Výchylka

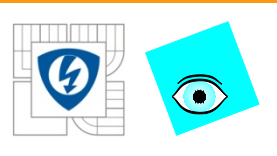
$$s(t) = s_o \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = s_o \sin(2\pi ft) = s_o \sin(\omega t)$$

kde $2\pi f$ je kruhový kmitočet,

s_o je amplituda výchylky

t je čas.

Jednotkou výchylky je metr [m].



Určující veličiny harmonických vibrací

Rychlost

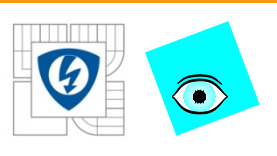
$$v(t) = \frac{ds}{dt} = \omega s_o \cos(\omega t) = v_o \cos(\omega t) = v_o \sin(\omega t + \pi/2)$$

kde $2\pi f$ je kruhový kmitočet,

v_o je amplituda rychlosti,

t je čas.

Jednotkou rychlosti je metr za sekundu [m.s⁻¹].



Určující veličiny harmonických vibrací

Zrychlení

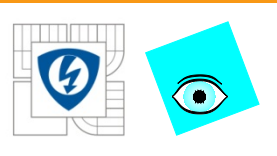
$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = -\omega^2 s_o \sin(\omega t) = -a_o \sin(\omega t) = a_o \sin(\omega t + \pi)$$

kde $2\pi f$ je kruhový kmitočet,

a_o je amplituda zrychlení,

t je čas.

Jednotkou zrychlení je metr za sekundu na druhou [m.s-2]. V technické praxi se používá i jednotka g (gravitační konstanta, tíhové nebo zemské zrychlení) $1g = 9,81 \text{ m.s-2}$



Určující veličiny harmonických vibrací

Vzájemné vztahy mezi amplitudami

výchylky

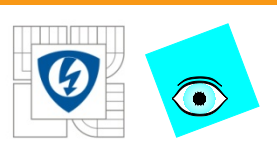
$$s_o = \frac{v_o}{\omega} = \frac{a_o}{\omega^2}$$

rychlosti

$$v_o = \omega s_o = \frac{a_o}{\omega}$$

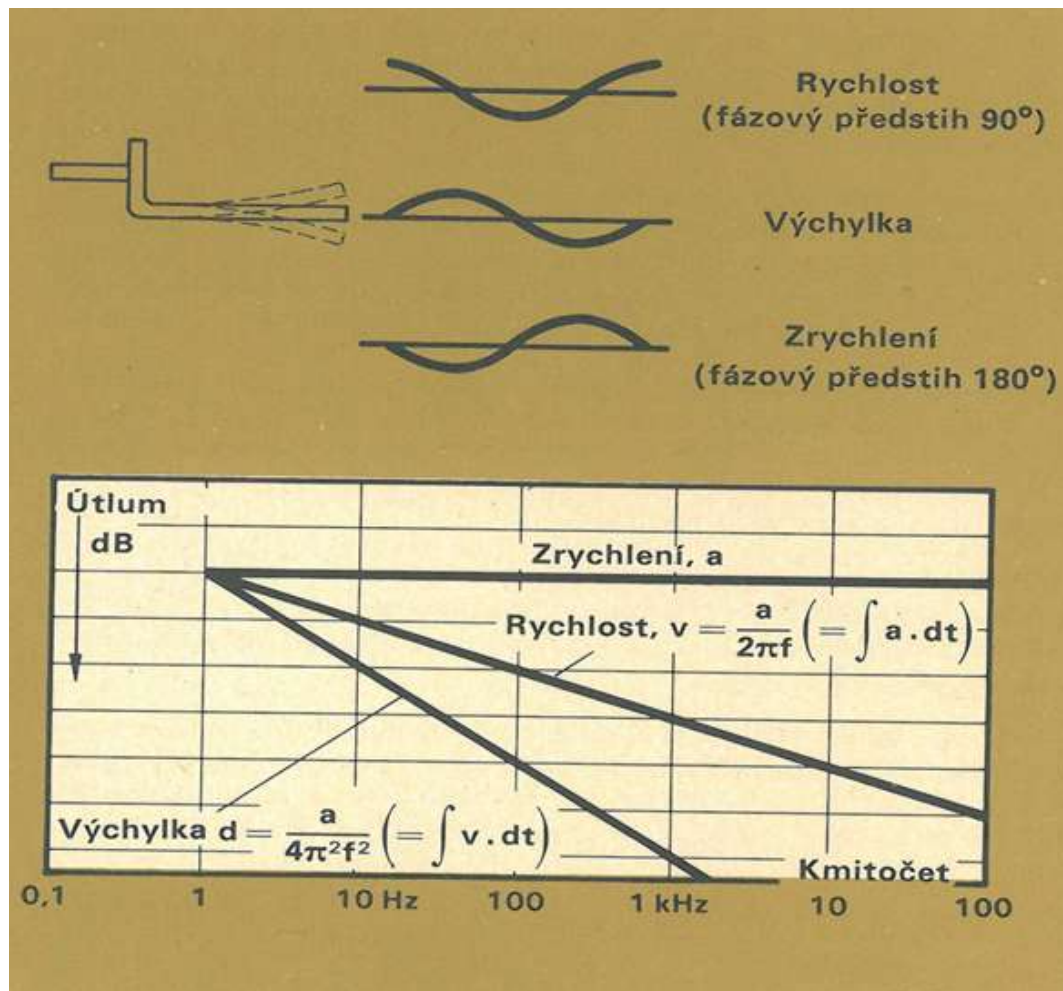
zrychlení

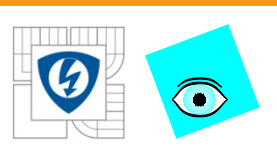
$$a_o = \omega^2 s_o = \omega v_o$$



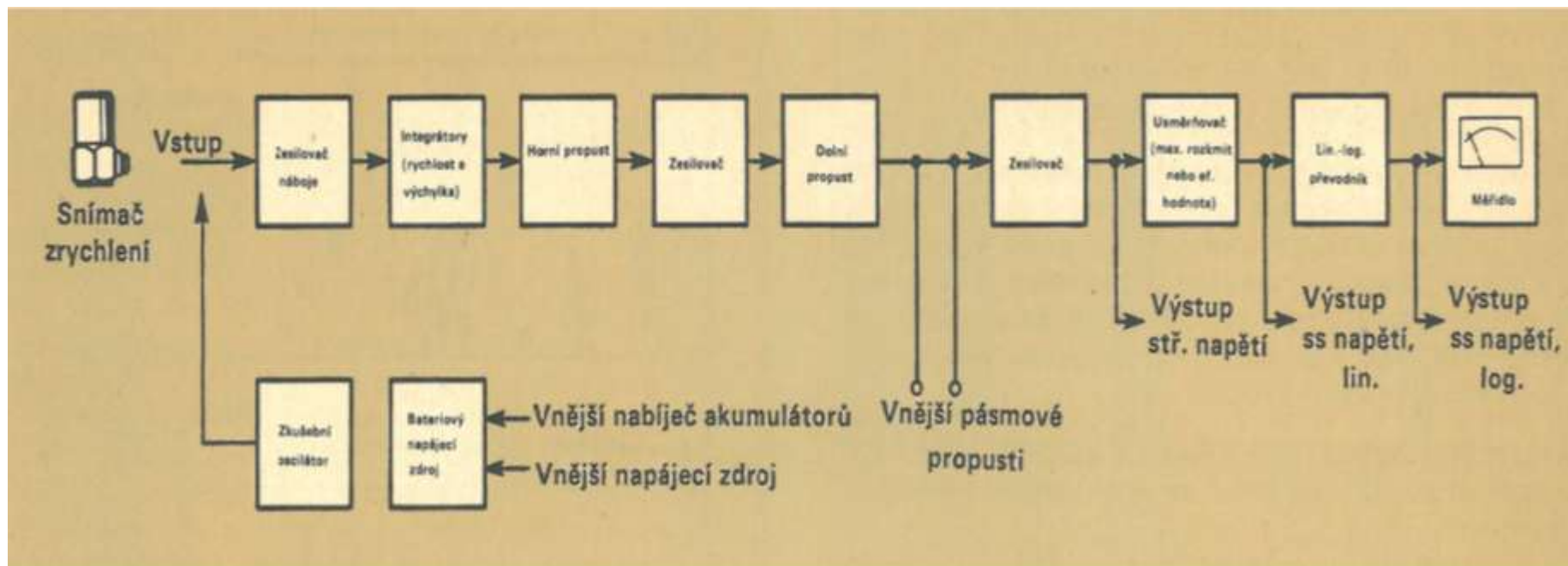
Určující veličiny harmonických vibrací

Vzájemné vztahy
mezi amplitudami



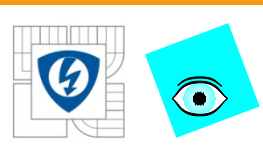


Vibrometry



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



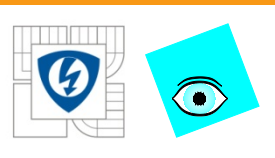
Vibrometry



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





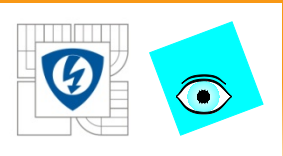
Snímače vibrací



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



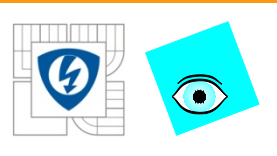


SNÍMAČE VIBRACÍ

18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





PIEZOELEKTRICKÝ JEV

Hustota elektrického náboje σ piezoelementu je přímo úměrná působícímu mechanickému tlaku a tedy i působící síle F dle vztahu

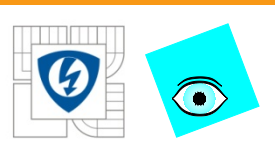
$$\sigma = k \cdot F / P$$

kde σ je hustota elektrického náboje [C/m²],

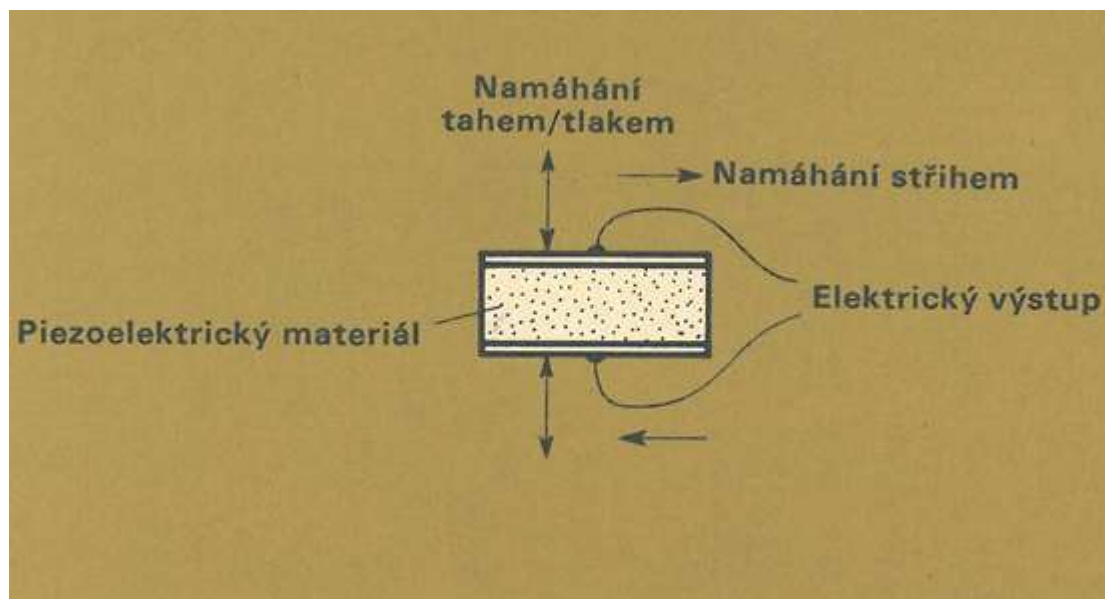
k je piezoelektrická konstanta destičky [C/N],

F je síla [N],

P je plocha piezoelementu [m²].



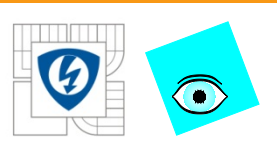
PIEZOELEKTRICKÝ JEV



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

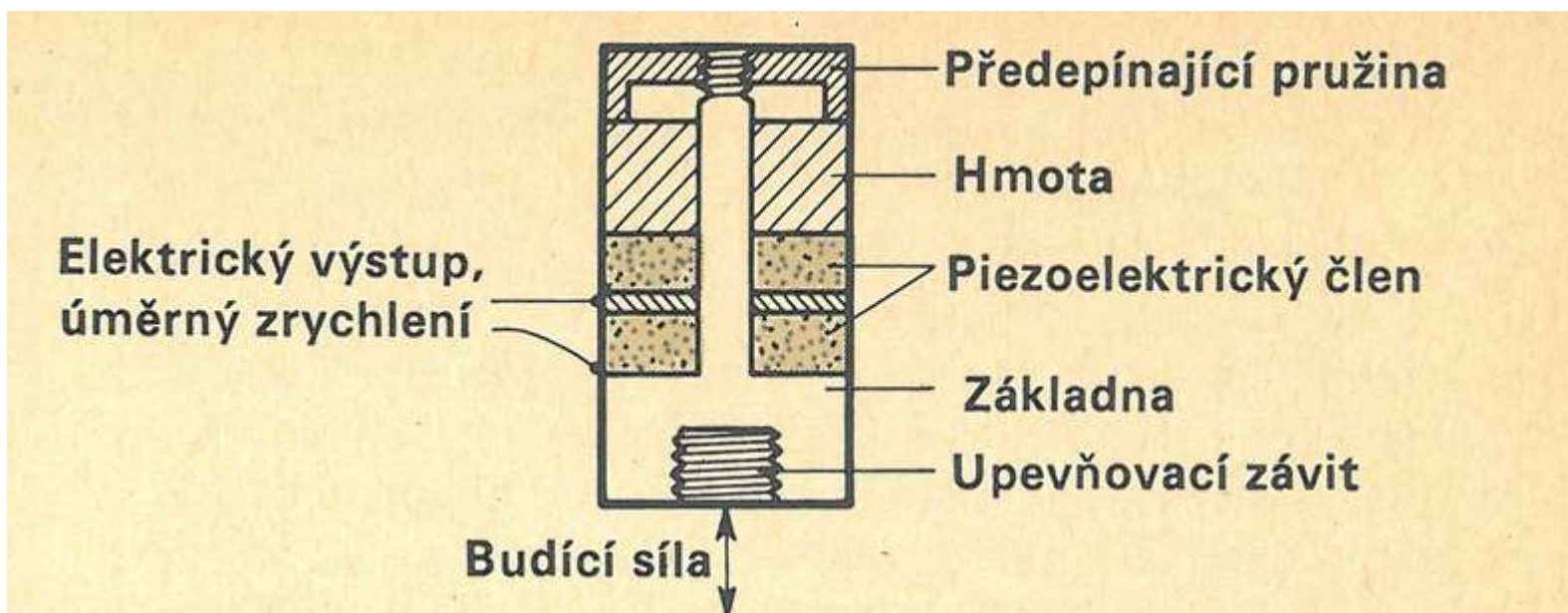


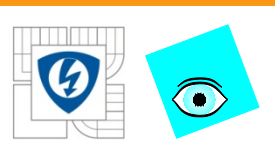


PIEZOELEKTRICKÝ JEV

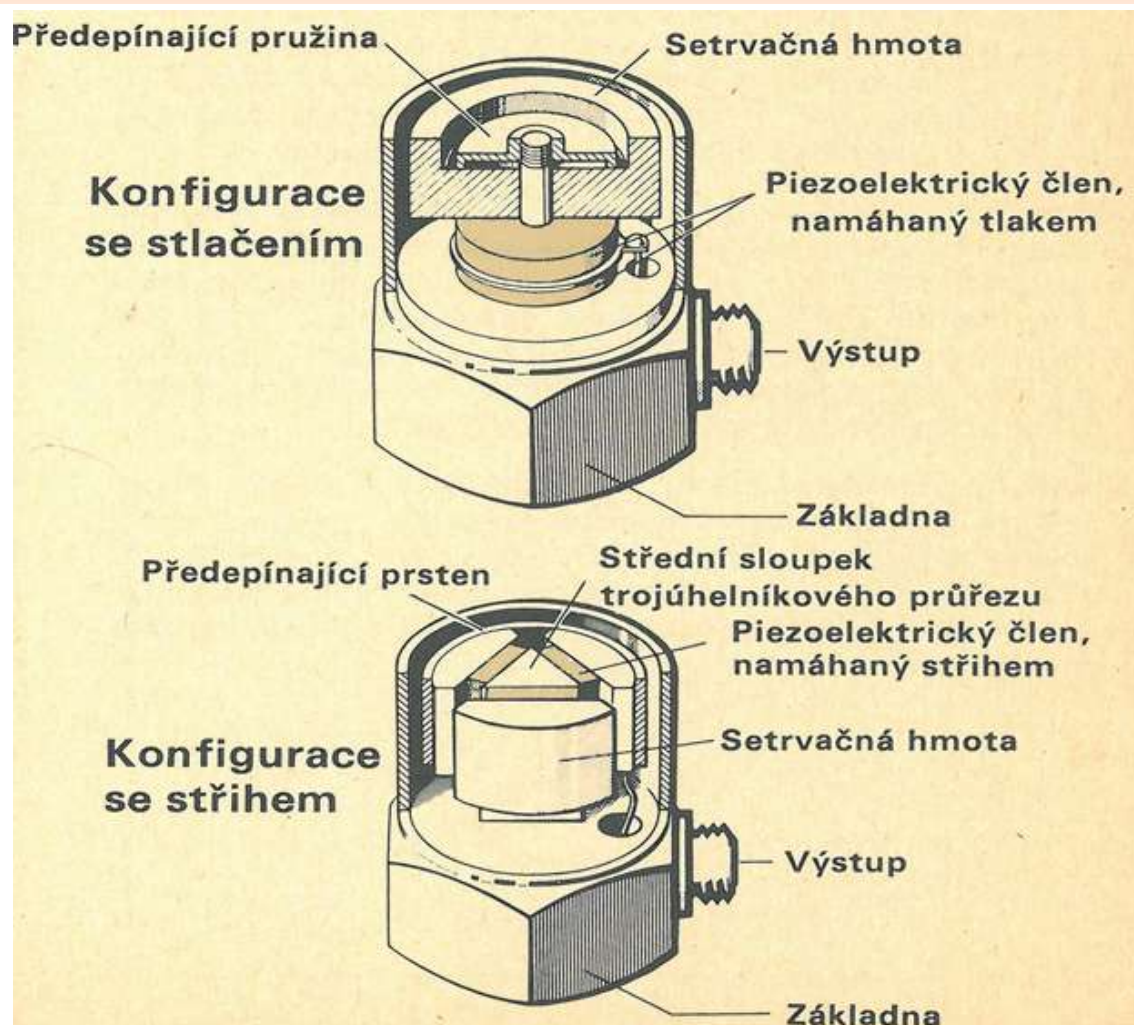
Piezoelektrický snímač zrychlení - akcelerometr

$$F(t) = m a(t)$$



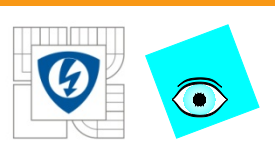


Konstrukce piezoelektrického snímače zrychlení - akcelerometru

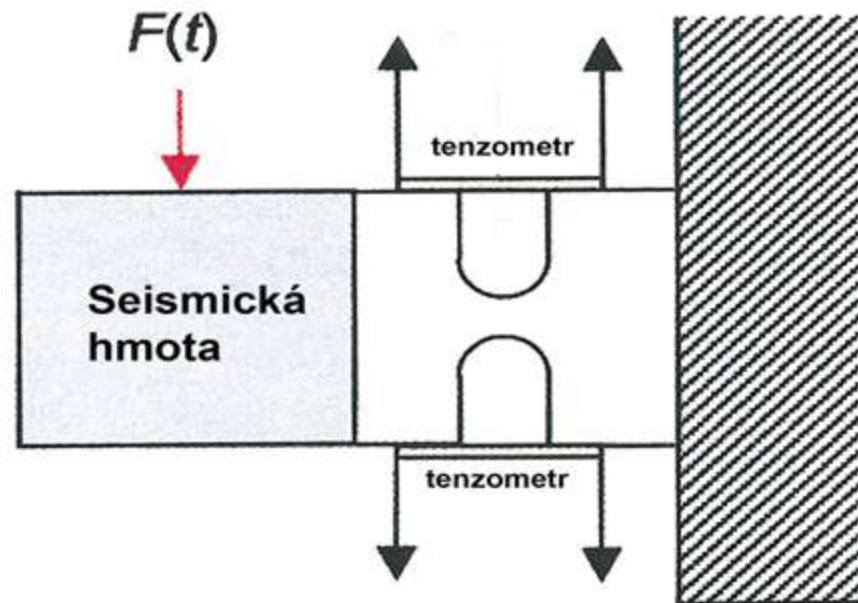


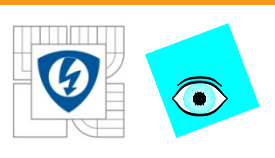
18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

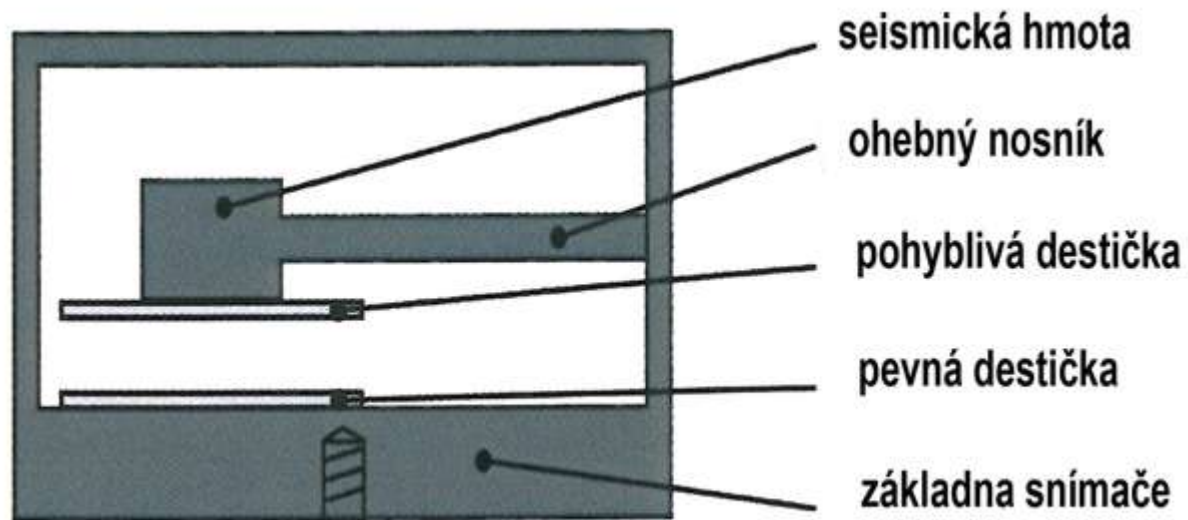


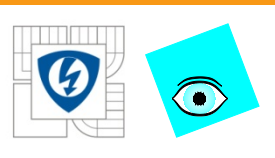
Konstrukce piezorezistivního snímače zrychlení - akcelerometru



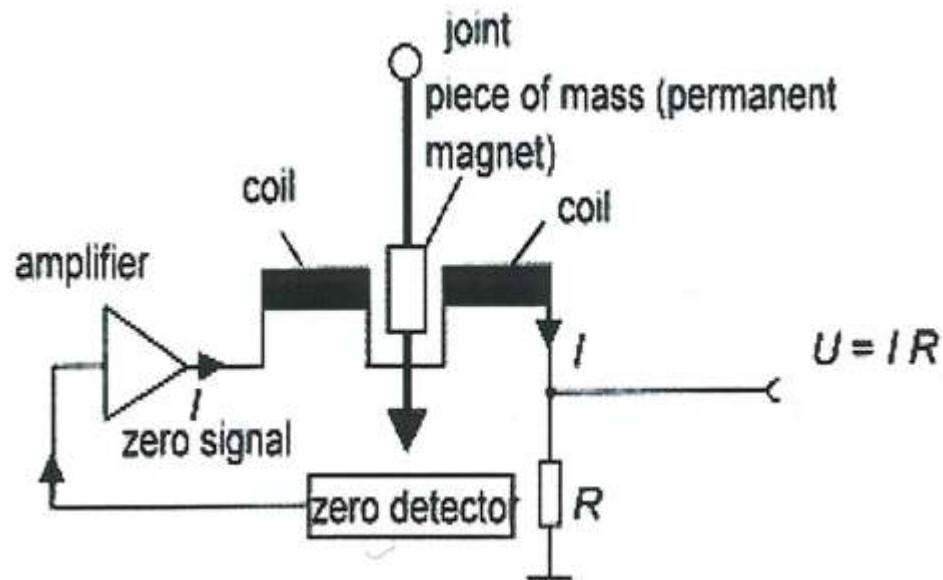


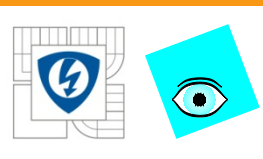
Konstrukce kapacitního snímače zrychlení - akcelerometru





Princip servo snímače zrychlení - akcelerometru





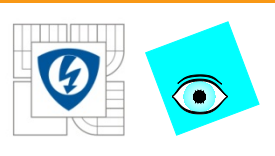
Kapacitní a servo akcelerometr



18.12.2012

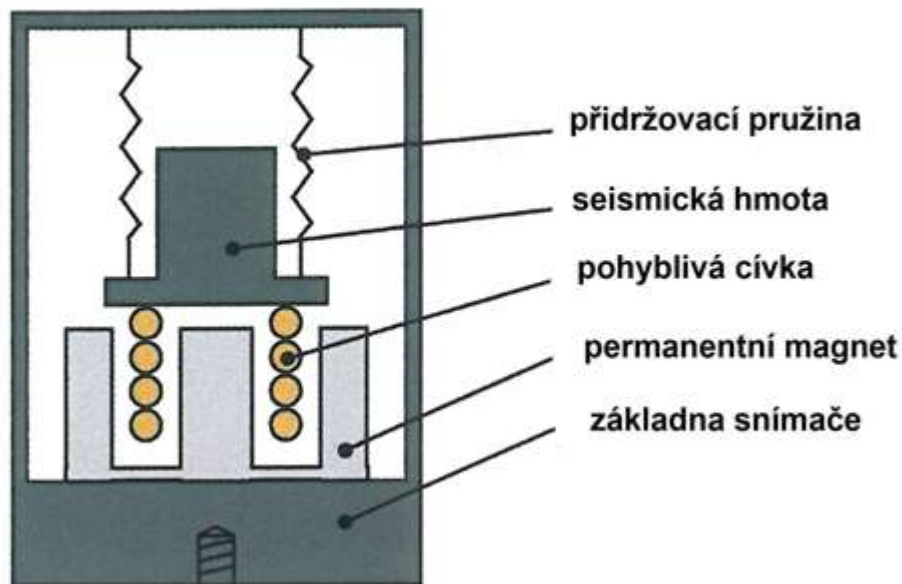
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

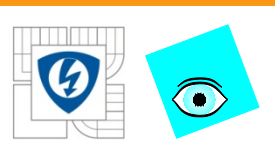




Konstrukce indukčního snímače rychlosti

Indukované elektromotorické napětí dle Faradayova zákona elektromagnetické indukce $\mathcal{E}_F(t) = -\frac{d\Phi}{dt}$ je úměrné rychlosti pohybu cívky v mezeře magnetu





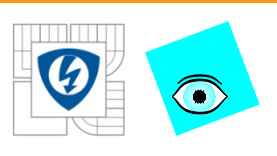
Třiosý snímač rychlosti (Geofon)



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Citlivost (přenos) snímačů vibrací S

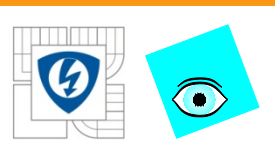
Citlivost (přenos) snímačů vibrací S

$$\vec{S} = \frac{\vec{U}}{\vec{Y}} = |\vec{S}| e^{j\varphi_s} = \frac{|\vec{U}| e^{j\varphi_U}}{|\vec{Y}| e^{j\varphi_Y}}$$

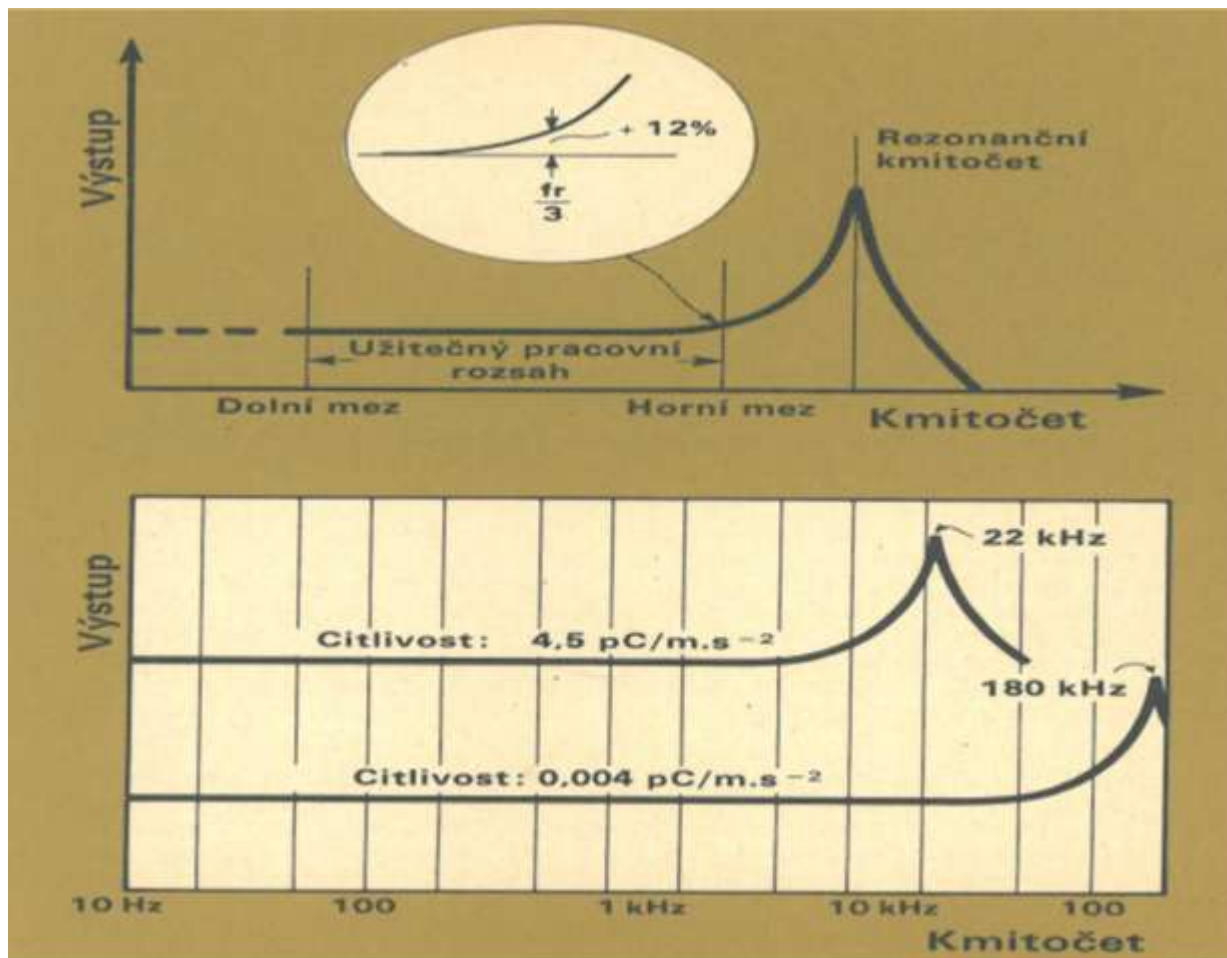
Fázové zpoždění $\varphi_s = \varphi_U - \varphi_Y$

Citlivost piezoelektrických akcelerometrů $S = \frac{C}{a}$ [pC/(m.s⁻²)]

Citlivost piezoelektrických akcelerometrů se zesilovačem $S = \frac{U}{a}$ [mV/(m.s⁻²)]

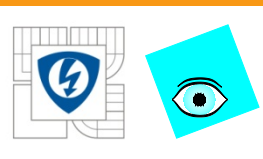


Kmitočtový rozsah snímačů vibrací

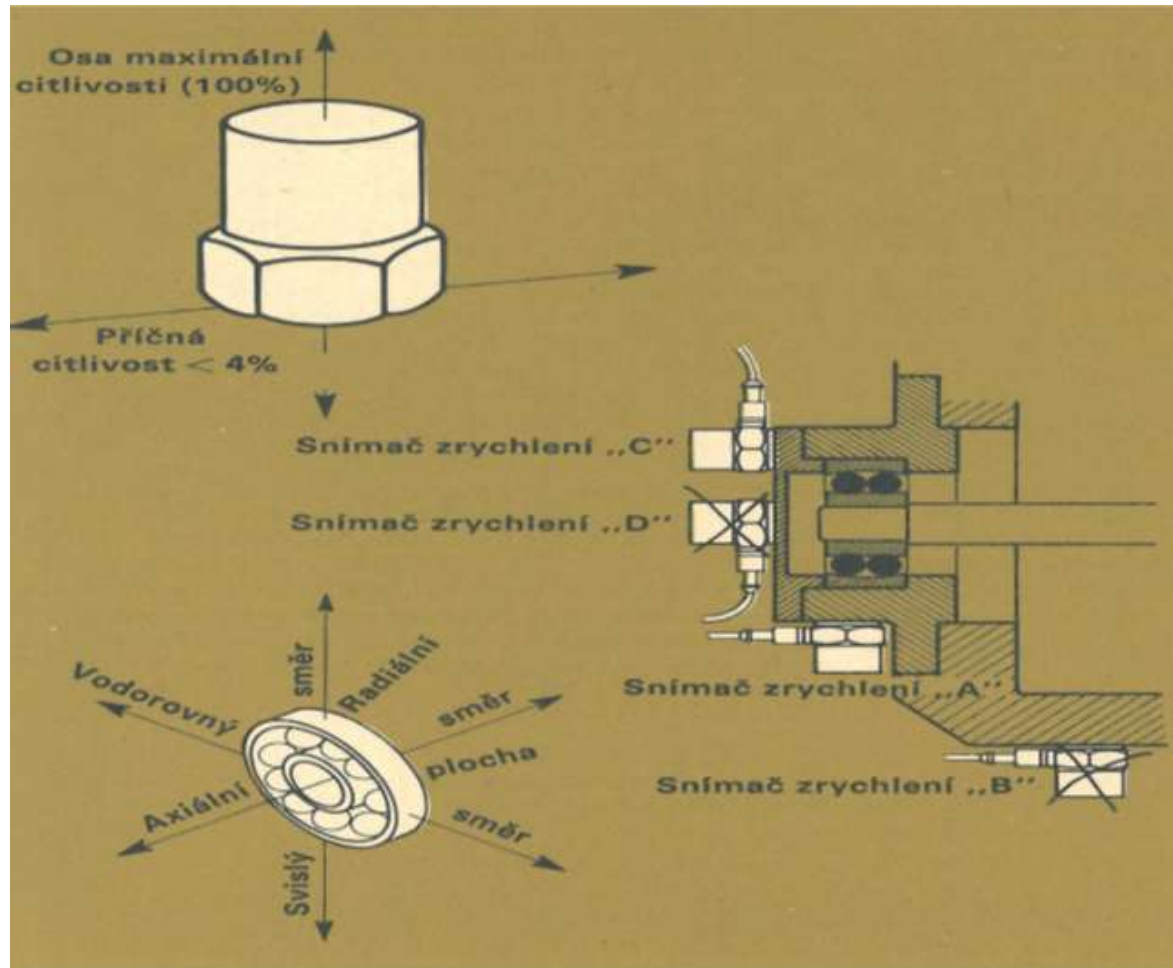


18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

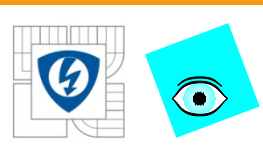


Upevnění snímačů vibrací

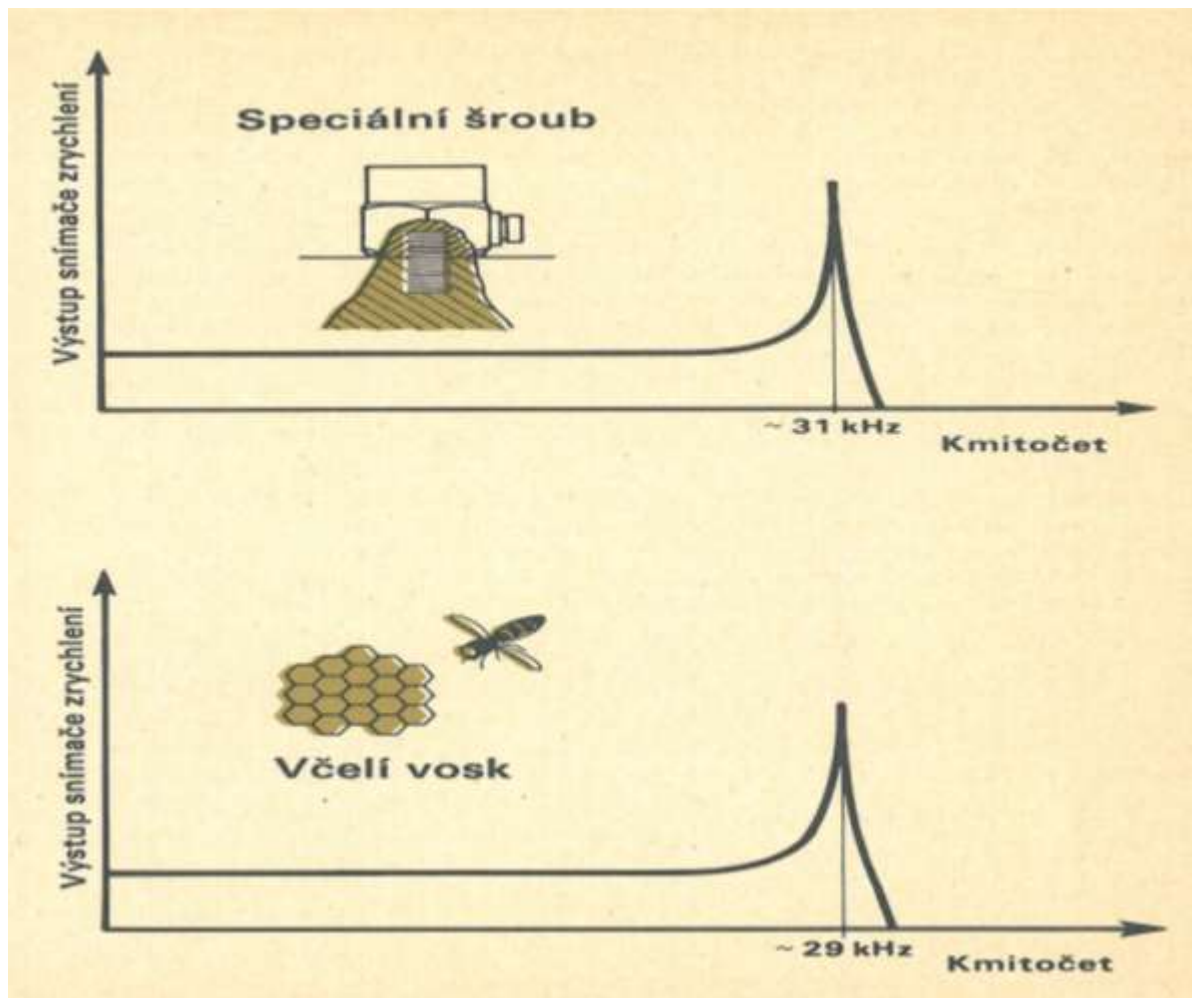


18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

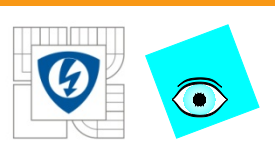


Upevnění snímačů vibrací

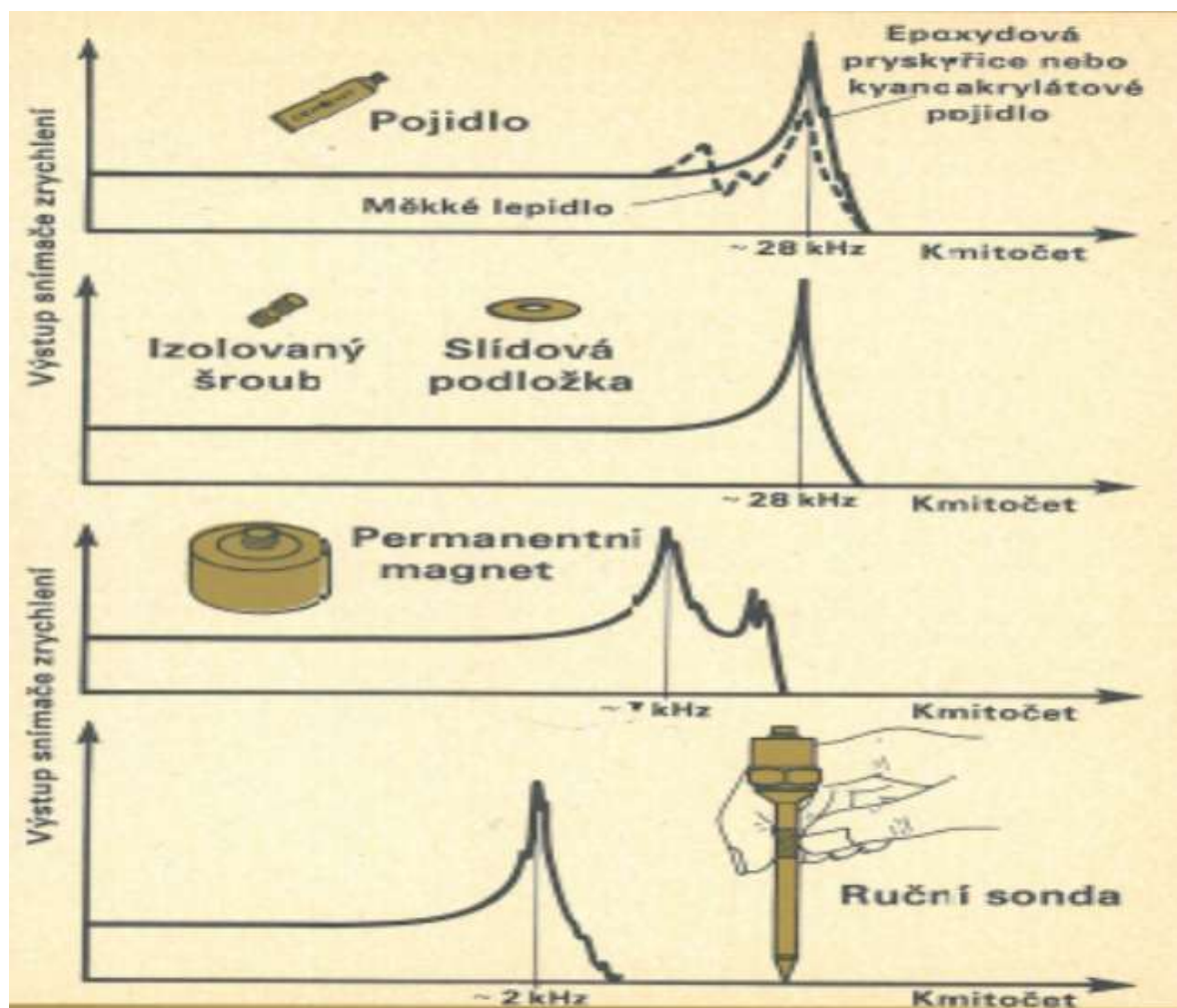


18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

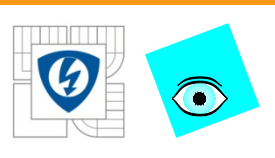


Upevnění snímačů vibrací

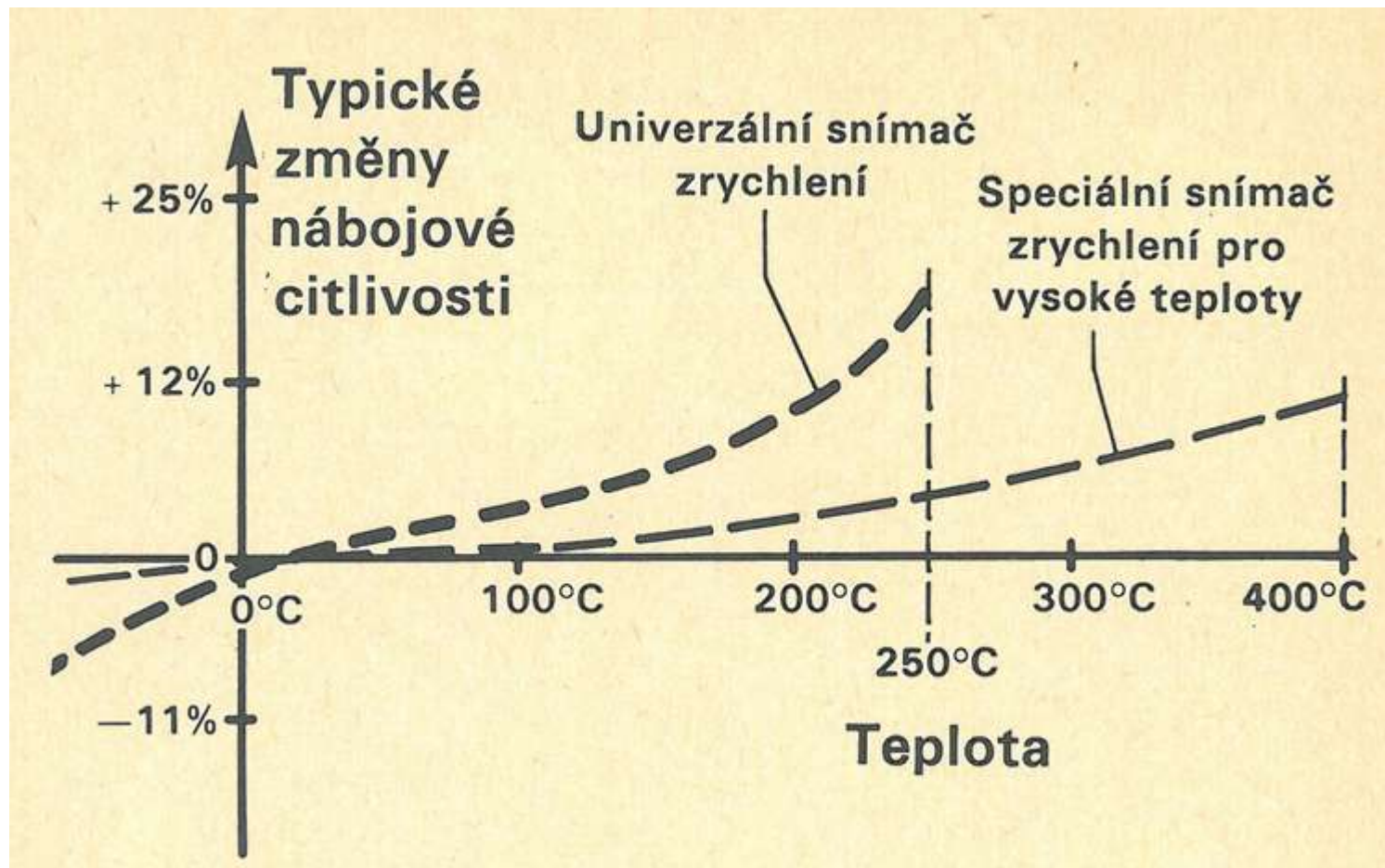


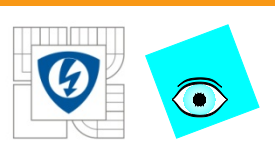
18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

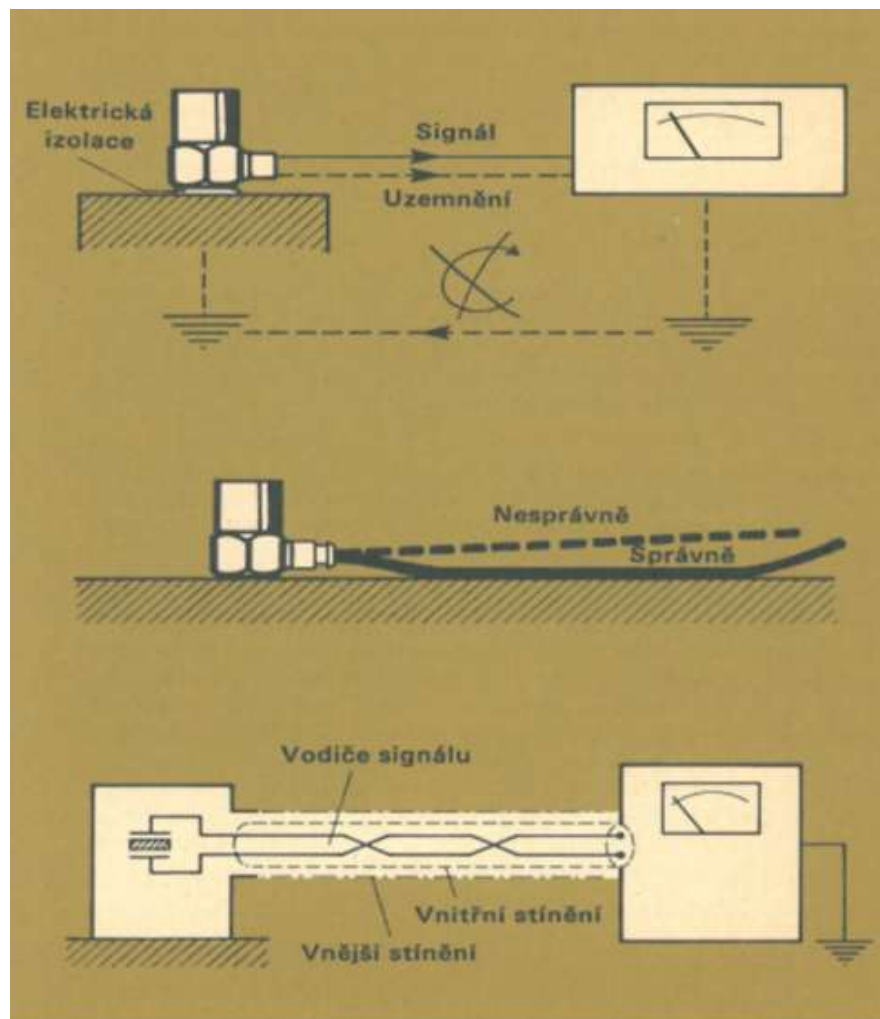


Vliv prostředí - teplota



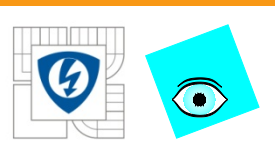


Vliv prostředí – šum kabelů

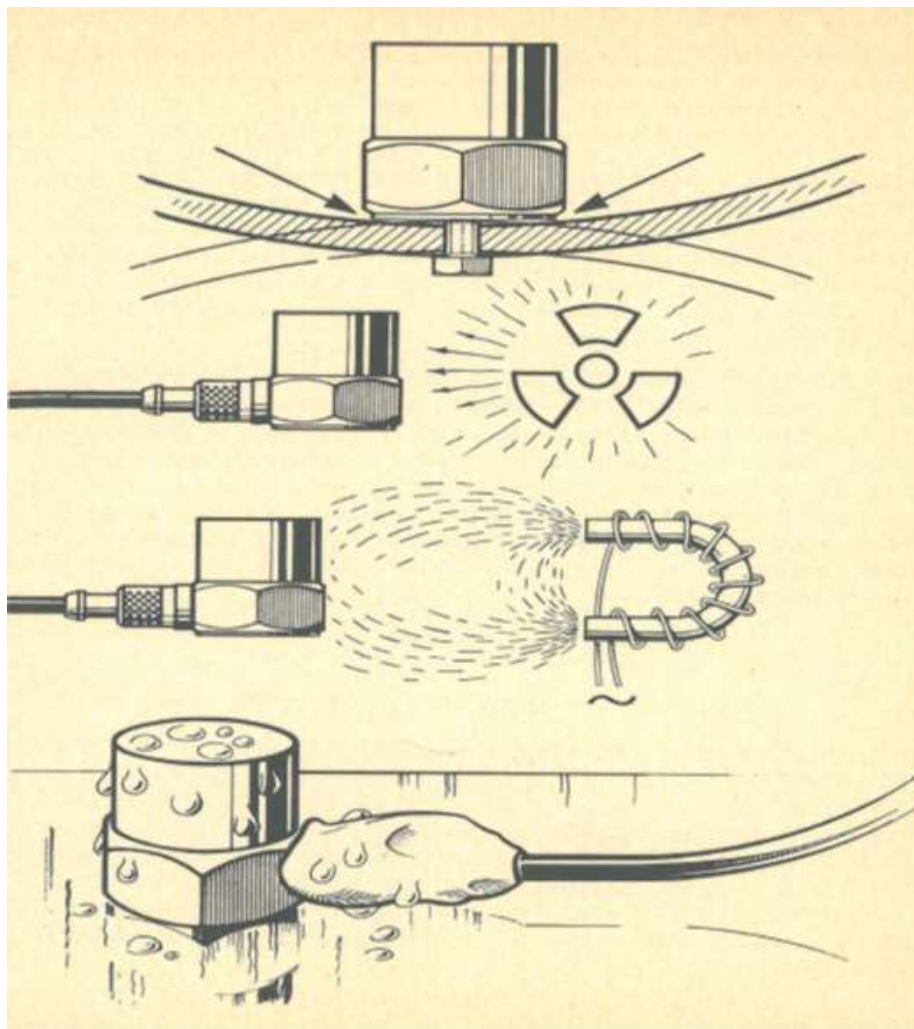


18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

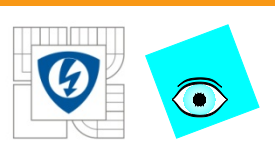


Vliv prostředí – jiné vlivy

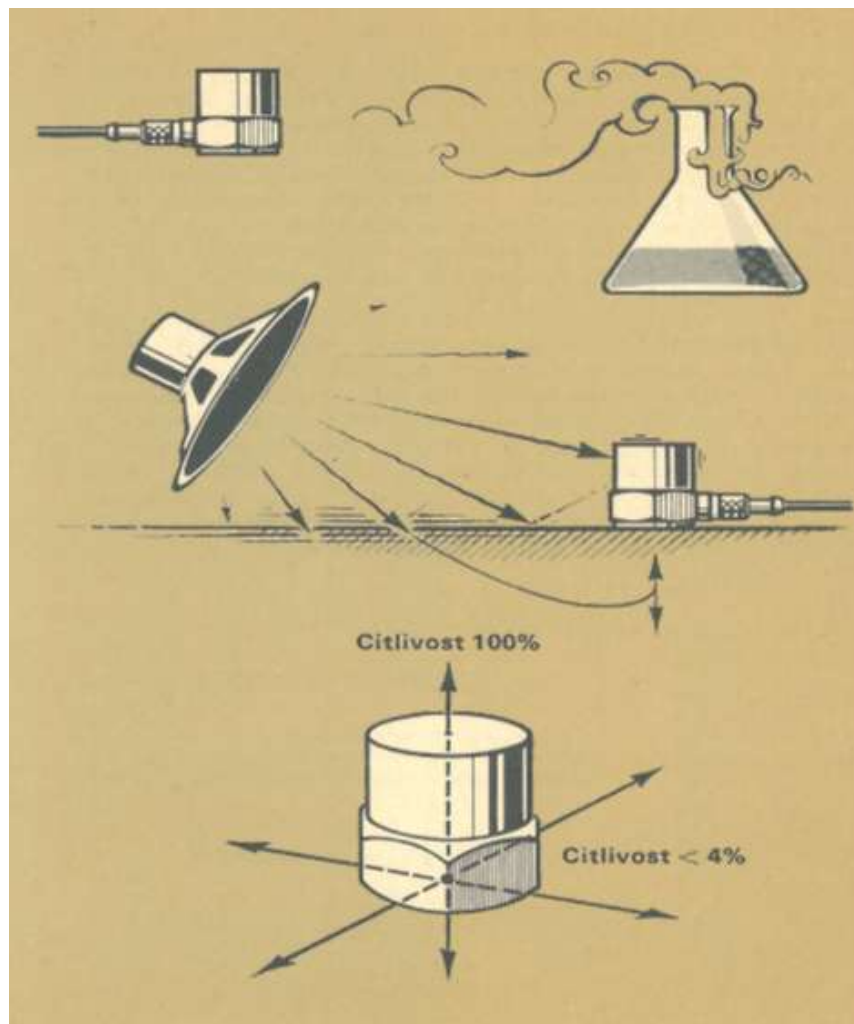


18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



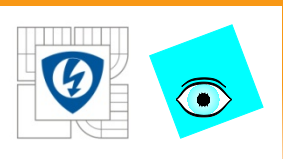
Vliv prostředí – jiné vlivy



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



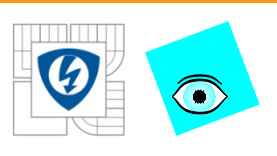


KALIBRACE SNÍMAČŮ VIBRACÍ

18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

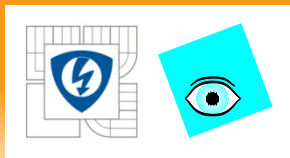




Kalibrace snímačů vibrací

Metody kalibrace snímačů vibrací jsou celosvětově standardizovány v normách ISO, 3 jsou i v ČSN:

- ČSN ISO 16063-1/2000 „Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů – Část 1: Základní pojetí“
- ČSN ISO 16063-11/2001 „Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů – Část 11: Primární kalibrace vibracemi pomocí laserové interferometrie“
- ČSN ISO 16063-21/2004 „Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů – Část 21: Kalibrace vibracemi porovnáním s referenčním snímačem“



Kalibrace snímačů vibrací

Etalony přímočarého mechanického kmitání

slouží k realizaci určujících veličin vibrací – kalibraci snímačů

Dvě úrovně etalonáže vibrací:

Primární

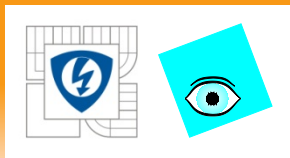
Kalibrace **etalonových** (referenčních) snímačů.

Metoda: **absolutní** – přímá návaznost na základní jednotky (délka, čas).

Sekundární

Kalibrace **pracovních** snímačů.

Metoda: **porovnávací** (s etalonovým snímačem)



Primární etalon přímočarých vibrací

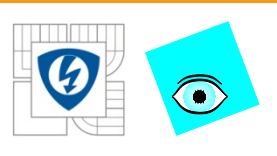
Kalibrace: **etalonových** (referenčních) snímačů.

Metoda: **absolutní** – přímá návaznost na základní jednotky (délka, čas).

Měření

- **amplitudy výchylky** harmonických vibrací laserovým interferometrem – návaznost na etalon délky (vlnová délka laseru)
- **kmitočtu vibrací čítačem** – návaznost na etalon času a kmitočtu (atomové hodiny)

Nejistoty kalibrace: řádu 0,1 %



Sekundární etalon přímočarých vibrací

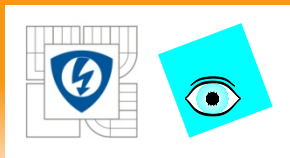
Kalibrace: **pracovních** snímačů

Metoda: **porovnávací** – porovnáním s etalonovým (referenčním) snímačem

Měření

- **amplitudy zrychlení** harmonických vibrací – porovnání s údajem etalonového snímače (návaznost na primární etalon vibrací)
- **kmitočtu vibrací** – čítačem (návaznost na etalon kmitočtu)

Nejistoty kalibrace: 0,6 % až několik %



Realizace primárního etalonu přímočarých vibrací harmonického průběhu

Laserinterferometrické měření výchylky vibrací

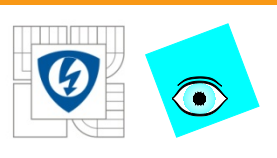
1) Metoda „počítání interferenčních proužků“

Měří se počet interferenčních proužků během jedné nebo více celých period mechanického kmitu. Pohyb interferenčního pole jednokanálového interferometru se snímá fotodetektorem. Při průchodu světlého proužku se vygeneruje elektrický impuls. Čítačem se měří kmitočet nebo počet impulsů za jeden nebo více period mechanického kmitu.

Lze odvodit, že citlivost S kalibrovaného akcelerometru je dána vztahem

$$S = \frac{U}{ff_f} \times 0,3202 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$$

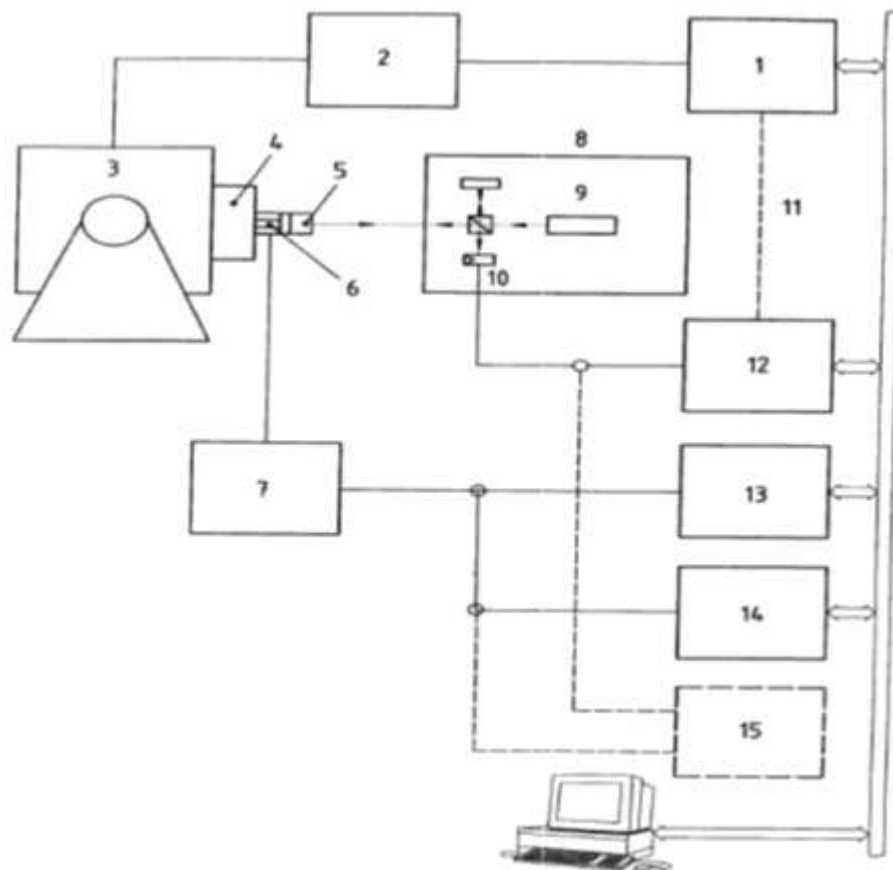
kde U je amplituda výstupního elektrického signálu z akcelerometru,
 f je kmitočet vibrátoru,
 f_f je frekvence interferenčních proužků.

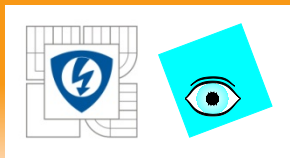


Realizace primárního etalonu

Blokové uspořádání
primárního etalonu
– 1. metoda „počítání
interferenčních proužků“

Jednokanálový
Michelsonův
interferometr



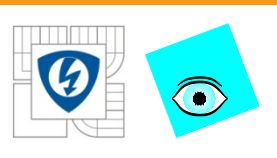


Realizace primárního etalonu přímočarých vibrací harmonického průběhu

Laserinterferometrické měření výchylky vibrací

2) Metoda „sinusové aproximace“

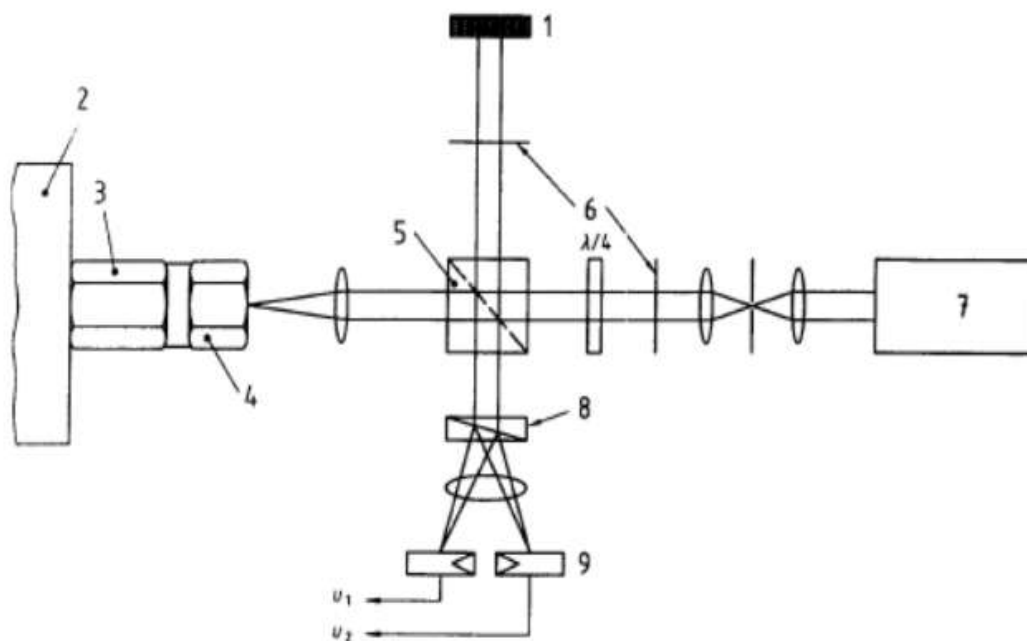
Při kalibraci se tři signály (ze snímače a z obou fotodetektorů dvoukanálového interferometru) digitalizují a uloží do paměti počítače. Poté počítačový program algoritmem sinusové aproximace vytvoří z dat uložených v paměti analogové napětí, jehož časový průběh a i velikost amplitudy výchylky odpovídá časovému i amplitudovému průběhu vibrací a protože je k dispozici i amplitudový a časový průběh elektrického signálu z kalibrovaného akcelerometru, lze vypočítat jak velikost citlivosti akcelerometru, tak i fázový posun.

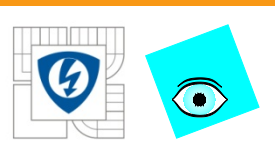


Realizace primárního etalonu

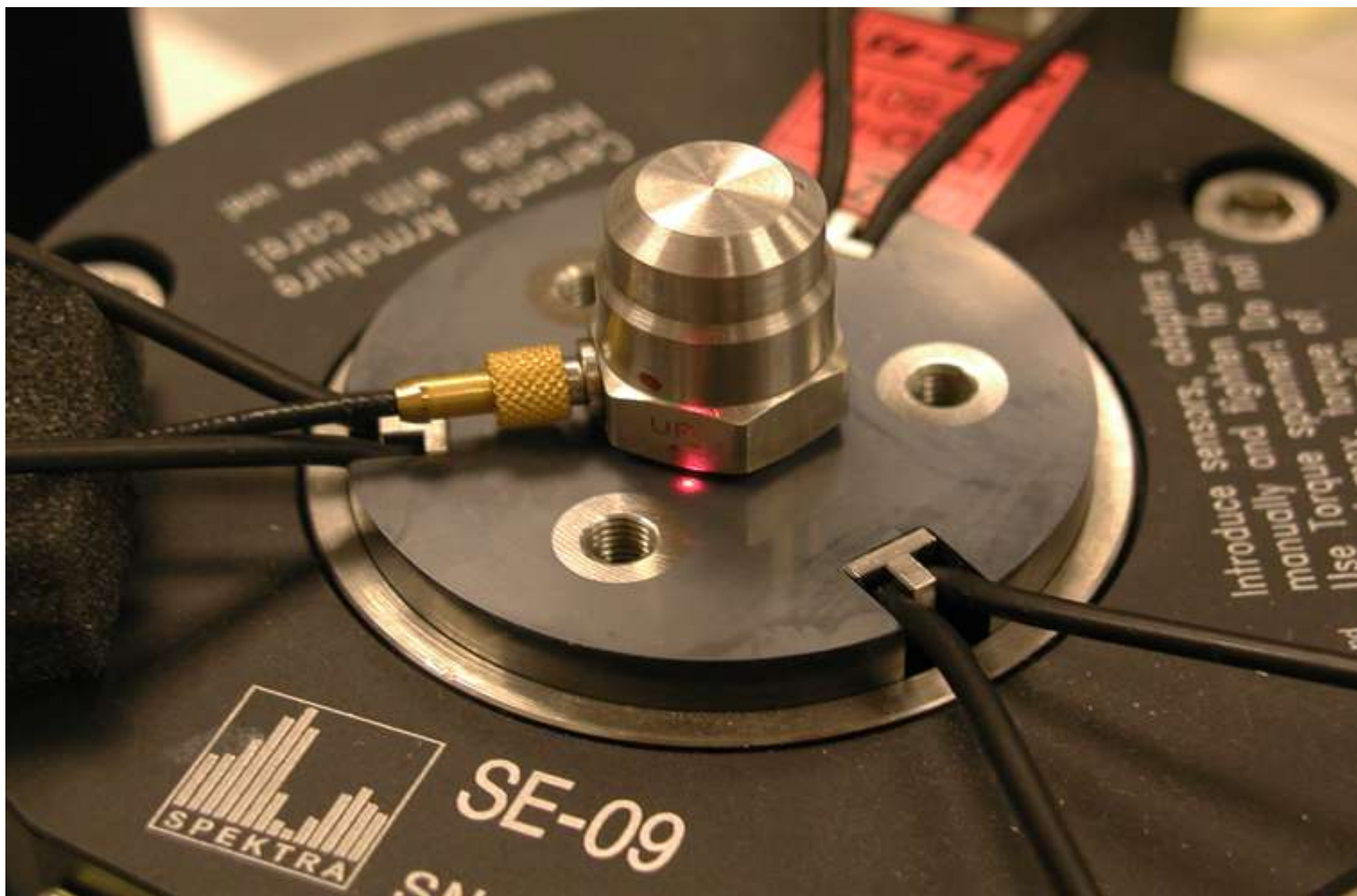
Blokové uspořádání primárního etalonu – 2. metoda „sinusové aproximace“

Michelsonův interferometr s kvadrurním výstupem





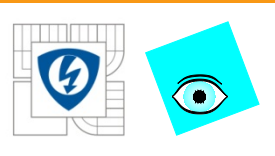
Primární etalon – laserinterferenční vibrometr



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



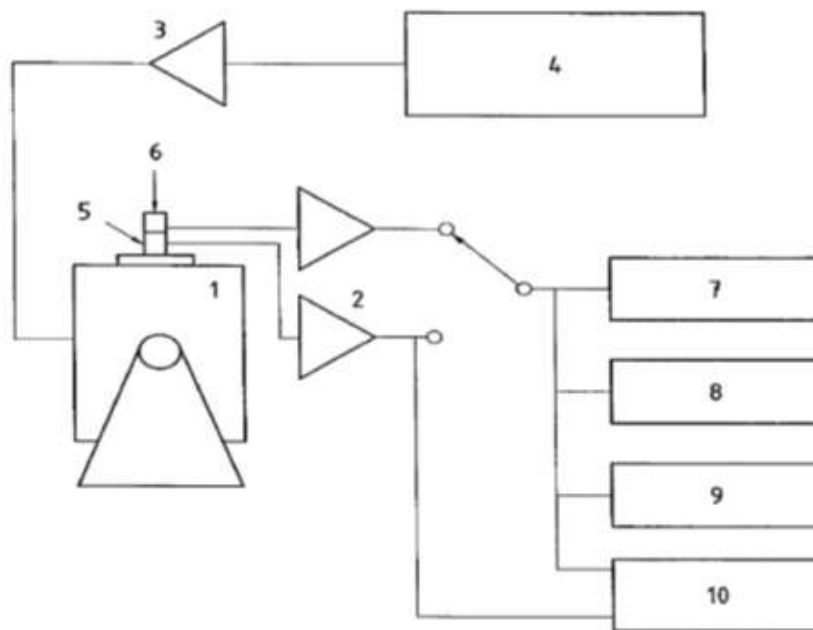


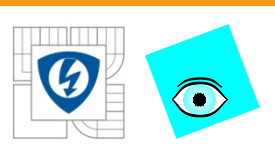
Realizace sekundárního etalonu

Citlivost kalibrovaného snímače S_2

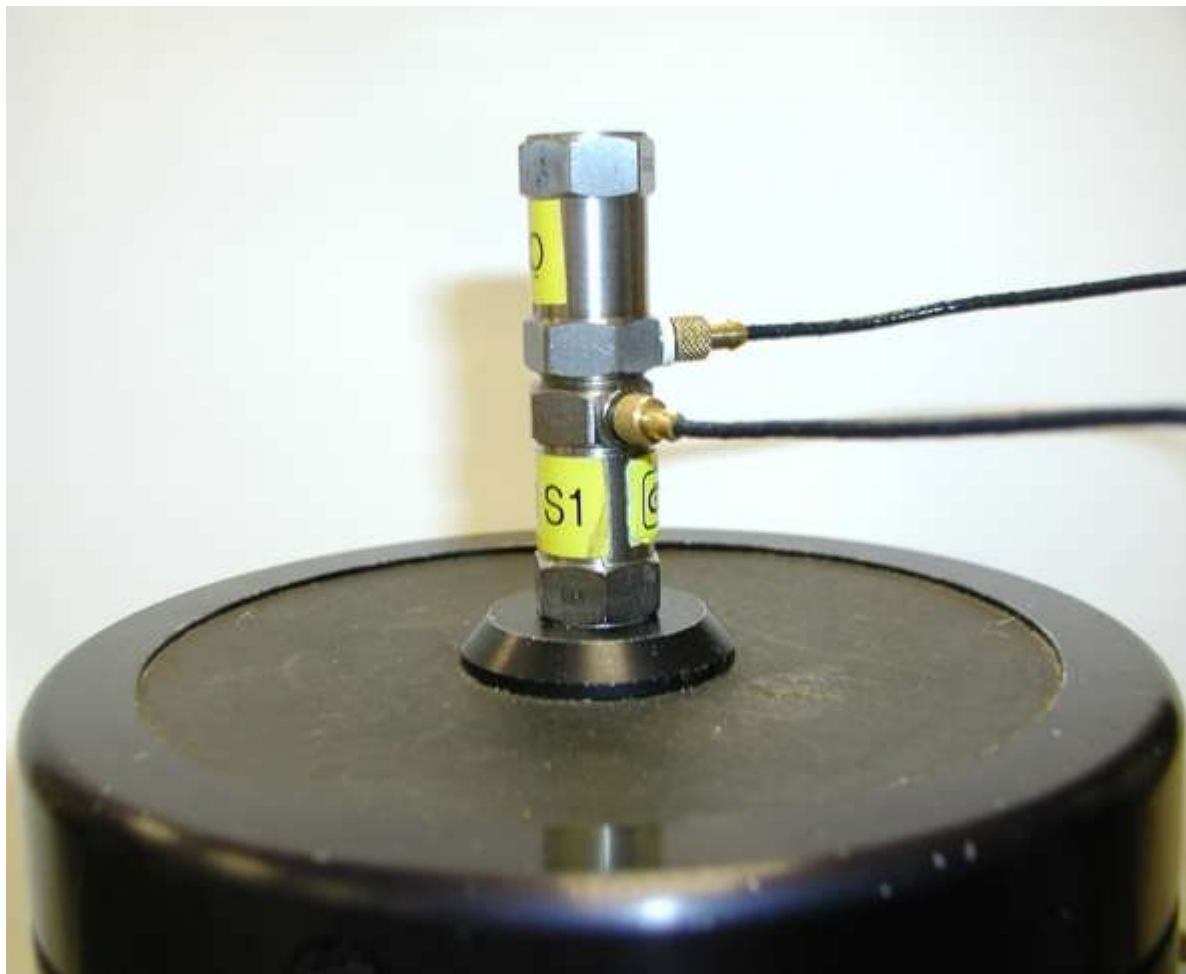
$$S_2 = \frac{X_2}{X_1} S_1$$

kde S_1 je velikost citlivosti etalonového snímače, X_1 je výstup etalonového snímače, X_2 je výstup kalibrovaného snímače





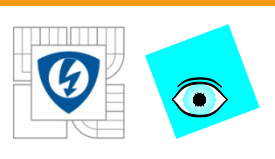
Sekundární etalon – porovnávací metoda



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





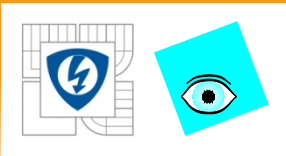
Sekundární etalon – kalibrace na velmi nízkých kmitočtech



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



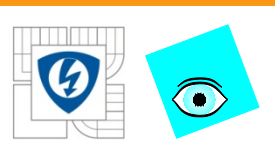


MĚŘENÍ MECHANICKÝCH RÁZŮ

18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





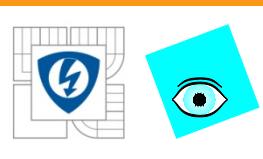
Barrierové zkoušky odolnosti vozidel (crash testy)



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





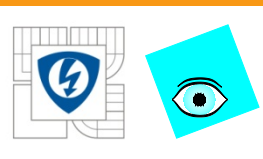
Různé typy crash testů - ŠKODA Fabia 2007



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





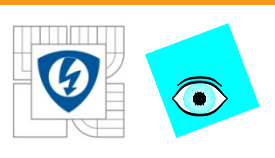
Zkušební figuríny se snímači před crash testem



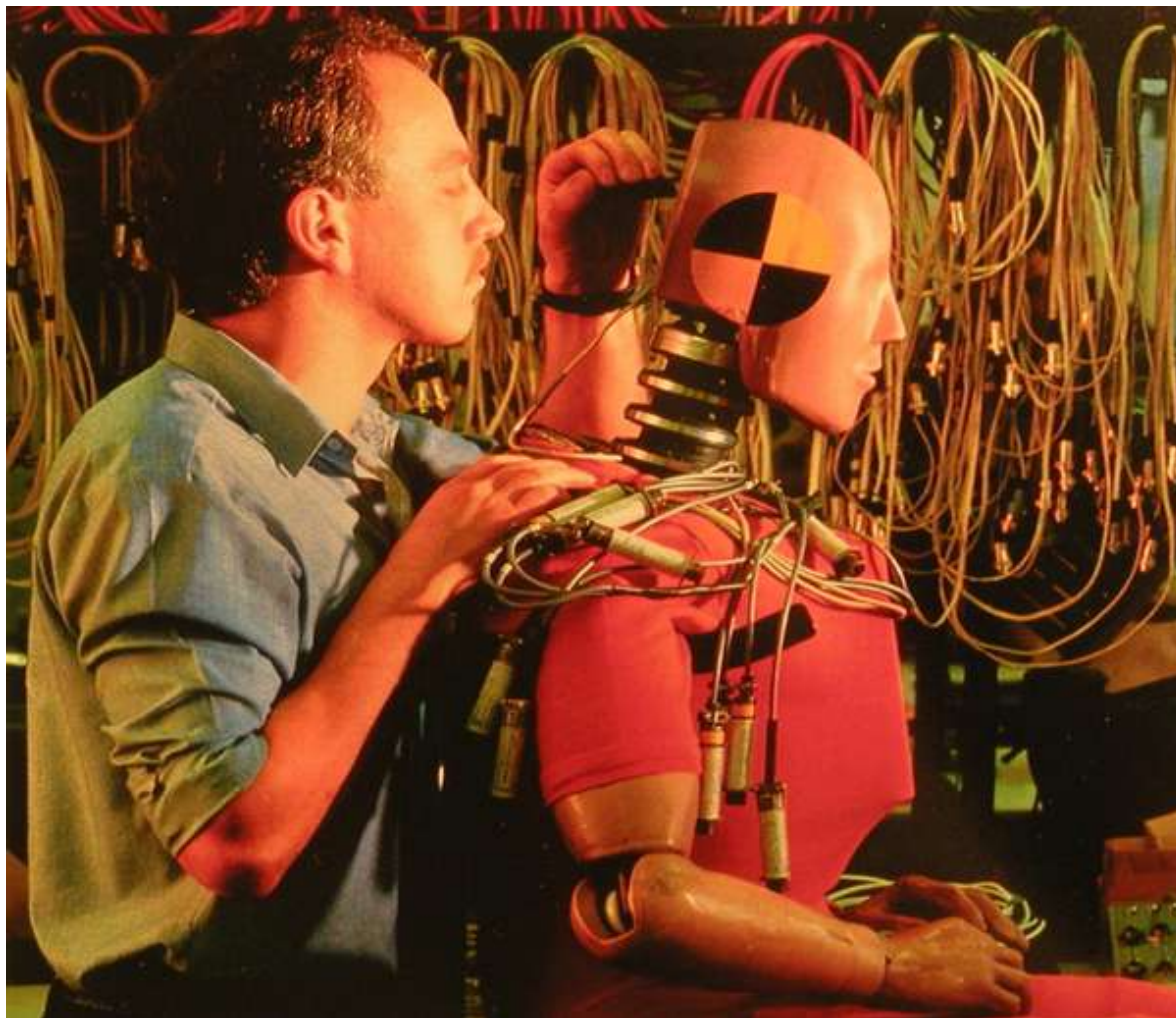
18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





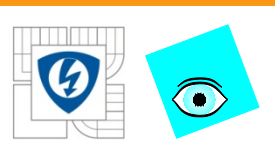
Montáž akcelerometrů do figuríny



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





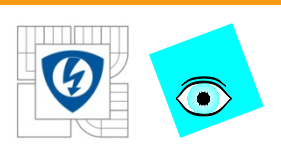
Měřicí aparatura ve voze před crash testem



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



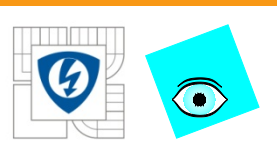


KALIBRACE SNÍMAČŮ RÁZŮ

18.12.2012

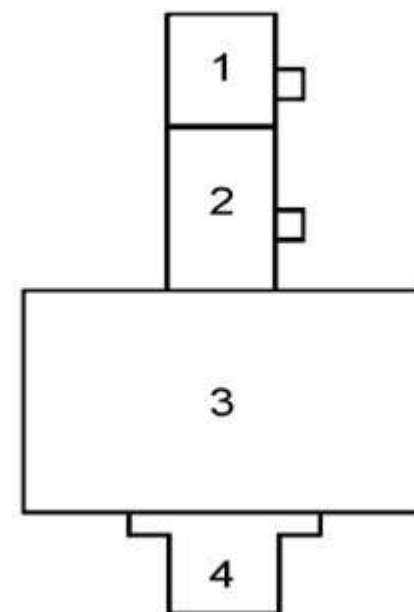
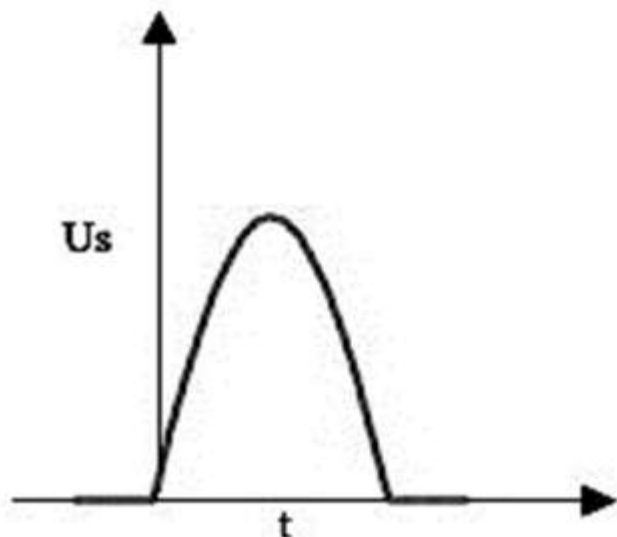
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



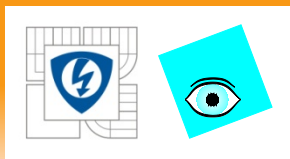


ČSN ISO 16063-21/2006 „Metody kalibrace snímačů vibrací a rázů – Část 22: Kalibrace rázy porovnáním s referenčním snímačem“

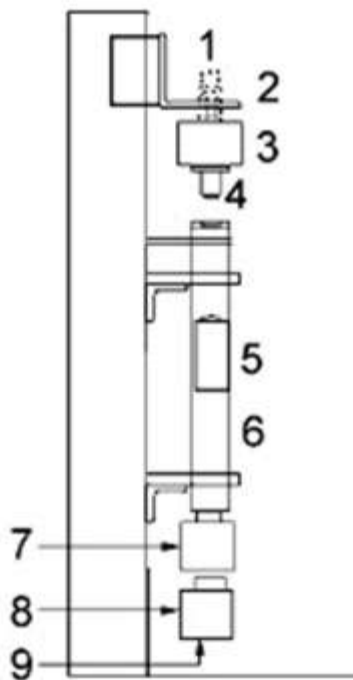
Kalibrační ráz půlsinusového průběhu



- 1 Kalibrovaný snímač rázů
- 2 Etalonový akcelerometr
- 3 Kalibrační hmota
- 4 Kovadlina

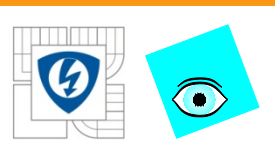


Kalibrátor snímačů rázu POP (vzduchem poháněný projektil) Rozsah velikosti generovaných rázů 20 g až 10.000 g

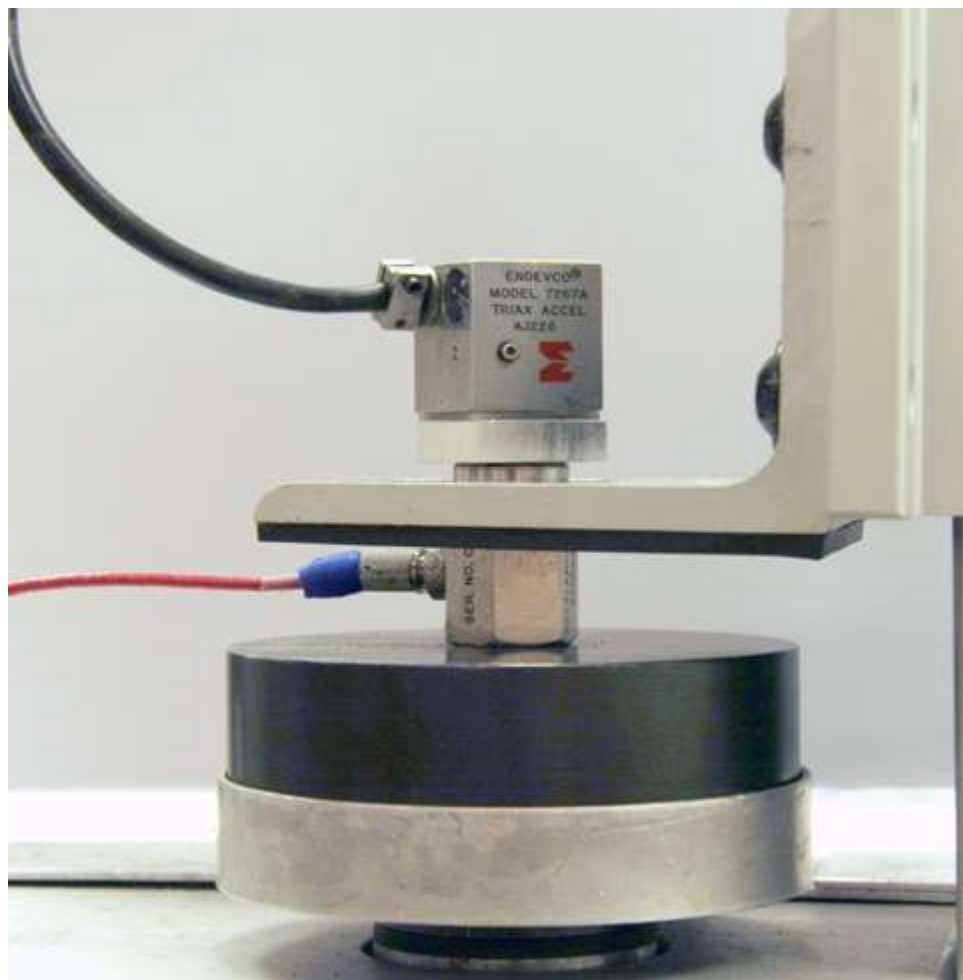


18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



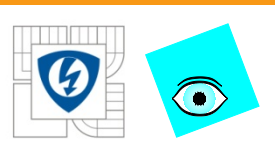
Kalibrátor snímačů rázu POP – upevnění snímačů



18.12.2012

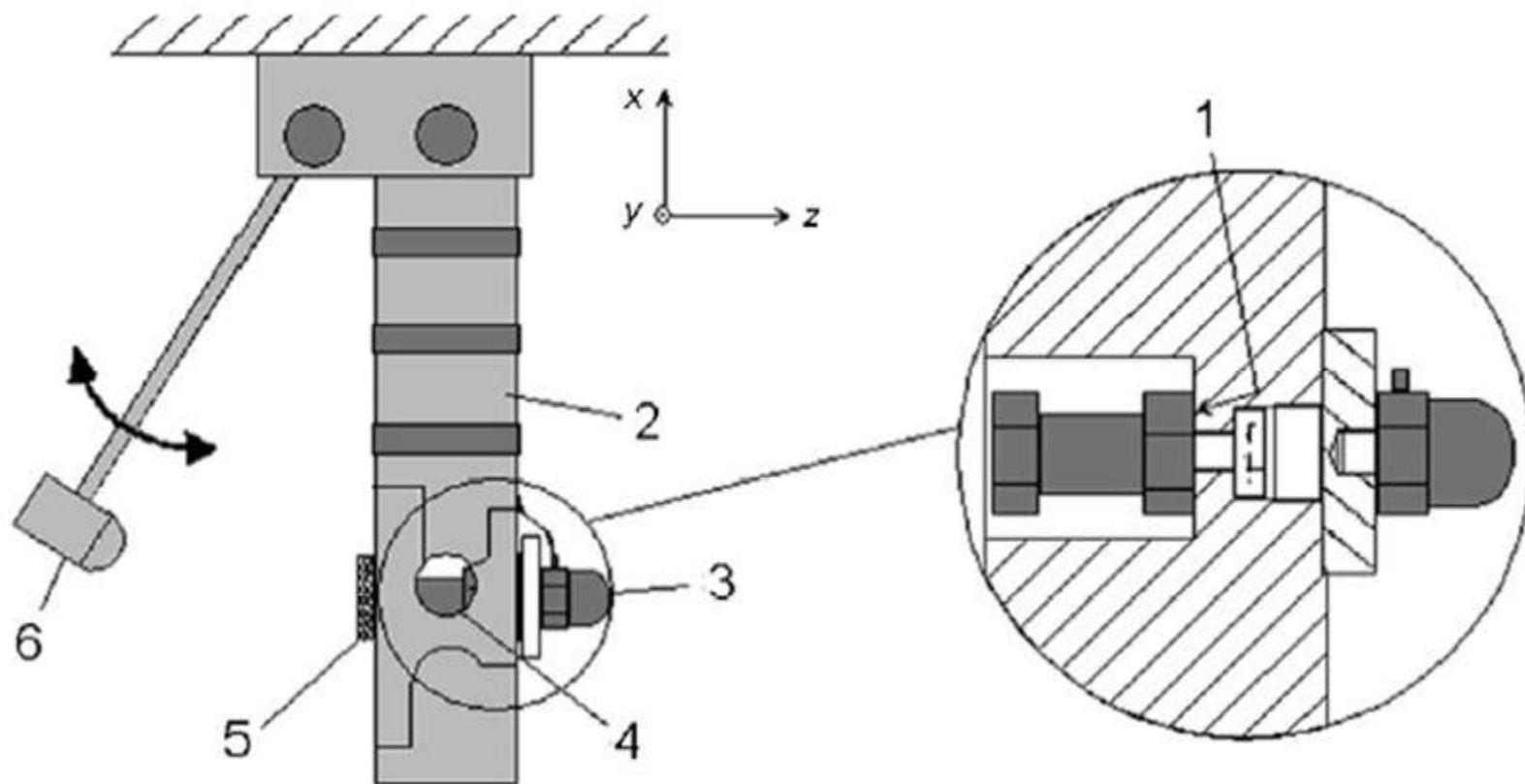
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

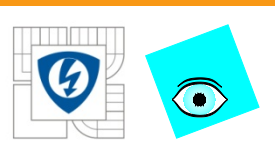




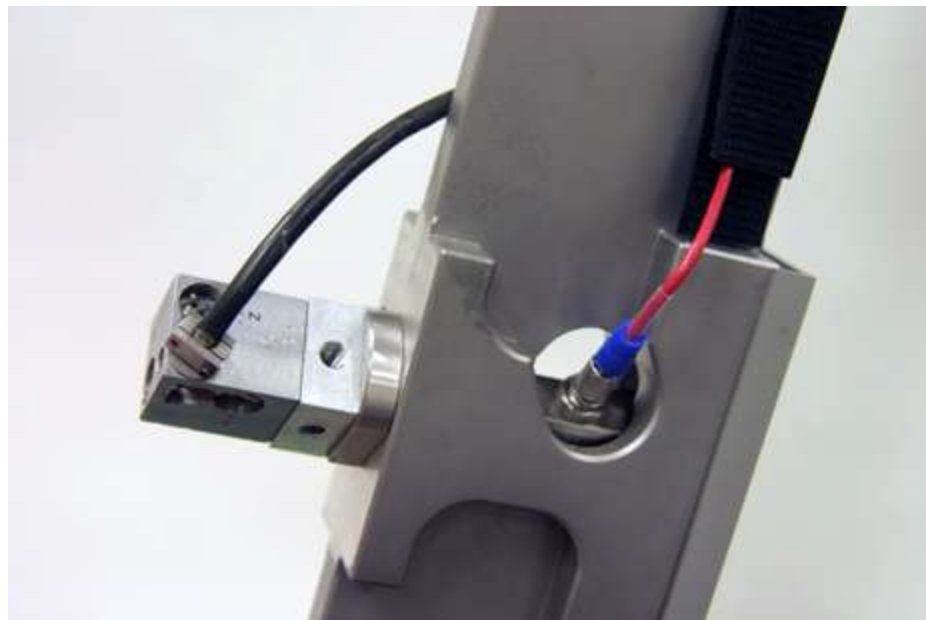
Kalibrátor snímačů rázů – kyvadlo

Rozsah generovaných velikostí rázů 1 g až 500 g





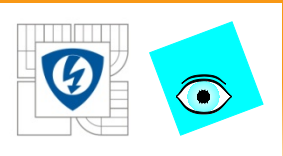
Kalibrátor snímačů rázu - kyvadlo



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



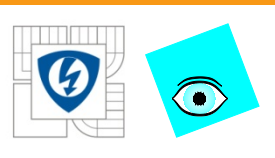


MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH SIL

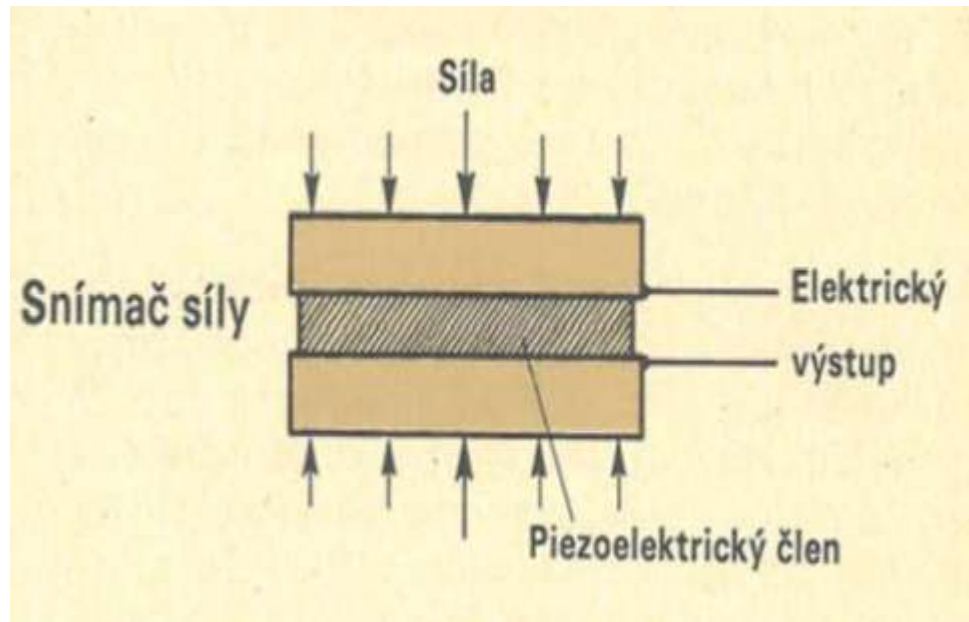
18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



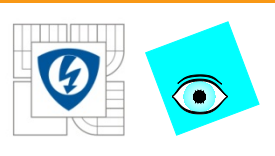


Měření dynamických sil



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



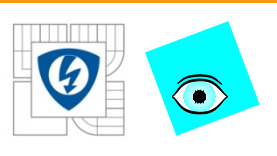
Kalibrace snímačů dynamických sil

$$F(t) = m_{kal} \cdot a(t)$$

kde F je síla, působící na kalibrovaný snímač síly [N],

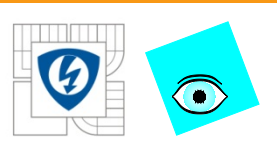
m_{kal} je kalibrační hmota, upevněná na kalibrovaný snímač síly [kg], a je dynamické zrychlení působící na kalibrovaný snímač [$m \cdot s^{-2}$], t je čas [s]





Měření rychlosti vozidel

- Mikrovlnné dopplerovské rychloměry (radary)
- Laserové (lidarové) rychloměry
- Úsekové rychloměry



Mikrovlnné dopplerovské rychloměry (radary)

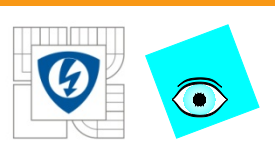
Dopplerův jev

$$f_d = f_r - f_s = \frac{2 \cdot v \cdot f_s}{c} \cdot \cos \alpha$$

kde f_d je Dopplerův kmitočet (rozdíl mezi kmitočtem odraženého a vyslaného signálu) [Hz]
 v rychlost měřeného vozidla [m·s⁻¹]
 f_r kmitočet odraženého signálu [Hz]
 f_s kmitočet vysílaného signálu [Hz]
 c rychlost světla (2,997.108 m·s⁻¹)
 α úhel mezi osou anténního svazku měřiče rychlosti a osou směru jízdy měřeného vozidla [°]

Měřená rychlost

$$v = \frac{c \cdot f_d}{2 \cdot f_s \cdot \cos \alpha}$$



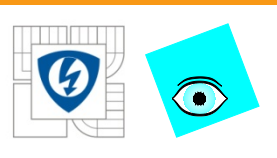
Mikrovlnný dopplerovský rychloměr (radar)



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



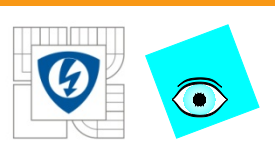


Laserové (lidarové) rychloměry

Lidarové nebo též **laserové rychloměry** měří rychlost na principu laserového dálkoměru, který měří v krátkých časových úsecích vzdálenost jedoucího vozidla a z časové změny vzdálenosti vypočítá jeho rychlost. Vysílač laserového rychloměru, kterým je laserová dioda, vysílá s opakovacím kmitočtem řádu stovek až desítek tisíc hertzů infračervené pulzy směrem na měřené vozidlo, od kterého se odráží zpět a dopadají na fotodetektor laserového rychloměru. Z doby t [s] která uplyne mezi vysláním laserového pulzu a dopadem odraženého pulzu na fotodetektor a ze známé rychlosti šíření světla c ($2,997 \cdot 10^8$ m/s) lze vypočítat vzdálenost l [m] mezi rychloměrem a měřeným vozidlem ze vztahu

$$l = 0,5 t * c$$

$$v = \frac{dl}{dt}$$



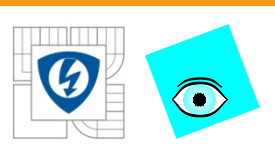
Laserové (lidarové) rychloměry



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





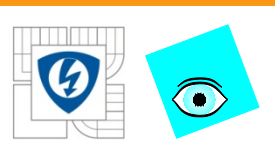
Laserové (lidarové) rychloměry



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





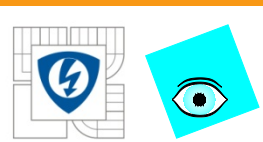
Úsekové rychloměry s krátkým měřicím úsekem



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





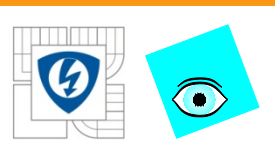
Úsekové rychloměry s dlouhým měřicím úsekem



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Úsekové rychloměry s dlouhým měřicím úsekem

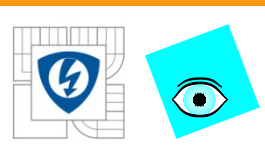


18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ







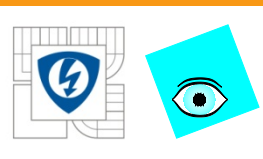
Kalibrace rychloměrů na etalonové dráze



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





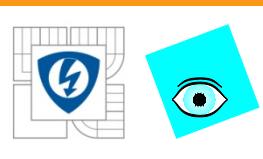
Kalibrace rychloměrů na etalonové dráze



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





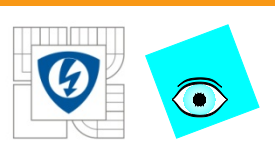
Kalibrace rychloměrů na etalonové dráze



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Kalibrace rychloměrů měřicím vozidlem s etalonovým rychloměrem

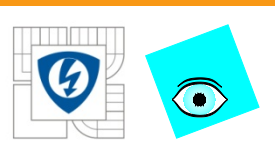


Měřicí vozidlo ČMI s etalonovým rychloměrem

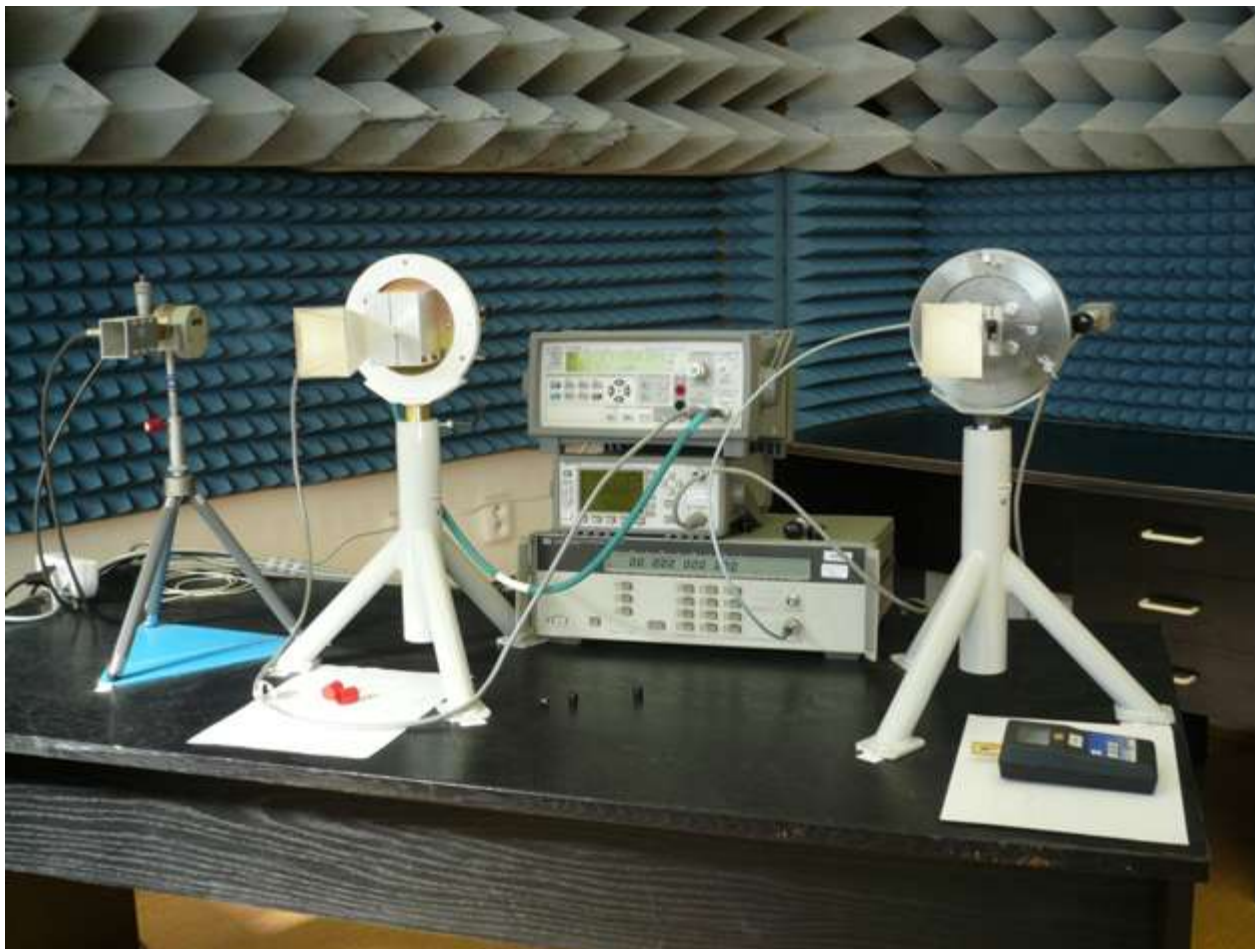
18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





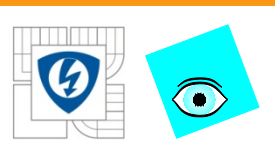
Kalibrace radarových rychloměrů simulátorem v laboratoři



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





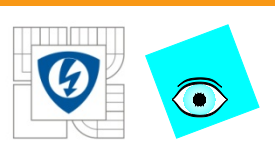
Kalibrace laserových rychloměrů simulátorem v laboratoři



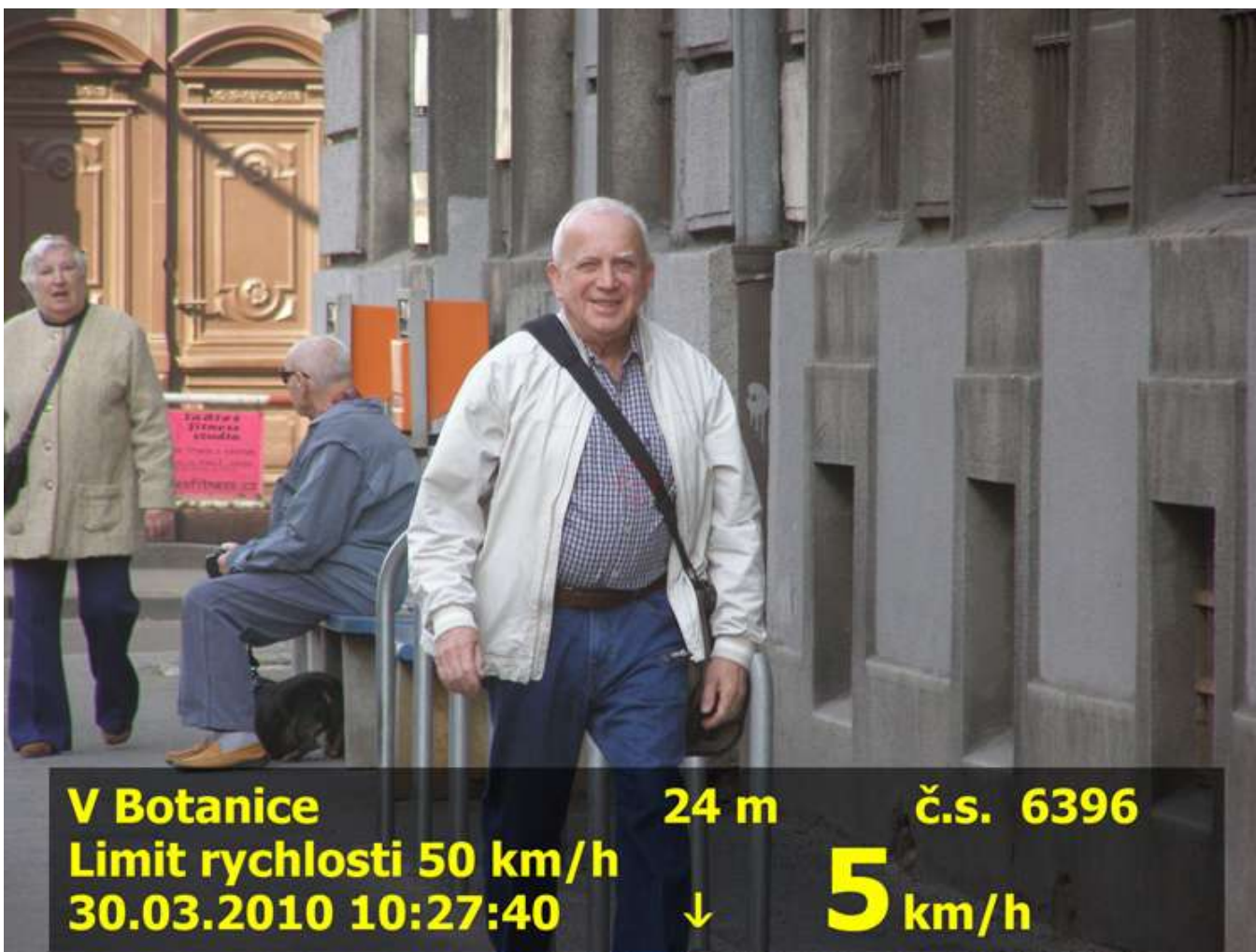
18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Dík za pozornost a dodržujte povolenou rychlost !



18.12.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

