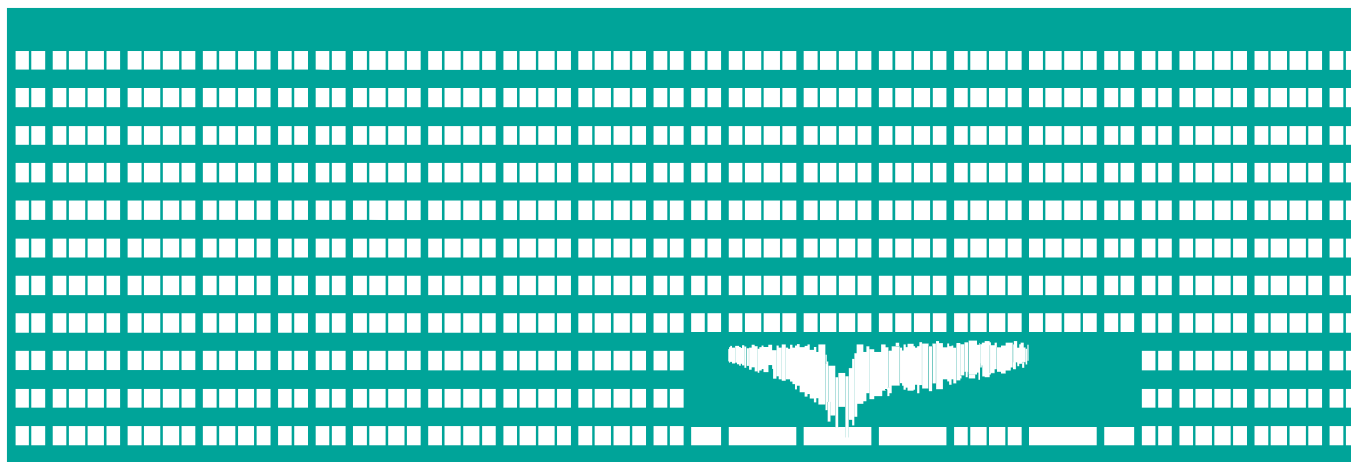


VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

VSB TECHNICAL
UNIVERSITY
OF OSTRAVA



www.vsb.cz

Technická diagnostika

Vibrodiagnostika

Ing. Jan BLATA, Ph.D.

Kat. 340, VŠB-TU Ostrava

Vibrodiagnostika

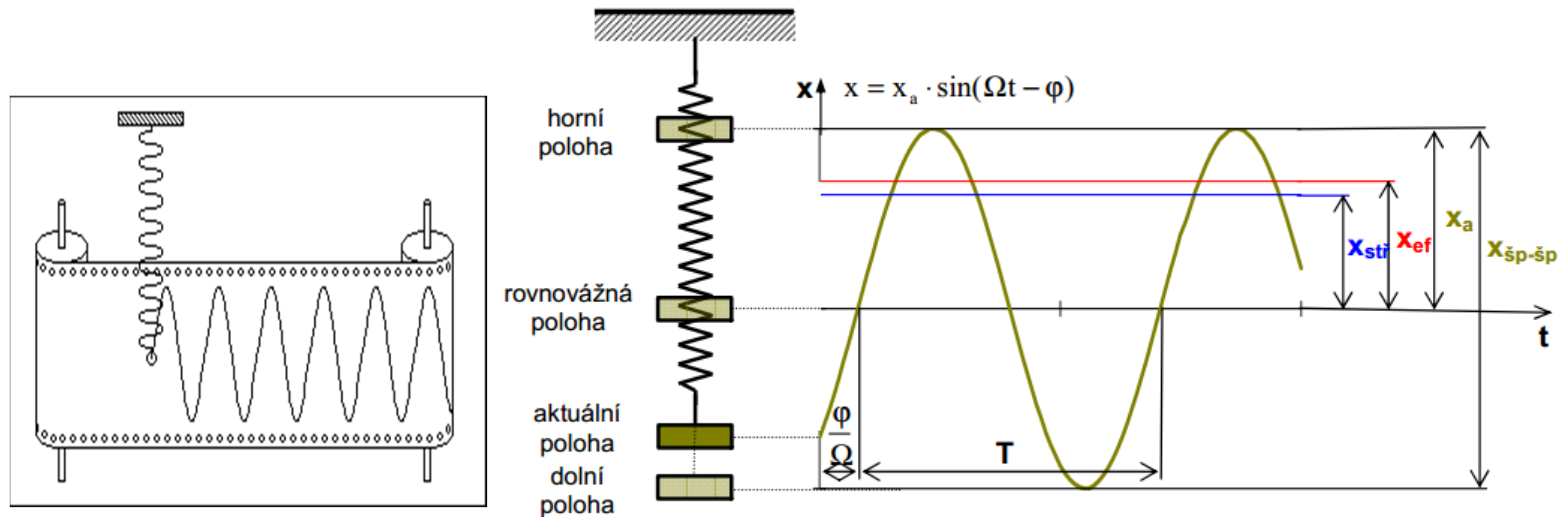


Je jednou z nejpoužívanějších metod pro diagnostiku technického stavu strojních zařízení. Pro vyhodnocení stavu využívá vibrační signál, který je dále zpracován a analyzován. Pro měření a analýzu vibračního signálu využíváme rychlost, zrychlení nebo výchylku vibrací.

Základní veličiny popisující kmitavý pohyb:

Výchylka kmitání:

$$x = X_{\max} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = X_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) = X_{\max} \cdot \sin(\omega t) \quad [\text{mm}]$$



Okamžitá výchylka:

$$x = X_{\max} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = X_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) = X_{\max} \cdot \sin(\omega t) \quad [\text{mm}]$$

Rychlost:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega \cdot X_{\max} \cdot \cos(\omega t) = V_{\max} \cdot \cos(\omega t) = V_{\max} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Zrychlení:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 \cdot X_{\max} \cdot \sin(\omega t) = -A_{\max} \cdot \sin(\omega t) = A_{\max} \cdot \sin(\omega t + \pi) \quad [\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}]$$

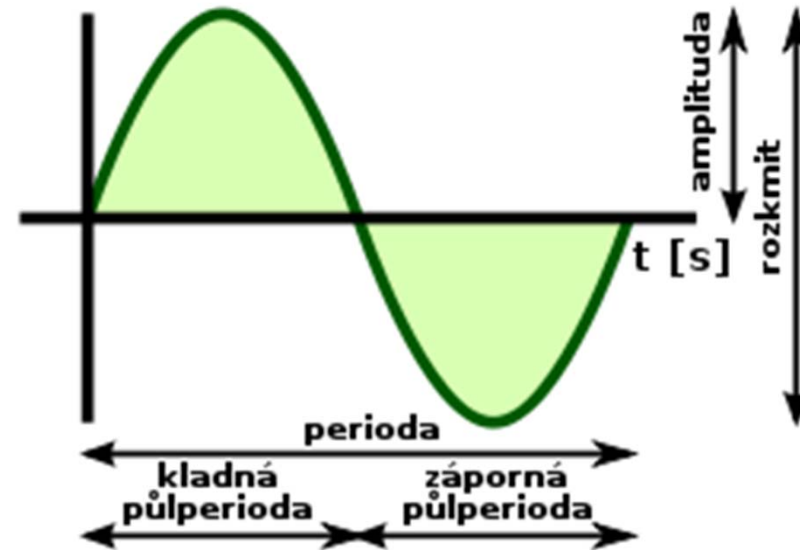
Frekvence [Hz]:

$$f = \omega / 2 \pi = 1 / T$$

Hz – počet cyklů za sekundu

ω – úhlová frekvence

T – perioda (doba trvání jednoho opakování periodického děje)

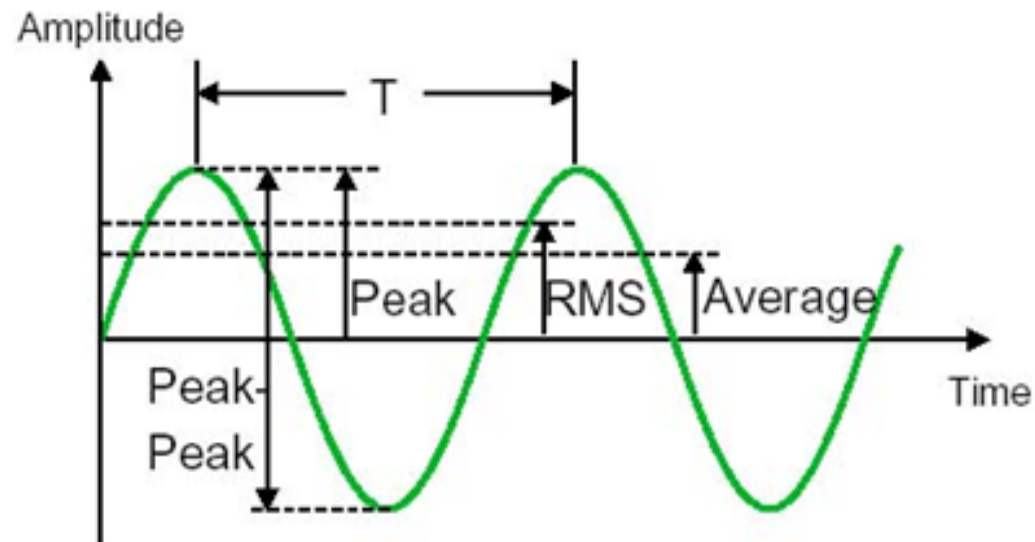


Některé výrazy často používané při měření vibrací:

Špička (peak) - vzdálenost mezi vrcholem amplitudy (X_{max}) a nulovou úrovní signálu.

Špička – špička (peak - to - peak) - vzdálenost mezi nejnižším a nejvyšším vrcholem vlny ($2 \cdot X_{max}$).

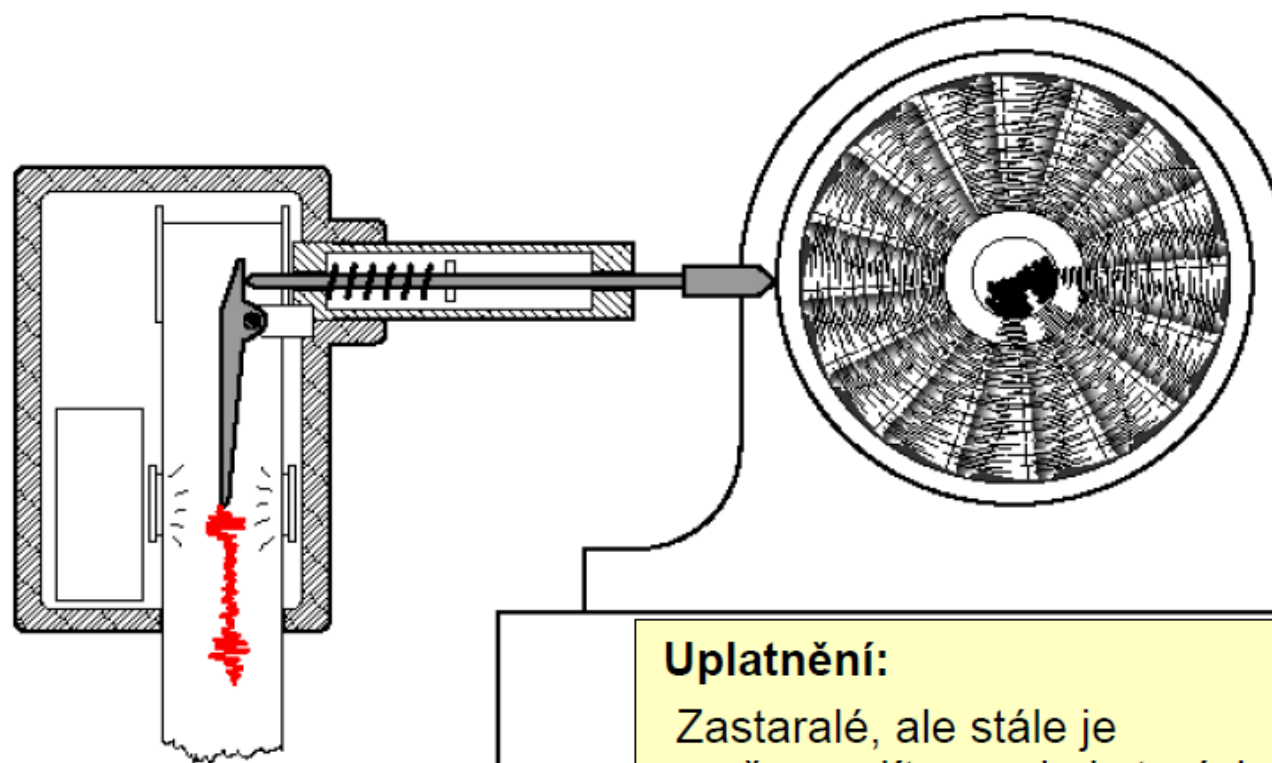
Průměrná hodnota (Average) - vzhledem k neideálnímu sinusovému průběhu je průměrná hodnota nenulová (nebo také střední absolutní hodnota) ($0,637 \cdot X_{max}$).



Snímače vibrací

Pro měření mechanické výchylky (vibrací) a její převod na elektrickou veličinu, která se dále zesiluje a zpracovává, slouží snímače vibrací. Pro rozdílné podmínky a aplikace jsou vytvořeny různé druhy snímačů vibrací, které se mohou lišit např. rozsahem frekvence, dynamickým rozsahem, přesností, citlivostí na teplotu, cenou apod. Pro základní rozdělení snímačů je možné uvést dva základní druhy:

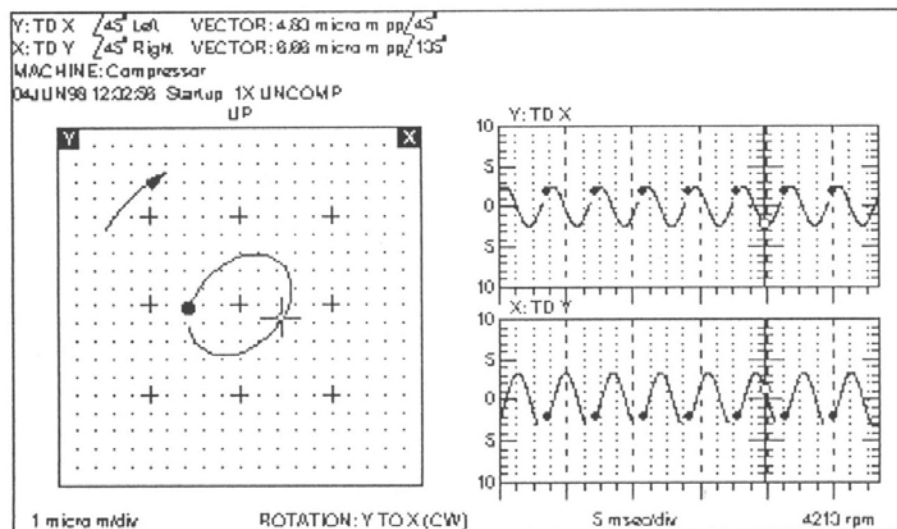
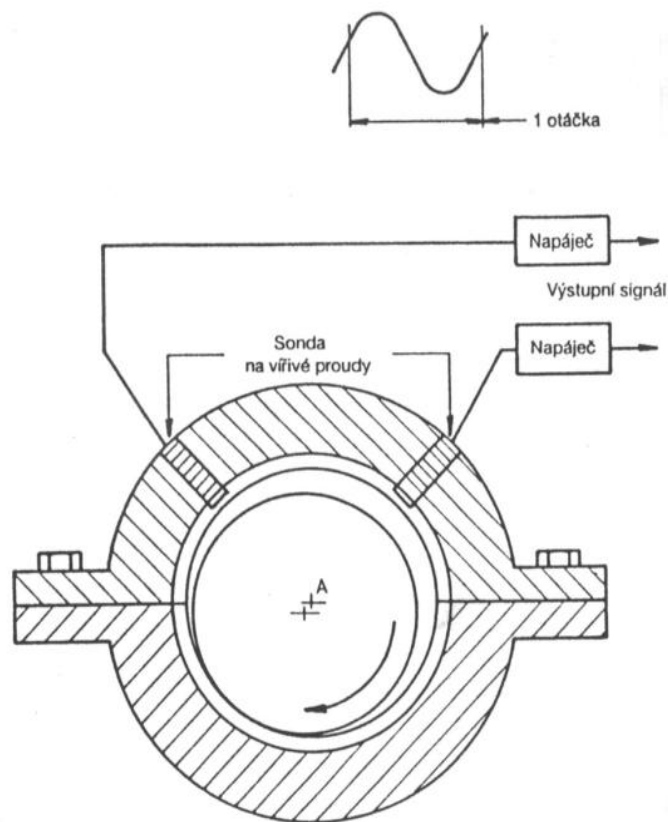
Mechanický pákový snímač výchylky

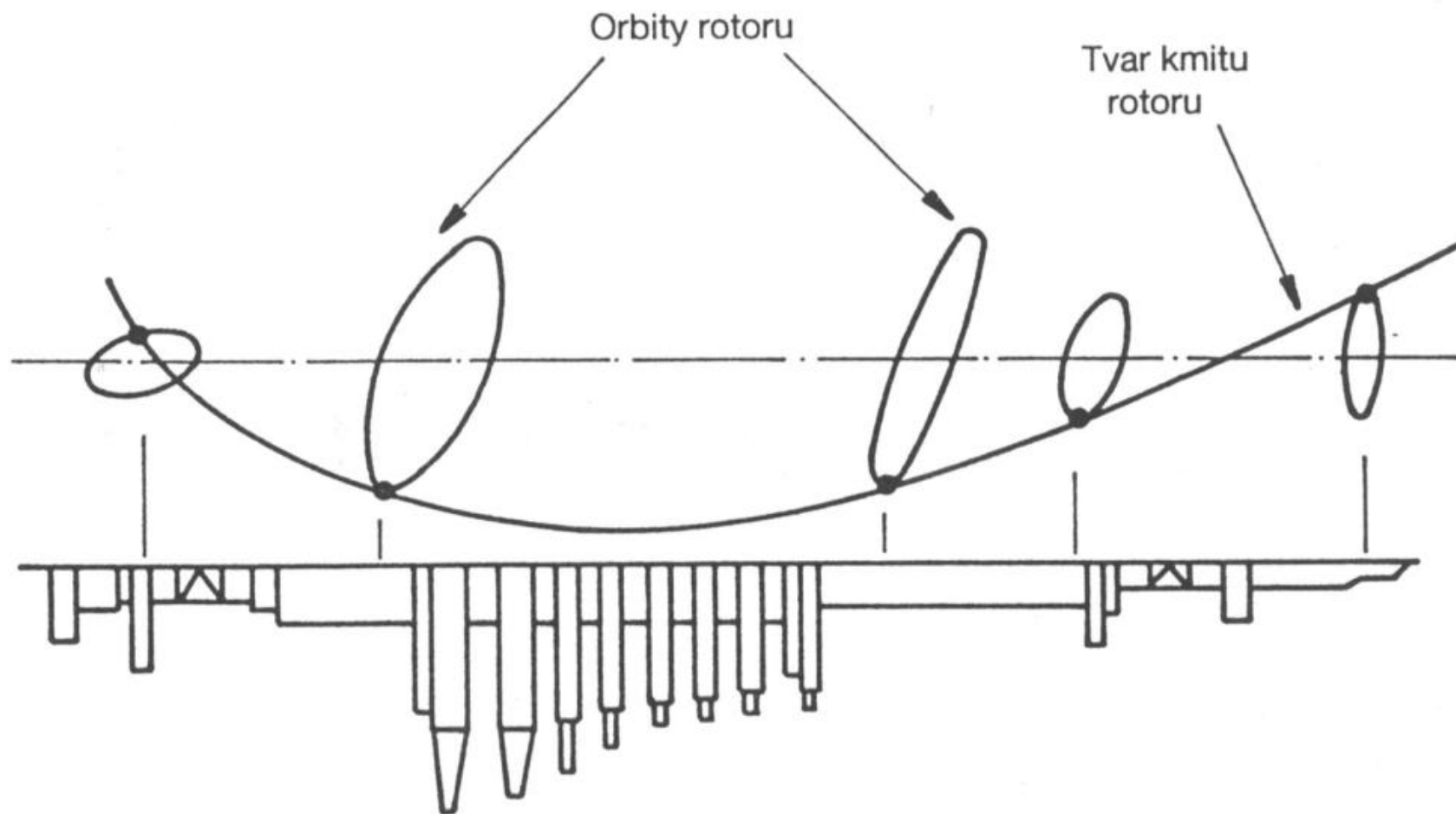


Uplatnění:

Zastaralé, ale stále je možno najít ve velmi starých provozech (energetika apod.)

Orbitální analýza



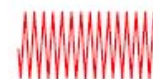
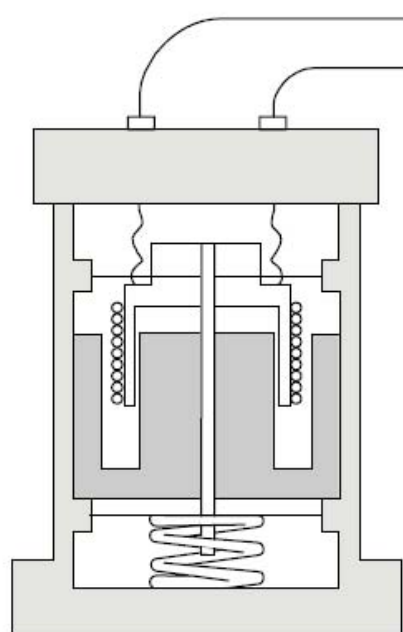
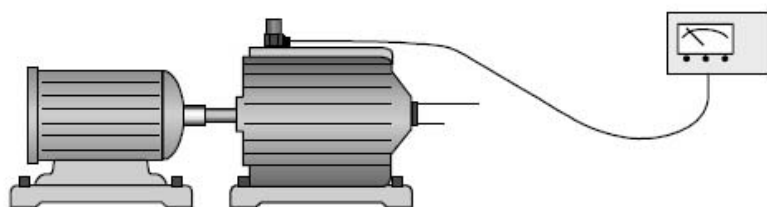


Bezdotyková sonda, její výstup je přímo úměrný relativní výchylce vibrací mezi rotujícími a nerotujícími díly stroje. Dochází ke snímání relativní výchylky stroje, tudíž ke snímání vzdálenosti mezi dvěma díly stroje, většinou rotoru a skříni stroje. Většina bezdotykových snímačů pracuje na principu vířivých proudů. V cívce, kterou prochází generovaný vysokofrekvenční střídavý proud, generuje vysokofrekvenční magnetické pole. Je-li v tomto magnetickém poli vložen elektricky vodivý materiál (hřídel rotoru), jsou v materiálu generovány vířivé proudy, které jsou nadále snímány.

Bezdotyková sonda



Indukční snímač rychlosti (pohyblivé tělísko)



$$e = Blv$$

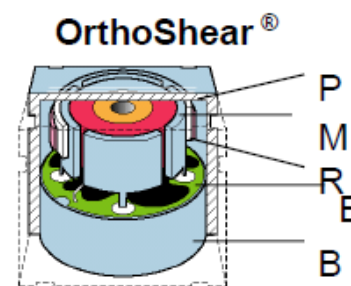
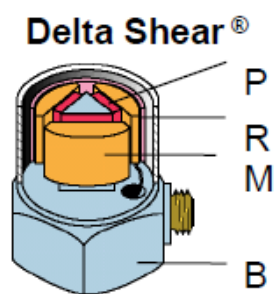
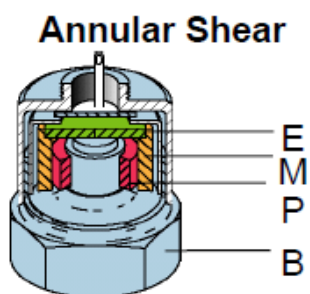
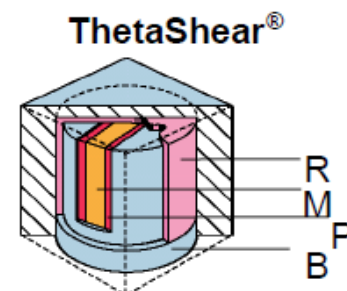
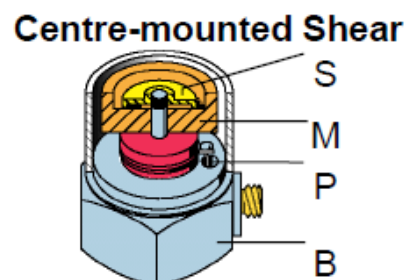
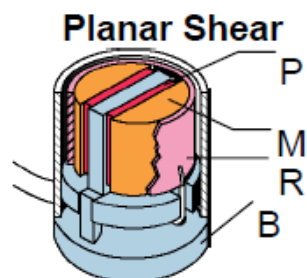
Omezení
frekvenčního
rozsahu:
 $10 < f < 1000 \text{ Hz}$

Snímač rychlosti vibrací, jeho výstup lze integrovat na výchylku vibrací. Snímač rychlosti je také seismické zařízení, které generuje napěťový signál úměrný mechanické vibrační rychlosti tělesa. Snímač rychlosti se skládá z cívky, ve které se díky pohybujícímu magnetu indukuje elektrické napětí.

Nejběžnějšími snímači vibrací jsou akcelerometry, měřenou veličinou je zrychlení, které se dle potřeby může početně převést na rychlost nebo výchylku vibrací. V případě akcelerometru se jedná o seismické zařízení, které vyhodnocuje absolutní vibrace měřeného zařízení. Velkého rozšíření dosáhly akcelerometry díky své jednoduché konstrukci a nižší ceně.

Dle směru působící síly rozeznáváme dva druhy akcelerometrů, tlakový a smykový.

Typy akcelerometrů



P: Piezoelektrický člen

E: Zabudovaná elektr.

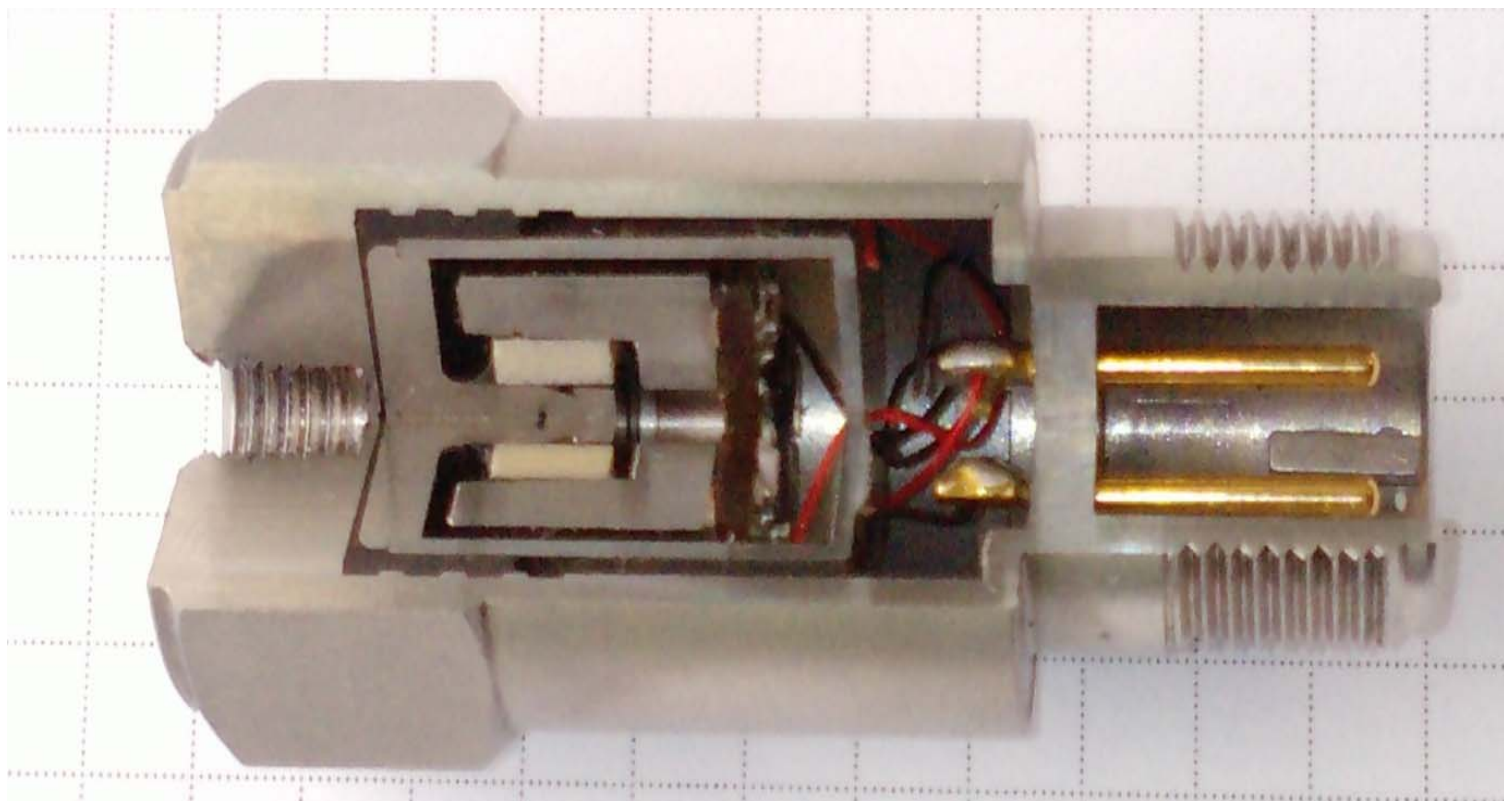
S: Pružina

R: Připevňovací kroužek

B: Základna

Metoda připevnění	Vliv na výkonnost snímače (např. snímače s rezonancí 30 kHz)
Pevný šroubový spoj	Žádné snížení rezonanční frekvence akcelerometru v důsledku připevnění
Izolovaný šroubový spoj	Pokud je pro zabránění vzniku zemních smyček a jiných vlivů použit tuhý nevodivý materiál, jako je podložka ze slídy, montážní rezonanční frekvence je mírně snížena asi na 28 kHz.
Přilepení tuhým lepidlem	Rezonance je snížena asi na 28 kHz
Přilepení měkkým epoxidem	Rezonance je snížena asi na 8 kHz
Připevnění permanentním magnetem	Rezonance je snížena asi na 7 kHz Pozn.: neodymové magnety
Ruční sonda se snímačem	Rezonance je snížena asi na 2 kHz, ale tato metoda není doporučena pro měření nad 1kHz.

Smykový akcelerometr





Příklady praktického využití akcelerometrů:

Měření vibrací – především v technické diagnostice pro identifikaci technického stavu strojních zařízení.

Automobilový průmysl – aktivace airbagů, systémy jízdní stability.

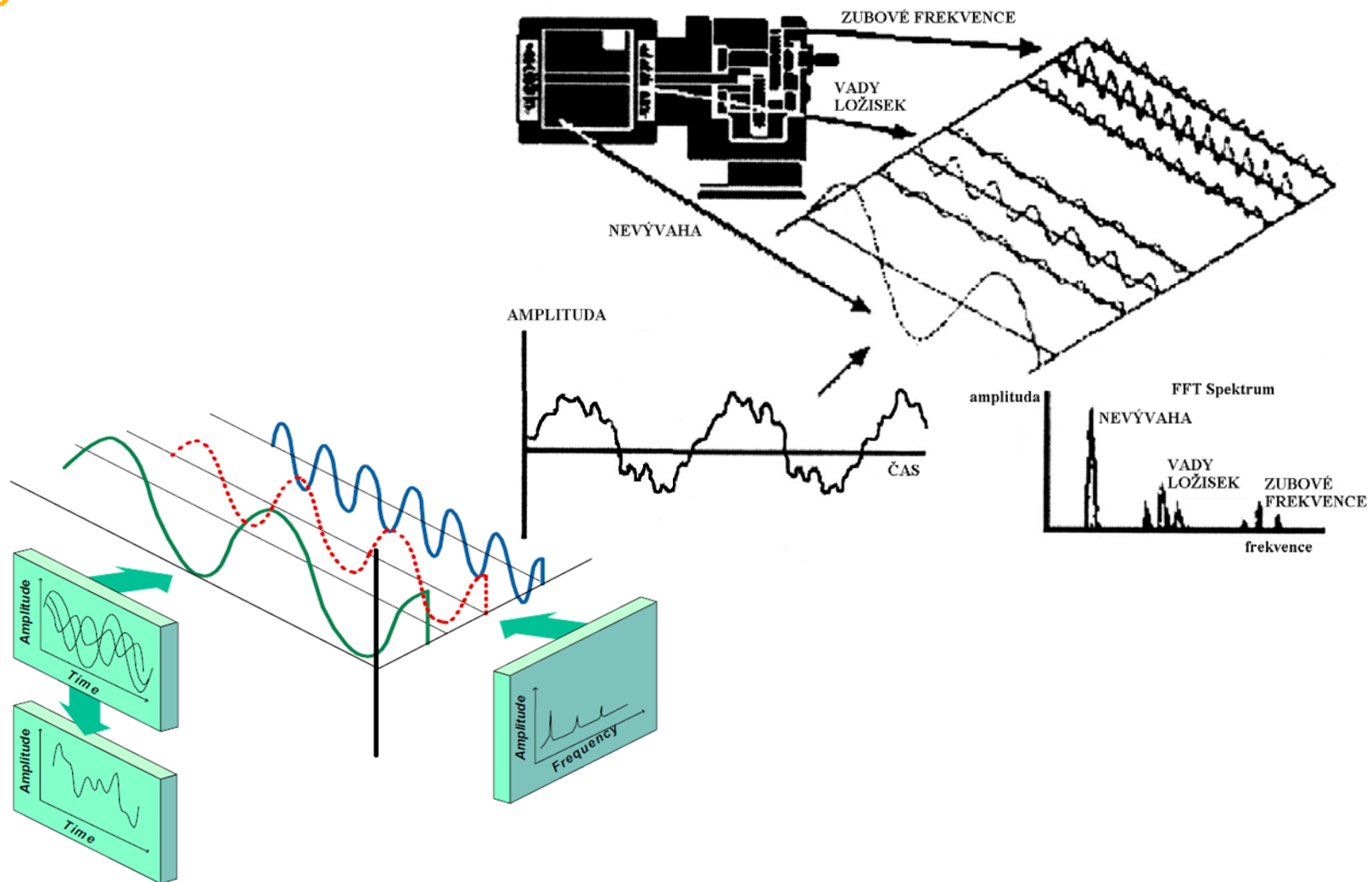
Měření a detekce seismické aktivity.

Měření zrychlení (akcelerace), pohybu a rychlosti.

Měření odstředivé síly.

Měření náklonu apod.

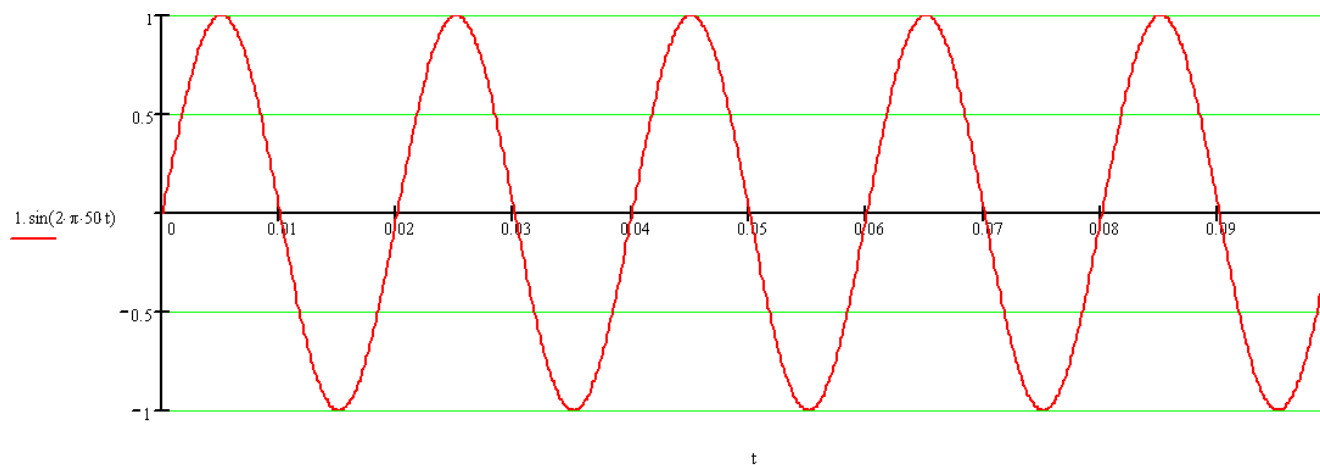
Skládání signálů



Otáčky elektromotoru $n_1 = 3000$ ot/min

Frekvence otáčení $f = ?$ 50 Hz

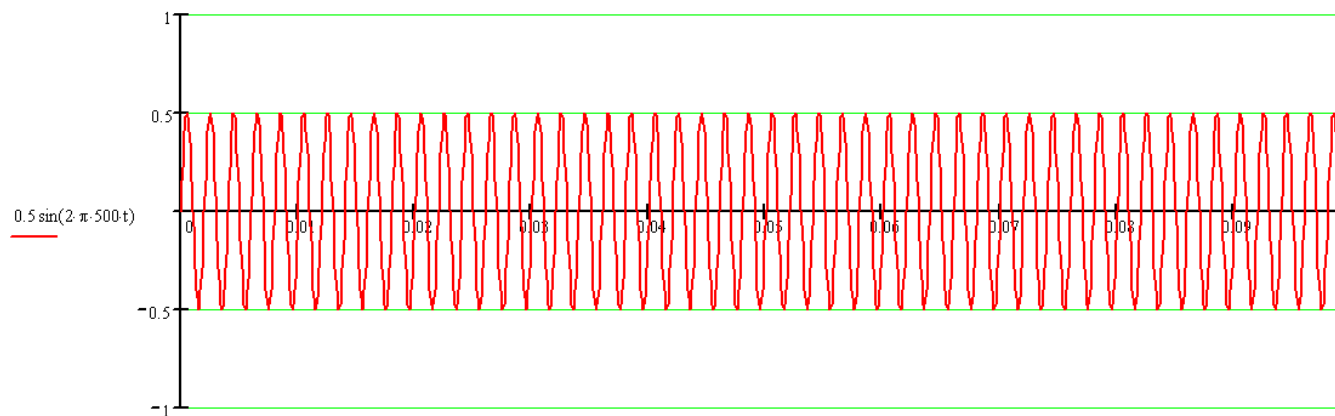
Projev nevyváženosti ve frekvenčním spektru $f=50$ Hz.



Jednostupňová převodovka: $n_1=3000$ ot/min, $z_1=10$,
 $z_2=30$ z_1, z_2 počet zubů pastorku, kola $i = ?$ 3

Nesprávná montáž a základní únavové poškození zubů se ve spektrech projevuje na otáčkové
frekvenci zubové $f_{z12} = z_1 \cdot f_{R1} = z_2 \cdot f_{R2} = ?$ 500 Hz

f_{R1}, f_{R2} rotorová frekvence pastorku, kola



Výsledný složený signál

$$1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50t)$$

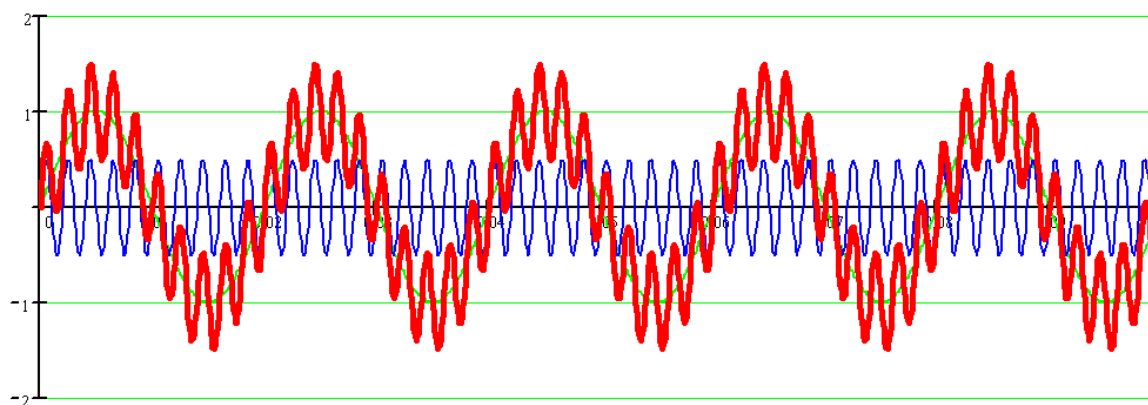
Elektromotor

$$0.5 \sin(2 \cdot \pi \cdot 500t)$$

Převodovka

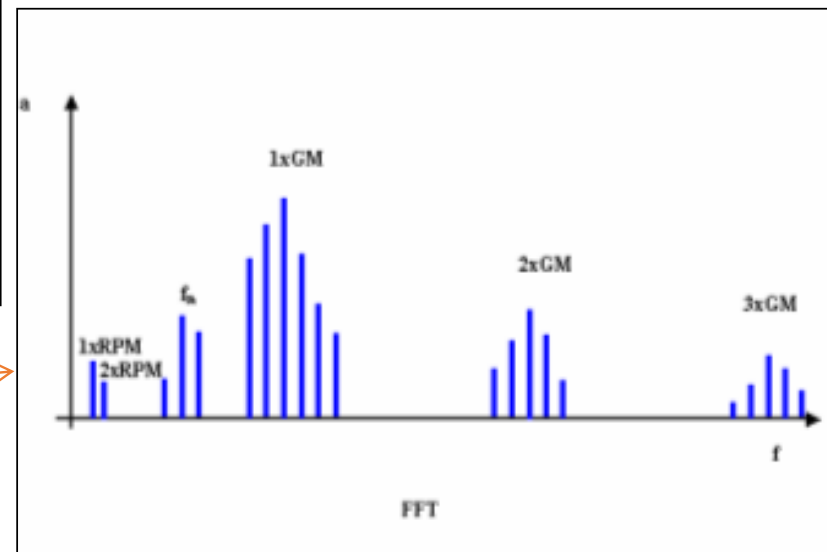
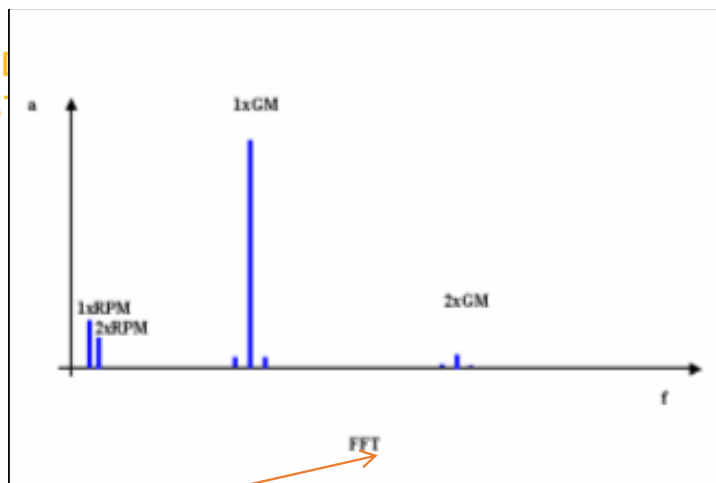
$$1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50t) + 0.5 \sin(2 \cdot \pi \cdot 500t)$$

Složený signál

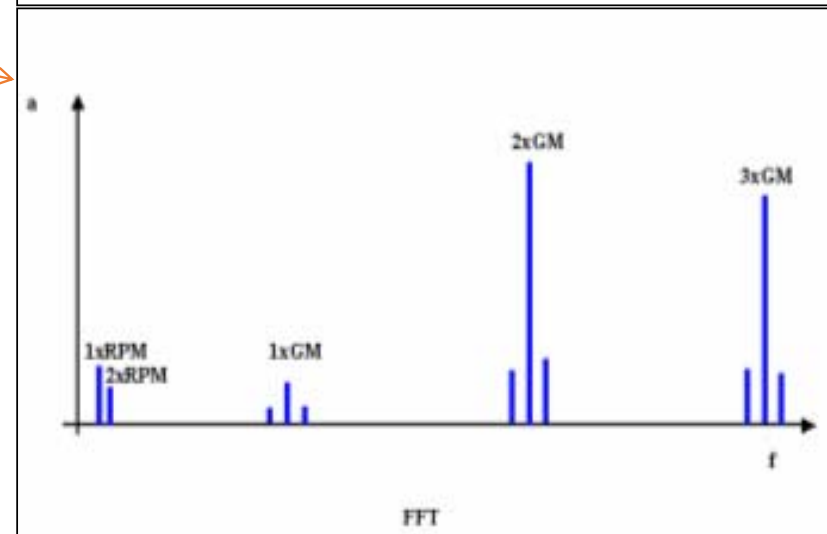
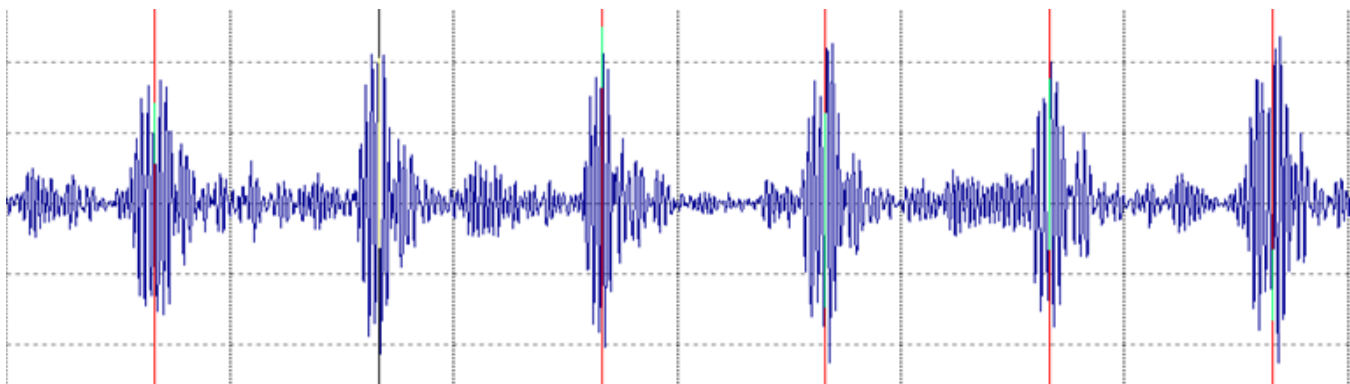


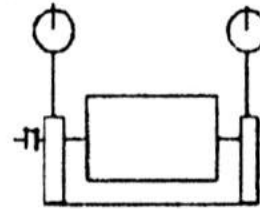
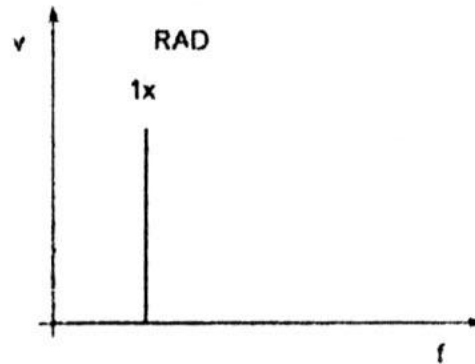
Problémy převodovek:

- Zatížení ozubených kol
- Opotřebení / excentricita zubů
- Nesouosost ozubených kol



Příklad ulomeného zubu (rázy za 1x RPM)



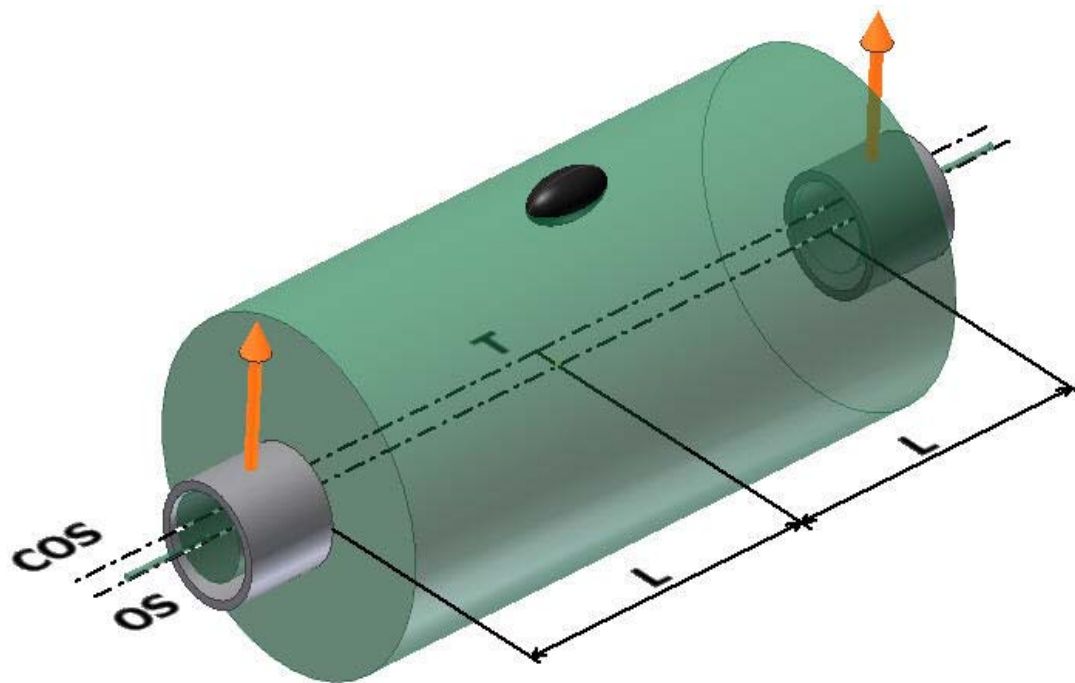


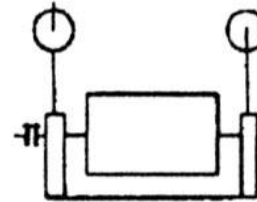
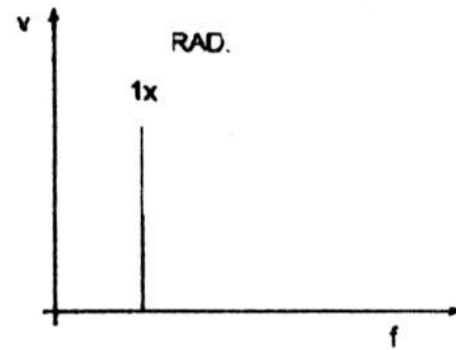
Statická nevyváženost - působí zde pouze jedna síla, která je ve stejné fázi v obou podporách. Amplituda, která je důsledkem nevyváhy se zvětšuje s kvadrátem otáček (3x větší otáčky – 9x větší vibrace).

Pozn.: automobil projíždějící zatáčkou:
$$F_o = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

První harmonická složka otáček je vždy přítomna a obvykle dominuje ve spektru.

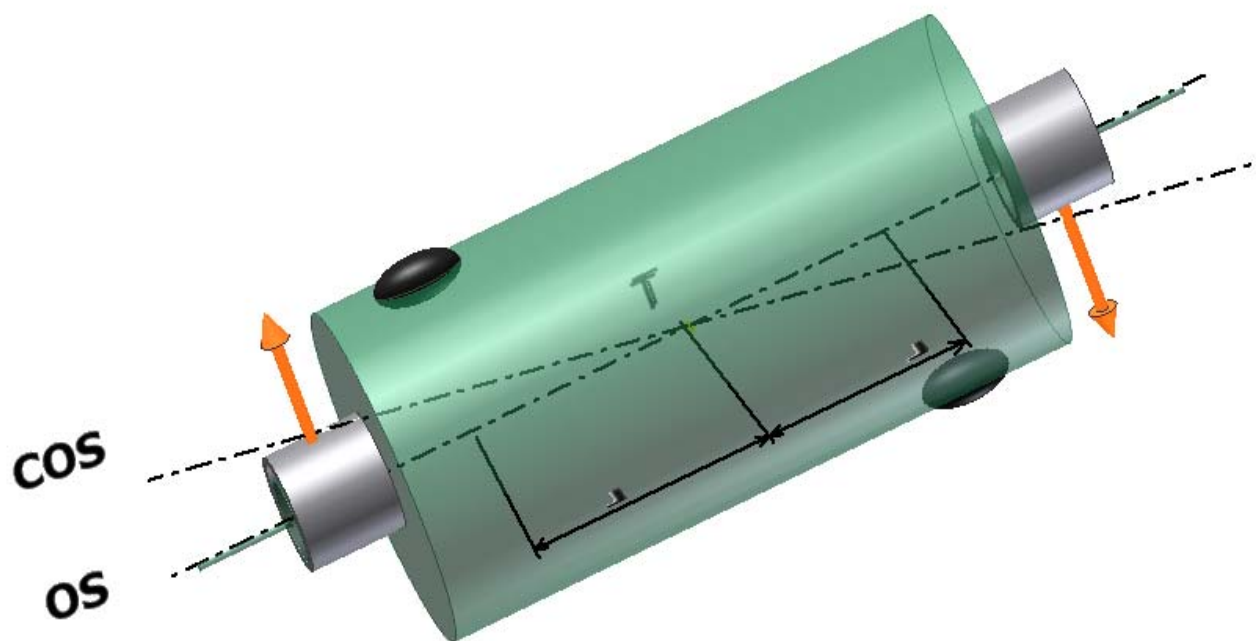
Statická nevyváženost

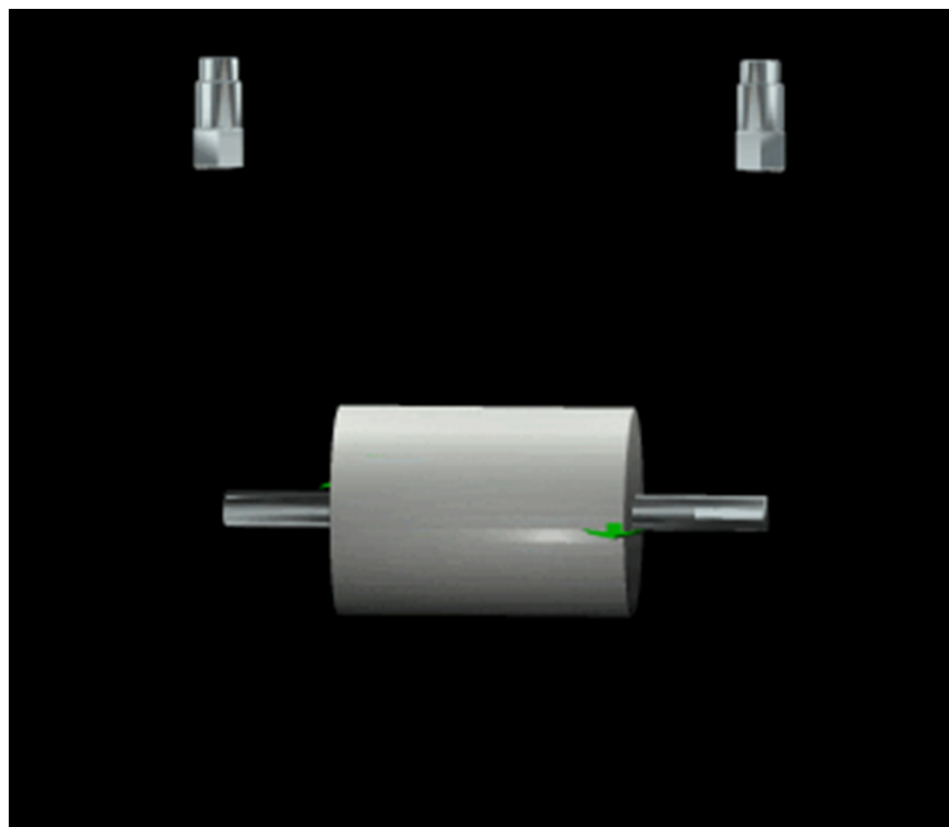




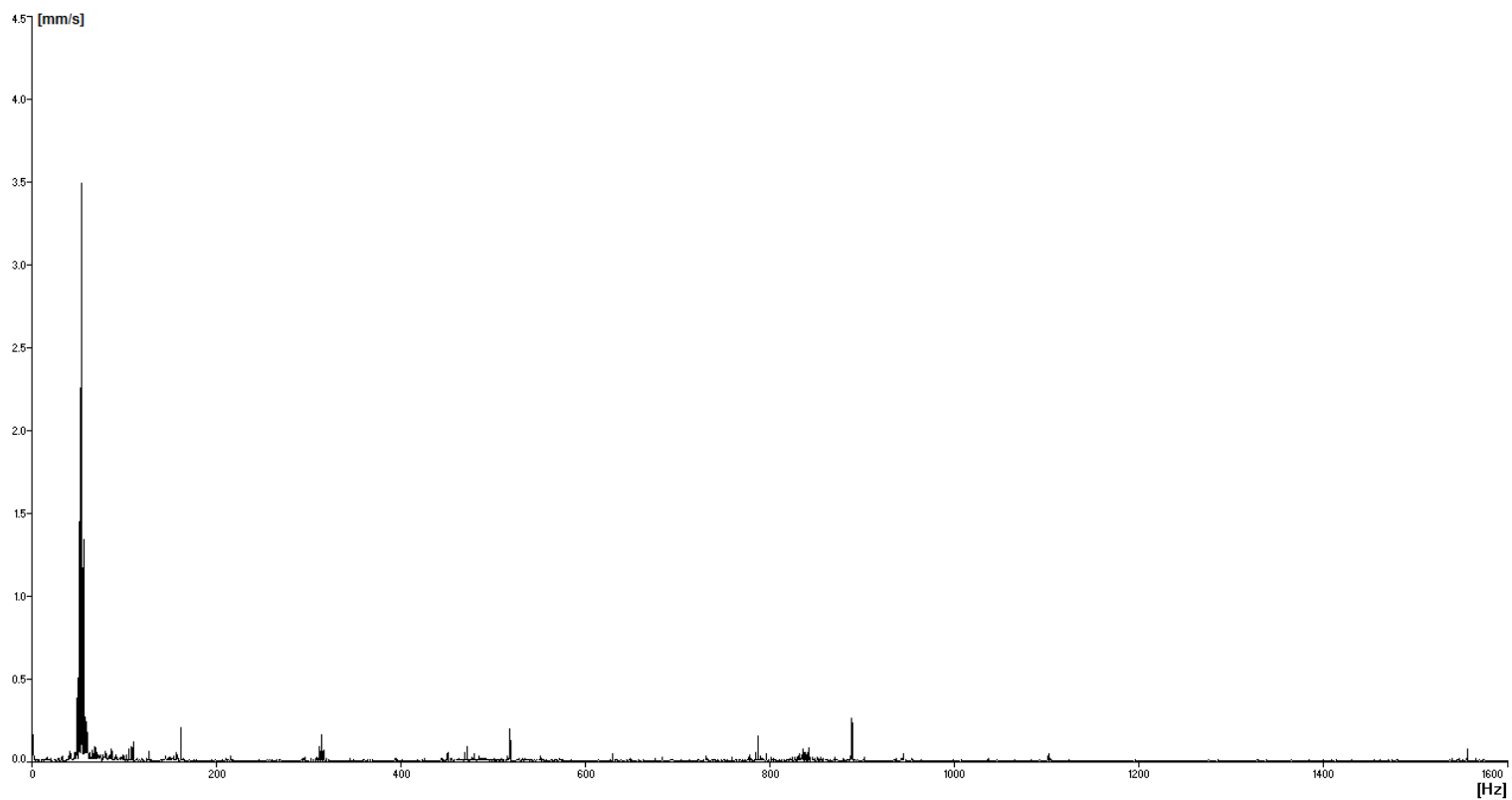
Momentová nevyváženost - působí zde dvě stejné síly, které jsou vzájemně posunuty o 180° , na stejném hřídeli jsou v uložení vzájemně v protifázi. První harmonická je vždy přítomna a obvykle dominuje ve spektru. Amplituda se mění s kvadrátem otáček. Může způsobit velké radiální a axiální vibrace. V klidové poloze se rotor může jevit jako vyvážený, ovšem při provozu rotor vibruje (hází).

Momentová nevyváženost

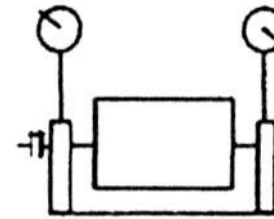
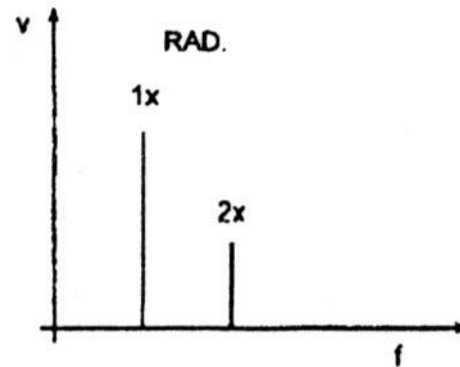




Příklad frekvenčního spektra s nevývahou statickou nebo momentovou



Dynamická nevyváženost

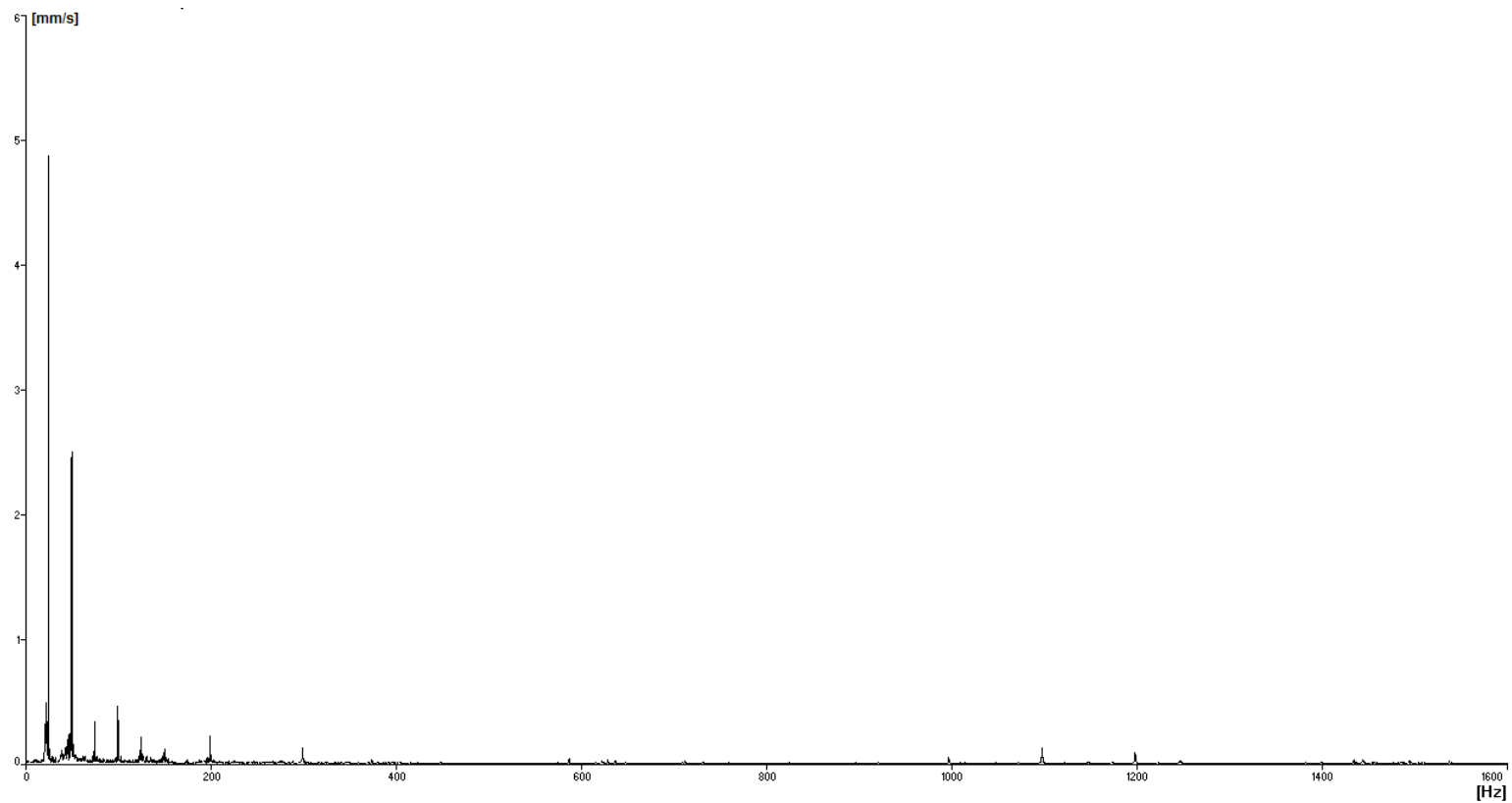


Dynamická nevyváženost - centrální osa setrvačnosti a osa rotoru jsou mimoběžné. Dominuje amplituda otáčkové frekvence rotoru. Fázový rozdíl je obecný. Velká nevyváženost může způsobit nelinearitu a výskyt amplitudy s 2x frekvencí otáčkovou. Ve většině případů se v praxi setkáváme s dynamickou nevyvážeností, tedy kombinací statické a momentové. Při vyvažování stroje se nejdříve vyvažuje statická nevyváženost a pak se odstraňuje momentová (provádí se v několika rovinách).

Dynamická nevyváženost



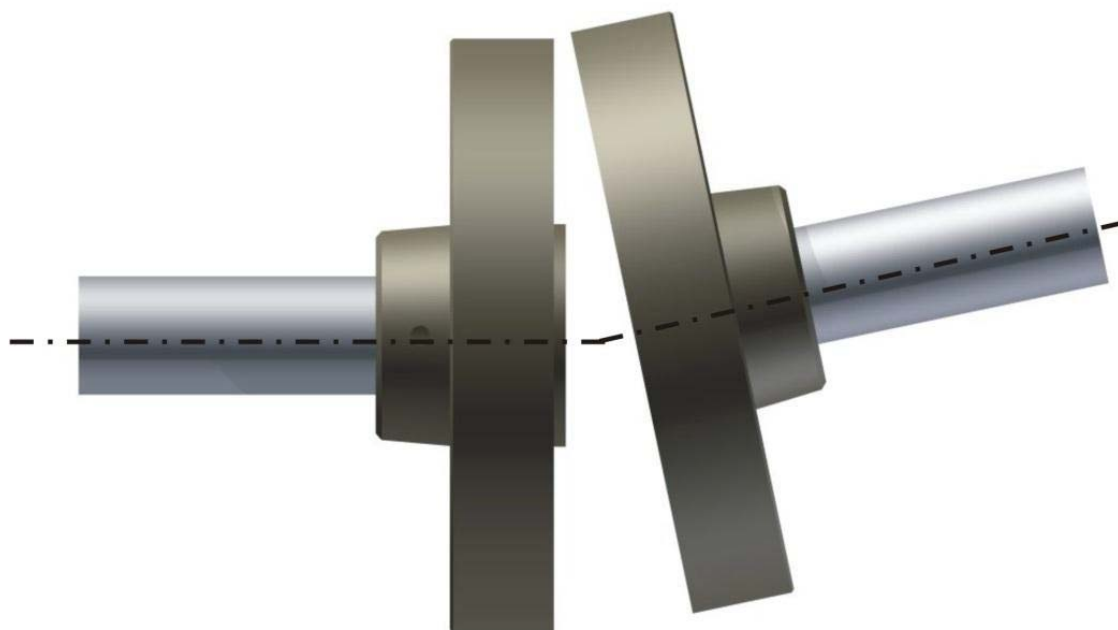
Frekvenční spektrum dynamické nevyváženosti



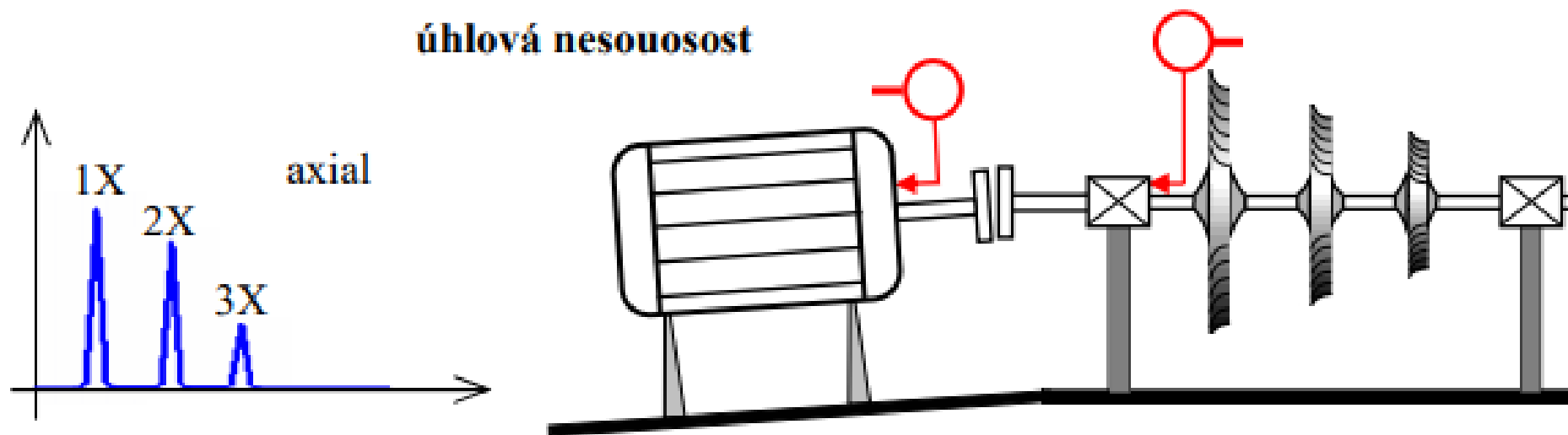
Příklad vyvažování



Úhlová nesouosost

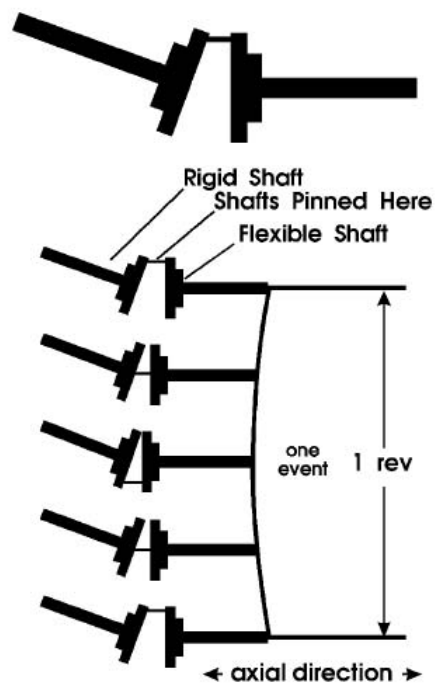


Úhlová nesouosost

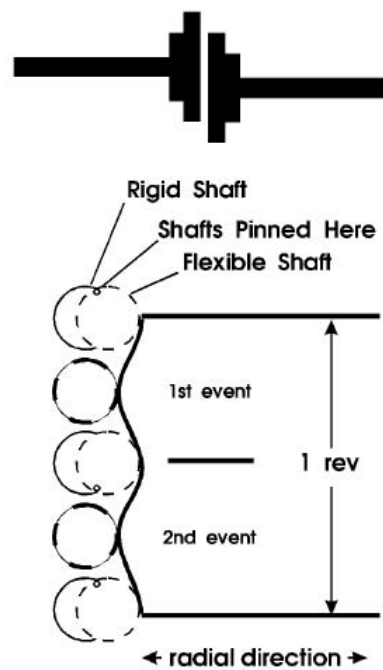


Úhlová nesouosost je charakterizovaná velkými axiálními vibracemi. Přes spojku se mění fáze o 180° . v typickém případě jsou velké axiální vibrace s 1. a 2. harm. složkou otáček, avšak není obvyklé, že dominuje 1x, 2x nebo 3x otáčková frekvence. Tyto symptomy mohou indikovat i současnou existenci problémů se spojkou. Výrazná úhlová nesouosost může budít mnoho harmonických násobků frekvence otáčení.

Úhlová nesouosost

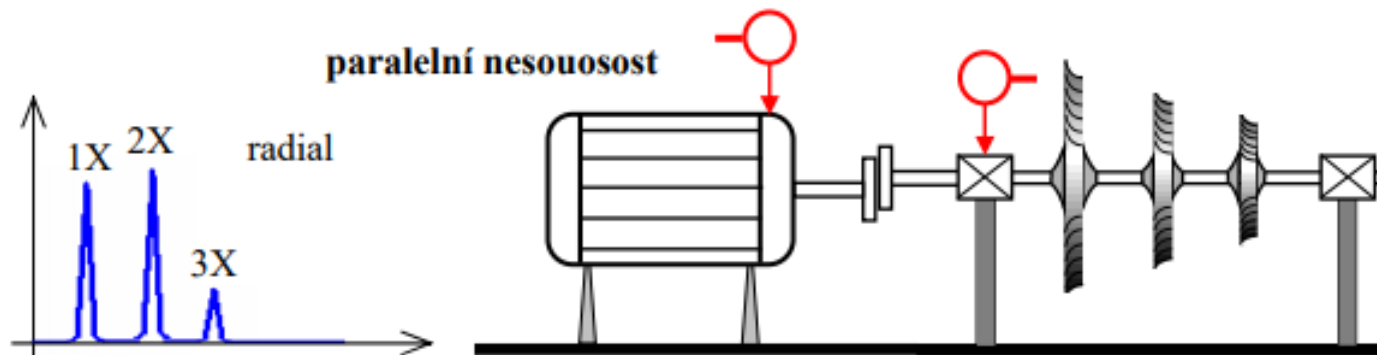


Paralelní nesouosost - posunutí



Paralelní nesouosost





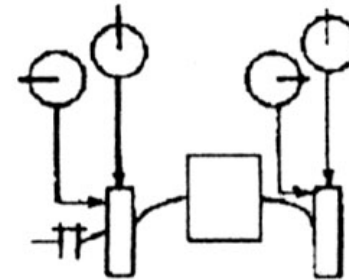
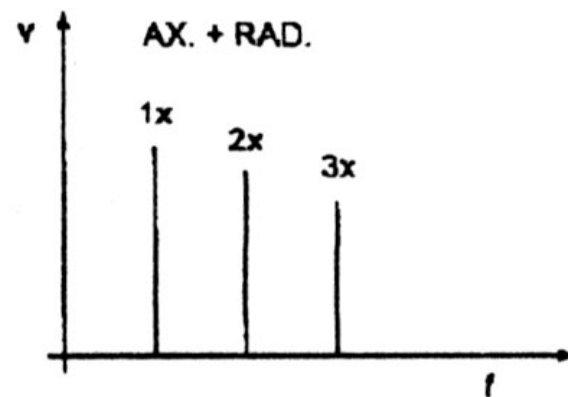
Rovnoběžná nesouosost má velké radiální vibrace u spojky v protifázi, Složka 2x je často větší než 1x, ale její velikost relativně vůči 1x je často určena typem a konstrukcí spojky. Když je úhlová nebo paralelní nesouosost výrazná, může generovat buď velké amplitudové špičky na řadě harmonických násobků (4X-8X) nebo i celou řadu harmonických násobků do vysoké frekvence, což je podobné výskytu mechanického uvolnění.

Standardní projev úhlové nesouososti v axiálním směru s vyznačením otáčkové složky ve frekvenčním spektru



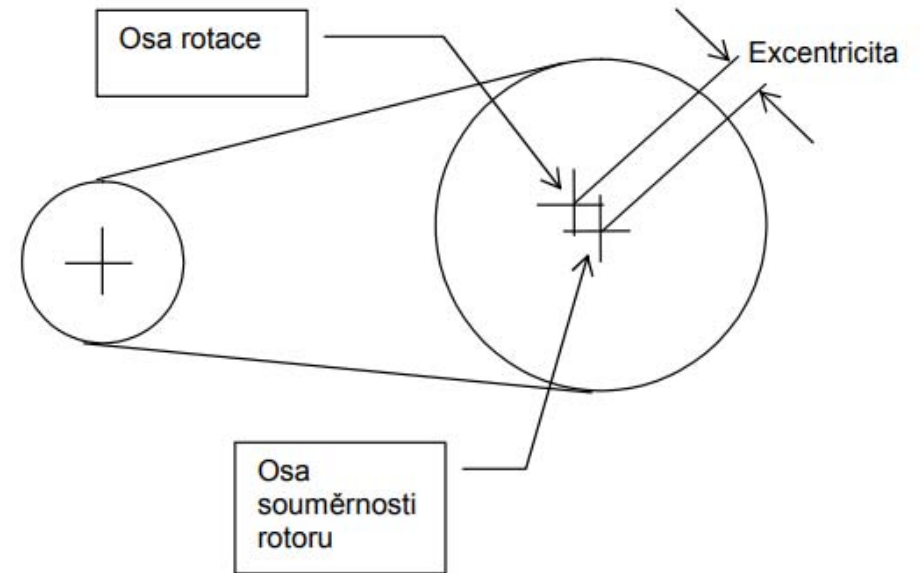
Ustavování čerpadla





Ohnutý hřídel - podobné s nesouosostí. Hodnota amplitudy pro 2x může činit 30% až 100-200% amplitudy základní otáčkové frekvence,

- hodnoty fáze v radiálním směru (vertikálně a horizontálně) jsou obvykle „ve fázi“,
- hodnota fáze v axiálním směru (podélném) je obvykle o 180° posunutá a je nutno uvažovat o toleranci měření fáze $\pm 30\%$. Lze tedy uvést následující stručný závěr. Dochází k velkým axiálním vibracím v protifázi (180°). Dominantní je také radiální amplituda otáčkové frekvence ve fázi. Objevují se amplitudy s 2x i (3x) násobkem otáčkové frekvence a to v axiálním i radiálním směru.

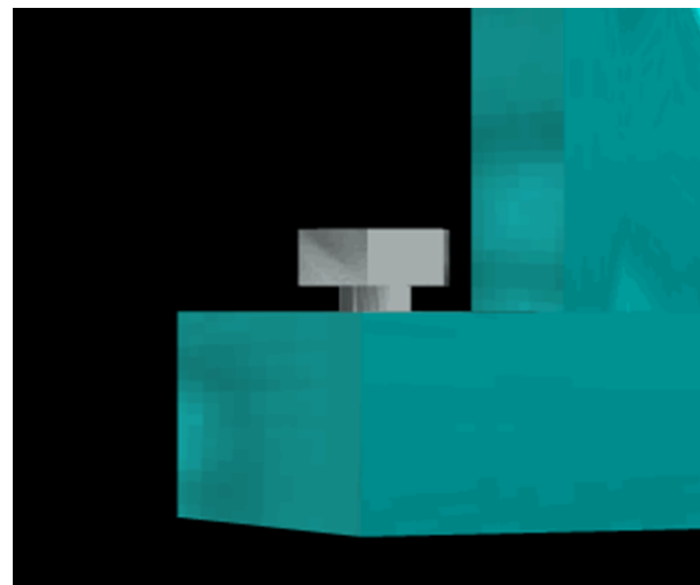
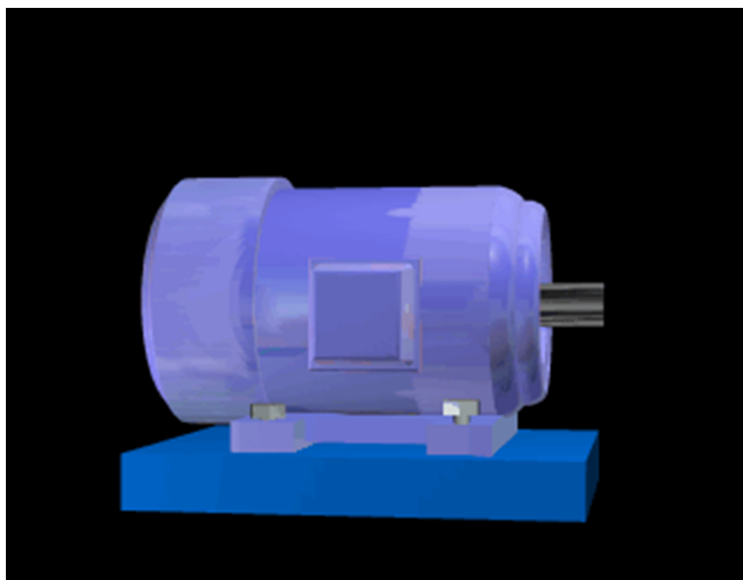


Excentrický rotor

Dominantní je amplituda s otáčkovou frekvencí v horizontálním a vertikálním směru a fáze je shodná nebo posunutá o 180° (v protifázi). Pokusy vyvážit excentrický rotor často vedou ke zmenšení vibrací v jednom směru, ale také zvětšení vibrací v druhém (radiálním) směru.

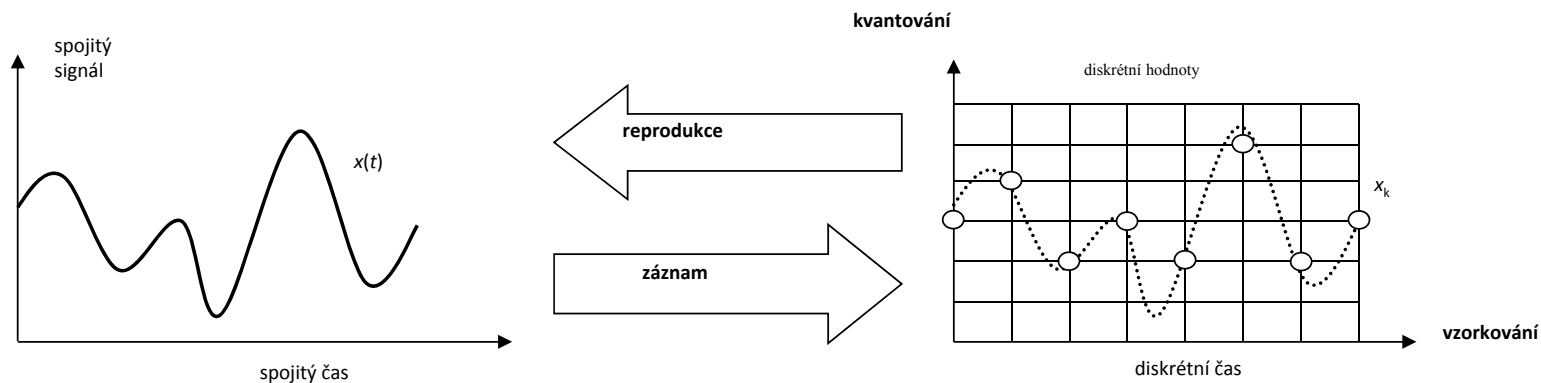
Mechanické uvolnění

Obecně se projevuje jako dlouhý sled neobvykle vysokých amplitud vyšších harmonických složek ($2x$; $3x$; $4x$), otáčkové frekvence subharmonických složek ($2/3x$; $1/2x$;...) a interharmonických složek ($1,5x$; $2,5x$). Velikost těchto amplitud by měla být vyšší než 20% hodnoty základní otáčkové frekvence.



Vzorkování, kvantování spojitého signálu

Převod analogového signálu na digitální zajišťuje A/D převodník (Analog to Digital Converter - ADC). Zpětný převod digitálního signálu na analogový zajišťuje D/A převodník (DAC).



Mezi jejich důležité vlastnosti patří vstupní rozsah, nejčastěji vstupní elektrické napětí, dále množství bitů a vzorkovací frekvence. Počet bitů určuje přesnost převodníku.

Př.: $\text{počet hodnot na výstupu} = 2^{\text{počet bitů}}$

Pro 8 bitový převodník bude výsledný počet hodnot:

$$2^8 = 256$$

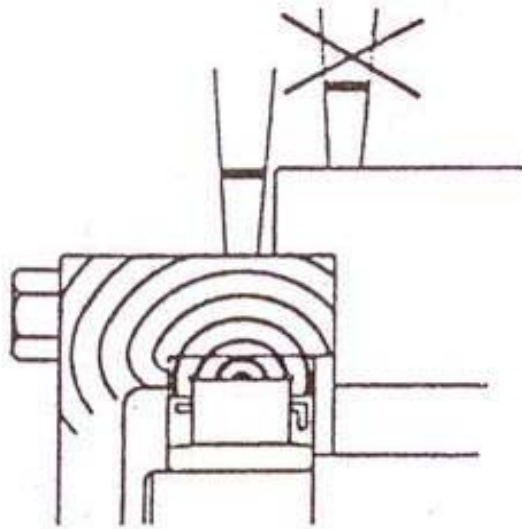
Pro rozsah vstupního napětí 0÷10V bude velikost jednoho kvantovacího dílku:

$$\frac{10}{256} = 0,0390625 \text{ V}$$

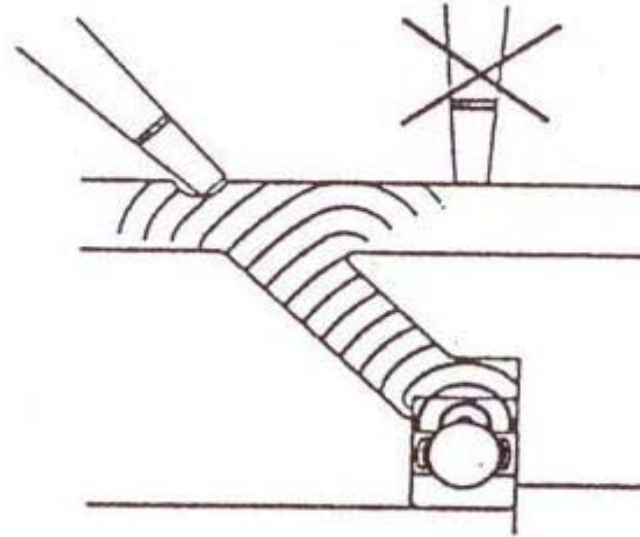
Umístění snímačů

Při umísťování snímače musíme dbát na vhodnou volbu měřicího místa, aby výsledky měření byly reprezentativní a vyjadřovaly co nejlépe skutečnou amplitudu vibrací, aby byla měřena co nej

S
n
h
o
p
u
v
p
M
n
M

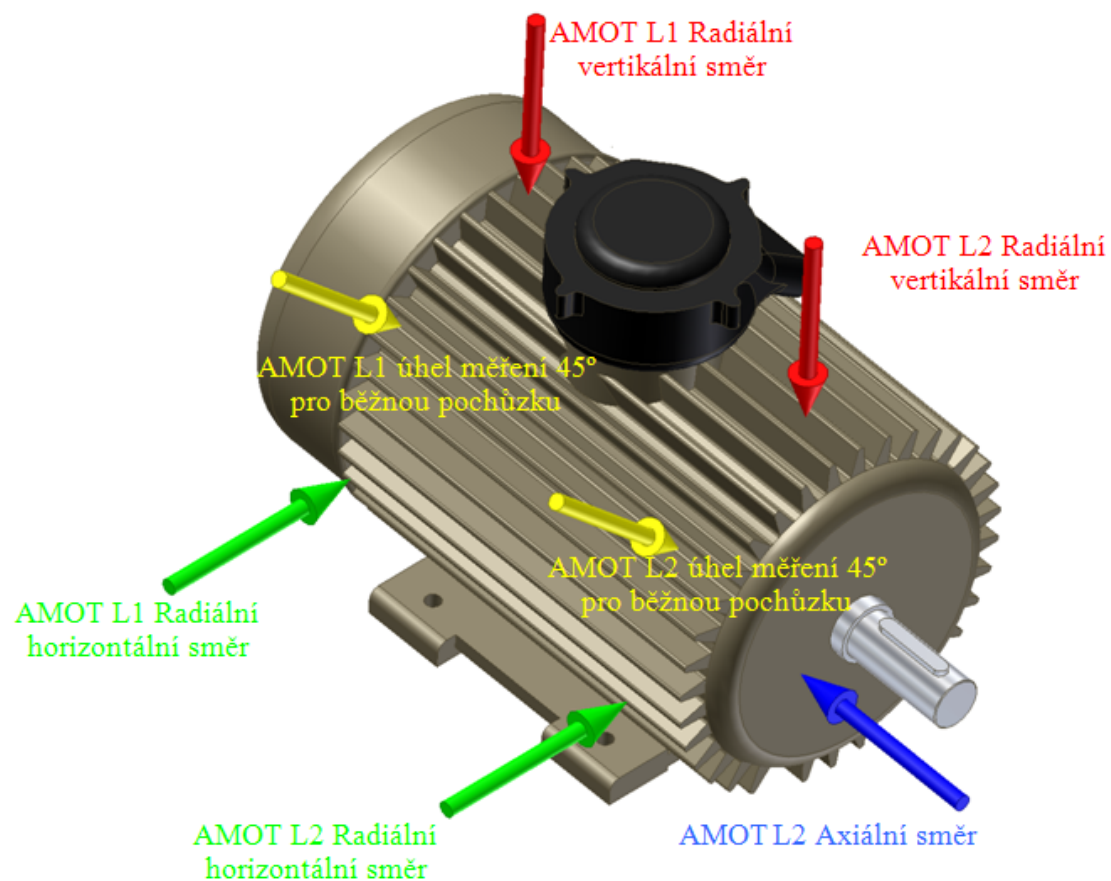


ěné,
nísta
lním
je to
dajněj
álním
hnutý
materiá
yklecl
ložné
du s

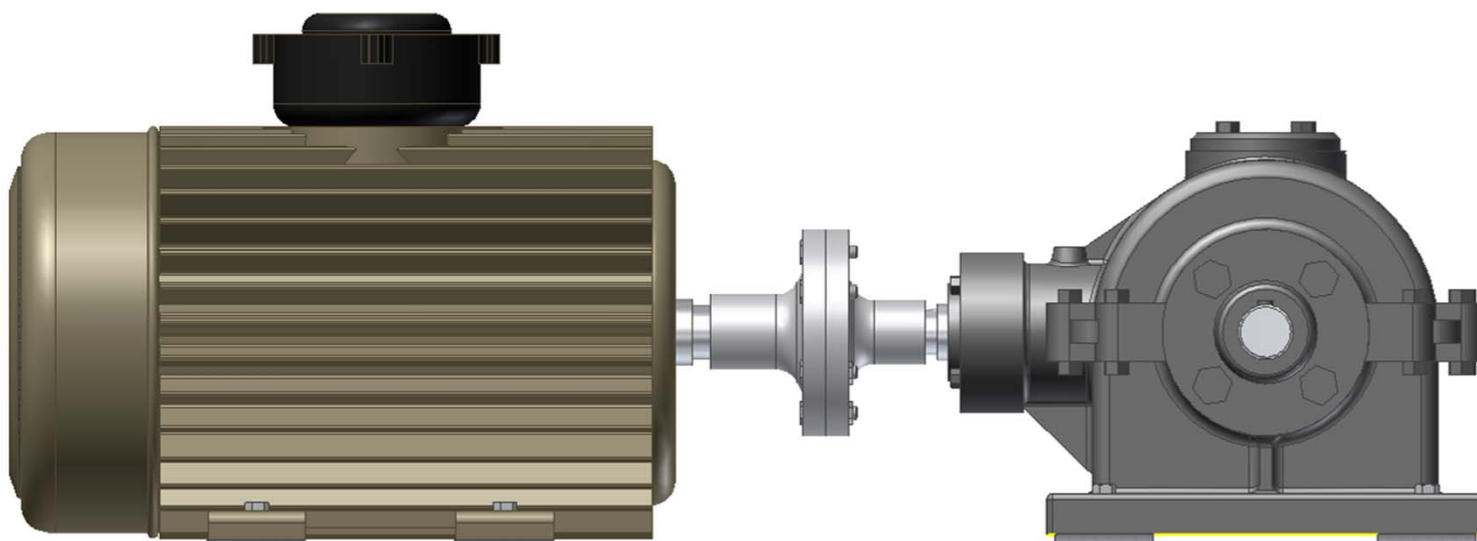


ustálených provozních teplot a při jmenovitých hodnotách (např. zatížení, napětí, otáčkách, tlaku, atd.).

Příklad měřících míst a směrů



Sestava pro umístění snímače



V praxi se setkáváme se spoustou problémů, co se týče konstrukce, umístění, zakrytování, přístupu k měřicím místům, bezpečnosti práce atd. viz. obr. Na fotografiích lze vidět jedny z mnoha komplikací doprovázejících proces měření.



Příklad špatného konstrukčního řešení, možnost měřit pouze pod úhlem 45°.



Celkový pohled na zařízení.



Problematický přístup - zakrytován celý motor.



Jednospěrný drtič V10 – problematický přístup.

Děkuji za pozornost

Ing. Jan Blata, Ph.D.

+420 605 317 606

+420 597 324 580

jan.blata@vsb.cz

www.vsb.cz