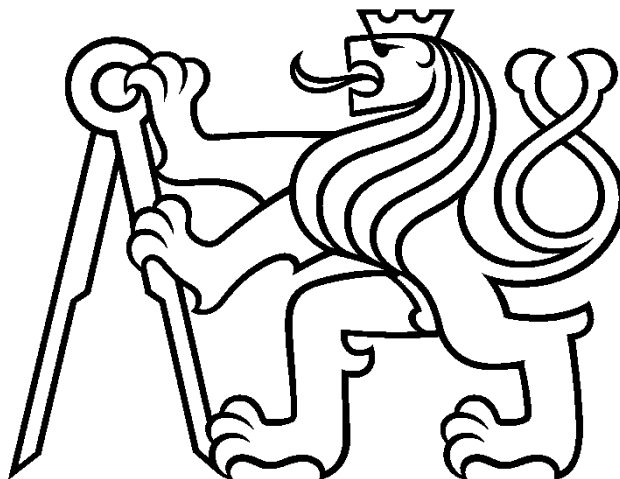


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**METODY PRO MĚŘENÍ KMITÁNÍ PŘI OBRÁBĚNÍ**

**METHODS FOR MEASURING OF VIBRATIONS IN MACHINING**

Praha 2020

Lukáš Bartoška

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bartoška** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **473457**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Metody pro měření kmitání při obrábění**

Název bakalářské práce anglicky:

**Methods for measuring of vibrations in machining**

Pokyny pro vypracování:

1. Přehled metod pro měření kmitání při obrábění.
2. Porovnání metod.
3. Zhodnocení těchto metod.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Ing. Jan Mádl, CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
prof. Ing. Jan Mádl, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

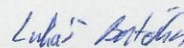
  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

23.6.2020  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Metody pro měření kmitání při obrábění“ vypracoval samostatně s využitím odborné literatury a pramenů uvedených v příloženém seznamu využitých zdrojů.

V Praze dne: 30. 7. 2020

.....  
*Luboš Bostořan*

Podpis autora

## **Abstrakt**

V této práci je přiblížena problematika kmitání při obrábění způsobeného budící silou. Vysvětleny jsou dopady tohoto kmitání na proces obrábění a možnosti jeho odstranění. Dále se práce zabývá možnostmi měření kmitání a jeho následném vyhodnocení.

## **Klíčová slova**

kmitání, vynucené kmitání, samobuzené kmitání, výchylka, rychlost, zrychlení, snímač, akcelerometr

## **Summary**

This work deals with the problem of vibrations during machining caused by the excitation force. The effects of this vibration during the machining process and the possibilities of its removal are explained. Furthermore, the work deals with the possibilities of measuring vibrations and its subsequent evaluation.

## **Keywords**

vibrations, forced vibrations, self-excited vibrations, deflection, speed, acceleration, sensor, accelerometer

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, panu prof. Ing. Janovi Mádlovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Pavlovi Švecovi z firmy Kistler Eastern Europe s. r. o. za poskytnutí odborných materiálů a rad k problematice měření kmitání.

# Obsah

1	Úvod .....	- 9 -
2	Kmitání při obrábění.....	- 10 -
2.1	Vynucené kmitání .....	- 11 -
2.1.1	Způsoby odstranění vynuceného kmitání .....	- 12 -
2.2	Samobuzené kmitání .....	- 14 -
2.2.1	Způsoby odstranění samobuzeného kmitání .....	- 16 -
2.3	Principy stanovení vlivu podmínek na kmitání.....	- 18 -
2.3.1	Posouzení pomocí amplitudy .....	- 18 -
2.3.2	Srovnání s mezní hodnotou .....	- 19 -
2.4	Vliv kmitání na jakost obrobku.....	- 20 -
3	Harmonický kmitavý pohyb .....	- 21 -
3.1	Veličiny popisující kmitavý pohyb .....	- 21 -
4	Měření kmitání .....	- 22 -
4.1	Měření mechanického kmitání v časové oblasti .....	- 22 -
4.1.1	Výchylka.....	- 22 -
4.1.2	Rychlost.....	- 23 -
4.1.3	Zrychlení.....	- 24 -
4.2	Frekvenční analýza.....	- 25 -
4.2.1	Fourierova transformace.....	- 26 -
4.3	Měřicí řetězec.....	- 28 -
4.4	Snímače kmitání.....	- 30 -
4.4.1	Absolutní snímače kmitání .....	- 30 -
4.4.2	Relativní snímače kmitání .....	- 31 -
4.4.3	Snímače výchylky, polohy a posuvu .....	- 32 -
4.4.4	Snímače rychlosti .....	- 35 -

4.4.5	Snímače zrychlení (Akcelerometry).....	- 36 -
4.4.6	Montáž snímačů chvění.....	- 42 -
4.4.7	Přenosná zařízení.....	- 43 -
4.4.8	Budiče kmitání.....	- 43 -
4.4.9	Tlumiče kmitání.....	- 44 -
4.4.10	Cejchování snímačů.....	- 44 -
4.5	Moderní metody a přístroje.....	- 45 -
4.5.1	Akustická emise.....	- 45 -
4.5.2	Laserové interferometrické vibrometry.....	- 46 -
5	Porovnání a zhodnocení metod a snímačů.....	- 47 -
6	Závěr.....	- 49 -
7	Použité zdroje.....	- 51 -

## Seznam veličin a jednotek

f	[Hz]	frekvence (kmitočety)
n	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky
z	[-]	počet zubů nástroje
m; M	[kg]	hmotnost
F; G	[N]	síla
μ	[-]	koeficient tření
t	[s]	čas
T	[s]	perioda
φ	[°; rad]	fáze
v	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost
a	[m·s <sup>-2</sup> ]	zrychlení
ω	[rad·s <sup>-1</sup> ]	úhlová frekvence (úhlový kmitočety)
S <sub>e</sub>	[mV/m·s <sup>-2</sup> ; mV/g]*	napěťová citlivost
S <sub>q</sub>	[pC/m·s <sup>-2</sup> ; pC/g]*	nábojová citlivost
u	[V]	indikované napětí
B	[T]	indukce magnetického pole
l	[m]	délka
κ <sub>r</sub>	[°]	úhel nastavení
ε <sub>r</sub>	[°]	poloměr špičky
δ	[°]	úhel řezu
α	[°]	úhel hřbetu

\* 1 mV/m·s<sup>-2</sup> ≈ 9,81 mV/g; 1 pC/m·s<sup>-2</sup> ≈ 9,81 pC/g



# 1 Úvod

Do procesu obrábění vstupují v různých okamžicích faktory, které ho ať už pozitivně nebo negativně ovlivňují. Jedním z těchto faktorů je i kmitání. Měření, záznam a analýza mechanického kmitání jsou tak důležitou součástí diagnostiky procesu obrábění. Je snaha tyto kmity co nejvíce eliminovat.

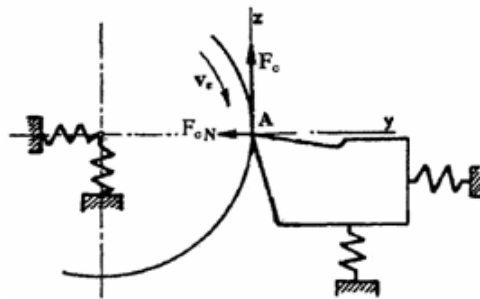
Cílem této bakalářské práce je bližší seznámení s druhy tohoto kmitání, popis faktorů, které mají na kmitání vliv, a také popis možných způsobů jeho alespoň částečné eliminace. V další části by práce měla obsahovat popis frekvenční analýzy, charakteristiku veličin, které kmitání popisují a vyvodit z nich vycházející metody pro měření kmitání při obrábění, včetně jeho vyhodnocení. V procesu měření bude speciální pozornost věnována snímačům kmitání, které jsou prvním členem měřícího řetězce a určují vlastnosti a způsob daného měření.

Na závěr by měly být tyto metody a snímače porovnány a zhodnoceny.

## 2 Kmitání při obrábění

Kmitání je jeden z mnoha parametrů, které ovlivňují proces obrábění. Jedná se o mechanický kmitavý pohyb charakteristický tím, že se dané těleso neustále vrací při pohybu do určité rovnovážné polohy. Mechanické kmity jsou spojené s dynamickým namáháním stroje a technickým stavem jeho jednotlivých komponent a mechanismů. [1]

Obráběcí stroj, nástroj a obrobek tvoří obráběcí systém se složitými dynamickými charakteristikami. Kmitání jednotlivých prvků obráběcího systému představuje průvodní jev řezného procesu. Na Obrázku 1 je znázorněn naznačen zjednodušený dynamický model obráběcího systému, který charakterizuje stav při ortogonálním řezání. [2]



Obrázek 1 - Dynamický model soustružení [2]

Bod A se nachází v místě dotyku obráběcího nástroje a obrobku. V důsledku proměnlivosti řezných sil tento bod kmitá ve směru osy  $y$  a ve směru osy  $z$  s určitými frekvencemi a amplitudami. [2]

Vznik mechanických kmitů při obrábění úzce souvisí s tuhostí systému stroj – nástroj – obrobek. I při relativně stabilním obrábění dochází při kolísání řezné síly k neustálému vytváření silových impulsů. Tyto impulsy následně způsobí vznik tlumených kmitů. [1]

Za určitých okolností může být tento průběh porušen působením budící síly. Podle charakteru této budící síly se rozlišuje kmitání při obrábění na *Vynucené* a *Samobuzené*.

Při obrábění je důležité kmitání co nejvíce omezit. Úplné odstranění v praxi není možné. Existuje však řada možností a postupů, které vedou alespoň k částečné stabilizaci procesu obrábění. [1]

## 2.1 Vynucené kmitání

Vynucené kmitání je kmitání, způsobené periodicky, s časem proměnnými silami, které jsou vyvolány (buzeny) vnějšími činiteli, nepatřícími do soustavy stroj – nástroj – obrobek. [1]

Vynucené kmitání lze rozdělit podle typu budící síly na *Kmitání vynucené silou související s řezným procesem* a *Kmitání vynucené silou nesouvisející s řezným procesem*. [1]

### **Kmitání vynucené silou související s řezným procesem**

Tento druh kmitání může být způsoben chvěním přes základy stroje (například vibracemi od sousedních strojů); nevyvážeností rotujících částí obráběcího stroje, rotačního nástroje nebo obrobku (v periodicky měnícím se směru vzniká odstředivá síla); přímočarým vratným pohybem některých součástí obráběcího stroje; nebo důsledkem nepřesnosti výroby a montáže převodových mechanismů obráběcího stroje (typicky nepřesná výroba ozubení). [1] [3] [4]

K intenzivnímu rozkmitání dojde, pokud se frekvence kmitání budící síly přiblíží k některé z vlastních frekvencí kmitání soustavy. [1]

Kmitání vynucené silou nesouvisející s řezným procesem má největší vliv při procesech dokončování, kdy může výrazným způsobem ovlivnit drsnost obrobene plochy. [1]

### **Kmitání vynucené silou nesouvisející s řezným procesem**

Tento druh kmitání může být způsoben například nerovnoměrným přídatkem u rotujících obrobků, což způsobuje nesouosost osy otáčení s osou obrobku. Dalším příkladem může být frézování čelními nebo válcovými frézami, při kterém se periodicky přerušuje nebo mění řezný odpor. [1] [3]

Frekvence tohoto kmitání je popsána základním vztahem:

$$f = \frac{n}{60} [Hz] \quad (2.1) [1]$$

Kde  $f$  je frekvence kmitání;  $n$  jsou otáčky obrobku v  $\text{min}^{-1}$ .

Při frézování zejména vícebřitými frézami s přímými zuby mohou vznikat kmity vyvolané periodickým záběrem každého zubu do materiálu obrobku (změna okamžitého průřezu třísky na každém zubu). [1]

Frekvence tohoto kmitání je dána vztahem:

$$f = \frac{n \cdot z}{60} [Hz] \quad (2.2) [1]$$

Kde  $z$  je počet zubů nástroje.

K intenzivnímu rozkmitání dojde, pokud se frekvence kmitání budící síly přiblíží k některé z vlastních frekvencí kmitání soustavy. [1]

Kmitání vynucené silou související s řezným procesem má největší vliv na pevnost článků soustavy. [1]

### 2.1.1 Způsoby odstranění vynuceného kmitání

V případě kmitání vynuceného silou nesouvisející s řezným procesem spočívá jeho eliminace ve snaze o odstranění této budící síly. [1]

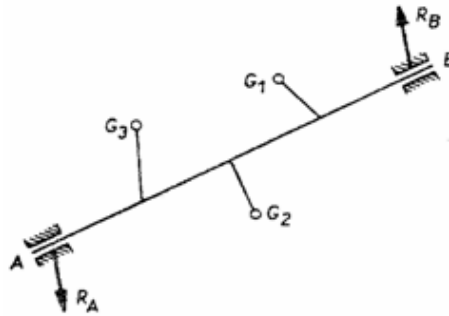
V případě chvění přes základy stroje, lze při nemožnosti odstranění budící síly provést uložení stroje na pružném základu, čímž se vliv budící síly odstraní. [1]

U nevyvážených rotačních součástí nebývá budící síla zpravidla vysoká na tolik, aby bylo nutné ji při obrábění eliminovat. Pokud je však přeci jen potřeba tuto sílu eliminovat, máme na výběr hned několik možností. [1]

Můžeme provést *Vyvážení rotačních součástí*. To může být buď statické nebo dynamické. [2]

Statické vyvažování je možno použít za předpokladu, že se na rotujícím hřídeli nachází pouze jedna součástka. Poté se vyvažuje pomocí různých vyvažovacích přípravků. [2]

Pokud je na hřídeli připevněno více součástí, je třeba vyvažovat dynamicky. To provádí tak, že se na přesně stanovené pozice na hřídeli přidávají pomocné hmoty přesně stanovených rozměrů a hmotnosti. Při dynamickém vyvažování se odstraní vliv reakcí  $R_A$  a  $R_B$ , které vznikají odstředivou silou a působí na ložiska. Pomocné hmoty mají vytvořit odstředivé síly, jejichž účinek by byl stejný jako účinek reakcí  $R_A$  a  $R_B$ , avšak opačného smyslu. [2]



Obrázek 2 - Schéma dynamického vyvažování [2]

Další možností je *Obrábění mimo rezonanční oblast*, což se provádí změnou otáček a docílí se tak jiné frekvence budící síly. [2]

Je možno také použít *Tlumiče kmitání*, které jsou popsány v kapitole 4.4.9. [1]

## 2.2 Samobuzené kmitání

Samobuzené kmitání je při procesu obrábění mnohem více nebezpečné než kmitání vynucené. První impulz, který dává podnět ke vzniku samobuzeného kmitání nebyl dodnes přesně vysvětlen, díky čemuž, a zároveň díky složitosti celé této problematiky nejsme schopni stanovit správné řezné podmínky vylučující vznik tohoto kmitání. Často se vyskytuje zcela neočekávaně. [1] [3]

I přesto existují určité skutečnosti, umožňující alespoň samobuzené kmitání v případě jeho vzniku zmírnit.

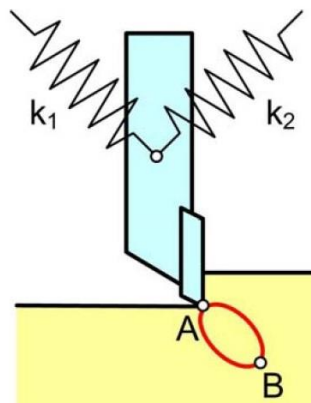
Mechanismy vzniku samobuzeného kmitání jsou tyto: [1]

- *relativní pohyb nástroje vůči obrobku je zdrojem budící síly*
- *koeficient tření se mění s rychlostí pohybu*
- *nestabilita nárůstku*
- *skluz materiálu na hranici primární plastické deformace*

Tyto mechanismy jsou blíže popsány níže.

### Relativní pohyb nástroje vůči obrobku je zdrojem budící síly

Nazývá se také jako princip polohové vazby. Mezi nástrojem a obrobkem je nutná existence dvou dominantních, vzájemně kolmých tvarů kmitů různých frekvencí. Při obrábění dochází k neustálému nahodilému kolísání řezné síly, což má za následek vychylování břitu nástroje vůči obrobku. Díky periodické řezné síle pak dojde k současnému rozkmitání systému v obou směrech tvarů stejnou frekvencí a konstantní vzájemnou fází, díky čemuž se břit pohybuje po eliptické dráze. Pro první část pohybu je použita určitá velikost řezné síly. Po vykonání pohybu se bude nástroj snažit vrátit do původní polohy. Při tomto pohybu však bude odebírat menší tloušťku odřezávané vrstvy, tudíž se řezná síla zmenší a dojde ke zvětšení amplitudy kmitu. Řezný proces se tak stane nestabilním. [1] [5]

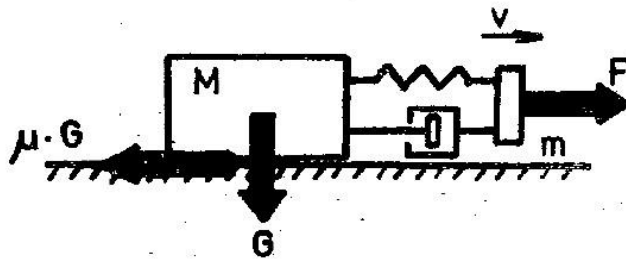


Obrázek 3 - Princip polohové vazby [5]

## Koeficient tření se mění s rychlostí pohybu

Tyto kmity vznikají buď při tření vodících ploch suportu a lože nebo přímo při samotném řezání důsledkem změn koeficientu tření stykových ploch řezného nástroje a obrobku. Koeficient tření závisí na mechanických a chemických vlastnostech materiálu obrobku i nástroje, na řezném prostředí a řezných podmínkách. [1]

Princip vzniku kmitavého pohybu je znázorněn na Obrázku 4.



Obrázek 4 - Vliv koeficientu tření a rychlosti pohybu [1]

Tažné těleso  $m$  a těleso  $M$  jsou spojeny pomocí pružiny a tlumiče. Na těleso  $M$  působí třecí síla ( $G \cdot \mu$ ) (kde  $G$  je gravitační síla a  $\mu$  je koeficient tření). Tažné těleso  $m$  se začne pohybovat v daném směru konstantní rychlostí  $v$ , čímž dojde ke zvětšování tažné síly  $F$ . Překročí-li velikost síly  $F$  velikost síly ( $G \cdot \mu_0$ ), těleso  $M$  se dá do pohybu. Při pohybu bude koeficient tření  $\mu$  menší než koeficient tření v klidové poloze  $\mu_0$ , a tak dojde k přitažení tělesa  $M$  k tažnému tělesu  $m$  (zmenší se jejich vzdálenost). Velikost tažné síly poklesne a těleso  $M$  tak zpomalí nebo úplně zastaví. Celý proces se pak následně opakuje.

Vzniká nám tedy samobuzené kmitání, kde přítomnost tlumení nemá požadovaný účinek, ale naopak je samo příčinou kmitání. [1]

## Nestabilita nárůstků

Pokud je nárůstek (plasticky zdeformované částice obráběného materiálu) nestabilní, probíhá jeho tvorba a rozpad s určitou frekvencí. K rozkmitání může dojít v případě, kdy se frekvence tvorby a rozpadu nárůstku přiblíží k některé z vlastních frekvencí kmitání soustavy stroj – nástroj – obrobek. [1]

Takto vzniklé kmitání však díky relativně malé amplitudě není pro proces obrábění tolik nebezpečné, jako kmitání vzniklé pomocí předchozích dvou popsaných mechanismů. [1]

## **Skluz materiálu na hranici primární plastické deformace**

Vznik elementů třísky je také celkem pravidelným dějem. Stejně jako při rozpadu nárůstku může k rozkmitání dojít v případě, že se frekvence kluzu na hranici oblasti primární plastické deformace přiblíží k některé z vlastních frekvencí kmitání soustavy stroj – nástroj – obrobek. A stejně tak platí i to, že takto vzniklé kmitání není pro proces obrábění tolik nebezpečné, protože jeho intenzita je malá. [1]

### **2.2.1 Způsoby odstranění samobuzeného kmitání**

Vzhledem k obtížnosti určení zdroje vzniku samobuzeného kmitání je evidentní, že i jeho odstraňování bude složitější než v případě vynuceného kmitání.

Stabilita řezného procesu vychází především z tuhosti systému stroj-nástroj-obrobek, směru řezné síly, tření mezi pohybujícími se členy a tření stykových ploch bříty. Vliv jednotlivých parametrů na stabilitu řezného procesu se zjišťuje experimentálně. Sleduje se vliv pracovních parametrů na intenzitu kmitání. Nastaví se konkrétní parametr a měří se například amplituda kmitání. Poté se parametr upraví a amplituda se změří znovu. Porovnáním amplitud se poté zjistí, zda provedená úprava vedla ke stabilizaci, či nikoliv. [1]

Při posuzování samobuzeného kmitání pracujeme se dvěma oblastmi frekvencí kmitání. [1]

1. oblast vysokých frekvencí  
Pohybuje se v rozmezí 1500 – 8000 Hz a je znakem kmitání nástroje. Kmitání v této oblasti je méně nebezpečné, protože jeho odstranění snazší (například změna vyložení nástroje).
2. oblast nízkých frekvencí  
Pohybuje se v rozmezí 50 – 500 Hz a je znakem kmitání stroje, obrobku nebo jiného problému s nástrojem. Amplituda samobuzeného kmitání v oblasti nízkých frekvencí může dosáhnout značných velikostí a poškodit tak některý člen soustavy.

### **Tuhost systému stroj-nástroj-obrobek**

Čím větší je tuhost technologické soustavy, tím menší je pravděpodobnost vzniku chvění. Zvýšení tuhosti lze docílit například odstraněním vůlí mezi jednotlivými funkčními částmi stroje, jako jsou například pinola a koník, vřeteno a jeho ložiska a jiné. Další možností je použití nevyběhaných hrotů nebo lunety. Ne vždy jsme však schopni zvýšení tuhosti zajistit. [4]



## Geometrie nástroje

Velký vliv na intenzitu samobuzeného kmitání mají některé nástrojové úhly.

První možností, jak eliminovat či snížit intenzitu samobuzeného kmitání, je změna *Úhlu nastavení*  $\kappa_r$ , přesněji jeho zvětšení. Při zvětšování úhlu nastavení totiž dochází ke zmenšování radiální složky řezné síly, která působí ve směru malé tuhosti soustavy stroj – nástroj – obrobek a její zmenšení by tak mělo vyvolat stabilizační účinek. Navíc změna tohoto úhlu nemá velký vliv na trvanlivost nástroje. [1]

Samobuzené kmitání ovlivňuje i *Poloměr špičky*  $\varepsilon_r$ . Zmenšováním poloměru špičky můžeme dosáhnout stabilizačního účinku, protože je závislý na úhlu nastavení. Čím menší je poloměr špičky, tím větší je střední hodnota úhlu nastavení. Samotné zmenšení poloměru špičky však intenzitu samobuzeného kmitání neovlivní tolik jako úhel nastavení, navíc se zhorší odvod tepla ze špičky, čímž se sníží trvanlivost břitu nástroje. [1]

Dalším úhlem ovlivňujícím stabilitu řezného procesu je *Úhel řezu*  $\delta$ . Snížením velikosti úhlu řezu se docílí snížení radiální složky řezné síly, působící ve směru malé tuhosti soustavy stroj – nástroj – obrobek. Tento zásah však snižuje pevnost břitu. [1]

Vliv na intenzitu samobuzeného kmitání má i *Úhel hřbetu*  $\alpha$ . Při velikosti úhlu hřbetu do  $0,5^\circ$  způsobuje samobuzené kmitání klesající závislost koeficientu tření na řezné rychlosti. Při velikosti úhlu hřbetu do  $6^\circ$  se tento vliv snižuje a zároveň dochází ke zmenšování celkové řezné síly na hřbetu břitu. Úhel hřbetu vyšší než  $6^\circ$  nemá na samobuzené kmitání vliv. [1]

## Řezné podmínky

Na technologickou soustavu může mít destabilizující účinek *Řezná rychlost*  $v_c$  v případě, kdy je kmitání způsobeno vlivem klesající závislosti koeficientu tření právě na řezné rychlosti. [1] [4]

Díky klesající závislosti koeficientu tření na rychlosti pohybu může být samobuzené kmitání vyvoláno v oblasti malých *Posuvů* (tloušťky odřezávané vrstvy do 0,04 mm). [1] [4]

Zvyšování hloubky řezu také může vést ke vzniku samobuzeného kmitání. [1] [4]

## **Řezné prostředí**

Stabilita řezného procesu se dá zvýšit snížením tření. Toho se dá dosáhnout zvýšením mazacího účinku procesních kapalin nebo snížením drsnosti bříty řezného nástroje. [1] [3]

Stejně jako v případě vynuceného kmitání je i zde možnost použití *Tlumiče kmitání*, popsané v kapitole 4.4.9. [1]

## **2.3 Principy stanovení vlivu podmínek na kmitání**

V předchozích kapitolách byly shrnuty vlivy jednotlivých pracovních podmínek a parametrů na stabilitu řezného procesu. Pracovní podmínky lze všemožně kombinovat. Tyto kombinace poté můžeme dělit na *Soubor podmínek, kdy je obrábění nestabilní* a na *Soubor podmínek, kdy je obrábění stabilní*.

Posouzení vlivu podmínek na stabilitu řezného procesu může být *Kvantitativní* nebo *Kvalitativní*. Při samotném posuzování se pracuje vždy s jednou pracovní podmínkou, u které se zkoumá její stabilizační nebo destabilizační účinek. Z tohoto důvodu se obvykle studuje účinek kvalitativní, protože při kvantitativním zkoumání jsou jednotlivé pracovní podmínky velmi závislé na ostatních.

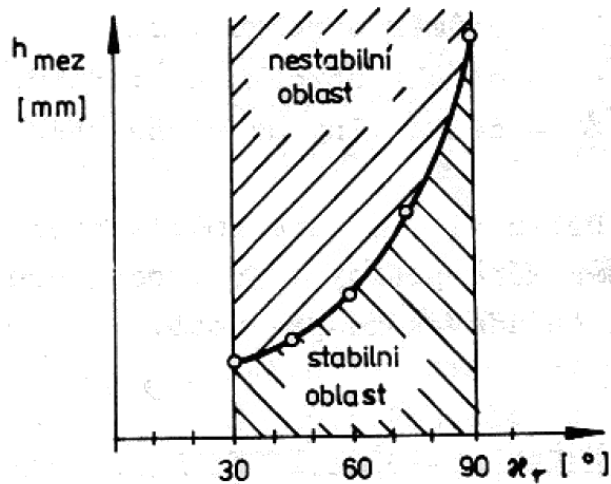
Kvalitativní vliv sledované veličiny může být posouzen pomocí *Amplitudy* nebo *Srovnáním s mezní hodnotou*. [1]

### **2.3.1 Posouzení pomocí amplitudy**

Při použití této metody se nejprve nastaví soubor podmínek tak, aby bylo obrábění nestabilní. Buď se při tom vychází ze znalosti vlivu jednotlivých podmínek na stabilitu řezného procesu nebo se jednotlivé parametry náhodně nastavují, dokud nedojde k rozkmitání. Poté se změří amplituda tohoto kmitání. Následně se mění velikost posuzované veličiny a zkoumá se, jakým způsobem to ovlivňuje amplitudu kmitání. Výsledky měření se vynášejí jako grafická závislost amplitudy kmitání na posuzované veličině. [1]

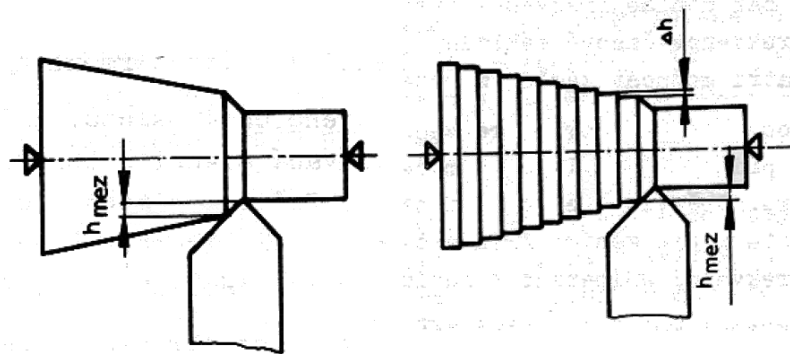
### 2.3.2 Srovnání s mezní hodnotou

Tato metoda využívá znalost vlivu charakteristické veličiny na samobuzené kmitání. Za charakteristickou veličinu se obvykle volí hloubka řezu, jejíž zvětšování často vede ke vzniku kmitání. Samotné posuzování pak probíhá tak, že se zvolí hodnota sledované veličiny (např.: úhel nastavení  $\kappa_r = 30^\circ$ ). Následně se plynule zvětšuje hodnota charakteristické veličiny, dokud se nedosáhne mezní hodnoty (bodu, ve kterém právě došlo k rozkmitání). Poté se zvolí další hodnota sledované veličiny a postup se několikrát opakuje. Vynesením závislosti charakteristické veličiny na sledované veličině získáme čáru meze stability, která dělí soubor podmínek na stabilní a nestabilní oblast. Na Obrázku 5 se nachází graf závislosti hloubky řezu  $h$  na úhlu nastavení  $\kappa_r$ . [1]



Obrázek 5 - Závislost hloubky řezu na úhlu nastavení [1]

Nejlépeším způsobem je provádět změnu charakteristické veličiny plynule, a to v rádech desetin milimetru. Při soustružení lze plynulé změny dosáhnout při obrábění kužele (Obrázek 6 vlevo) nebo obráběním jednostranně osazeného hřídele (Obrázek 6 vpravo), který s menší přesností může obráběný kužel nahradit. [1]

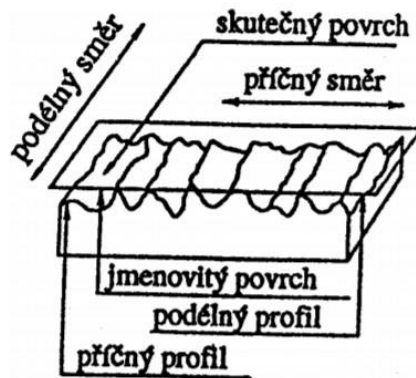


Obrázek 6 - Obrábění kuželu a obrábění jednostranného osazení [1]

## 2.4 Vliv kmitání na jakost obrobku

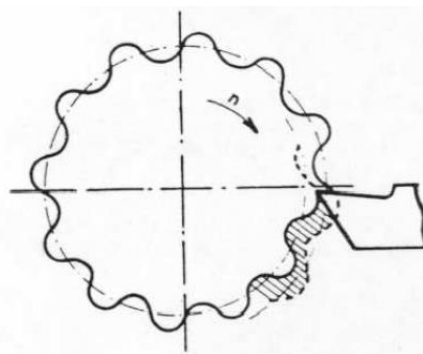
Kmitání má významný vliv na jakost výrobku. Nejvíce ovlivňuje drsnost a vlnitost povrchu. Kmitání soustavy se přenáší přes nástroj na obráběný povrch součásti, a ten je jím silně ovlivněn. Zvyšování kmitání soustavy zvyšuje i drsnost a vlnitost obrobku. To má za následek nedodržení předepsaných geometrických vlastností povrchu. I to je jeden z důvodů snahy o co největší stabilizaci řezného procesu. [4]

Drsnost povrchu je souhrn jemných nerovností (výstupků a prohlubní), které vznikají při každém zpracování materiálu. Na obrobku to jsou nejčastěji poměrně pravidelně a směrově uspořádané rýhy, které zanechává řezný nástroj. U některých způsobů obrábění, např. soustružení, frézování, hoblování není drsnost povrchu stejná ve všech směrech. Z toho důvodu se rozlišuje drsnost příčná, která je kolmá na řezný pohyb a drsnost podélná, která je ve směru řezného pohybu. [3]



Obrázek 7 - Podélný a příčný směr drsnosti [28]

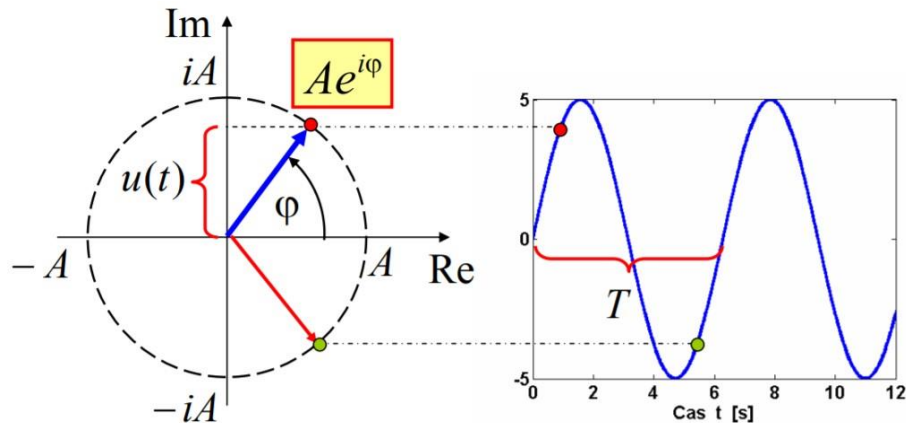
Vlnitost povrchu obráběných ploch je způsobena příliš velkým nebo proměnným tlakem řezného nástroje, nedostatečnou tuhostí nosných částí obráběcího stroje, chvěním soustavy stroj – nástroj – obrobek a vnitřním pnutím a deformacemi obrobku. [3]



Obrázek 8 - Vlnitost povrchu [3]

### 3 Harmonický kmitavý pohyb

Nejjednodušším představitelem periodického kmitání je tzv. harmonický pohyb, který je v závislosti výchylky na čase popsán sinusovou křivkou s konstantní periodou, frekvencí a amplitudou. [6]



Obrázek 9 - Harmonický kmitavý pohyb [6]

#### 3.1 Veličiny popisující kmitavý pohyb

##### Perioda T

Jde o čas, za který se rozkmitaný hmotný bod dostane do stejného směru pohybu, stejné aktuální výchylky, rychlosti a zrychlení. [6] [7]

##### Frekvence (kmitočt) f

Frekvence vyjadřuje počet celých kmitů hmotného bodu za jednu sekundu. [6]  
Je dána vztahem:

$$f = \frac{1}{T} [\text{Hz}] \quad (3.1) [6]$$

##### Úhlová frekvence $\omega$

Úhlová frekvence je dána vztahem:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} [\text{rad. s}^{-1}] \quad (3.2) [6]$$

##### Fáze $\varphi$

Fázový posun je dán posunem dvou periodických veličin, přičemž posun o  $360^\circ$  ( $2\pi$ ) je považován za nulový posun. Fáze je měřena jako úhlový, nebo časový rozdíl jednoho sinusového vibračního signálu vůči jinému signálu. [7]

## 4 Měření kmitání

Měření a detekce kmitání znamená sledování hmotného bodu elementu prostředí. Postupy, přístroje a pokyny pro měření vychází z normy ČSN ISO 20816. Nejpožívanějšími metodami jsou buď *Provádění měření v časové oblasti* nebo využití *Frekvenční analýzy*. [8]

### 4.1 Měření mechanického kmitání v časové oblasti

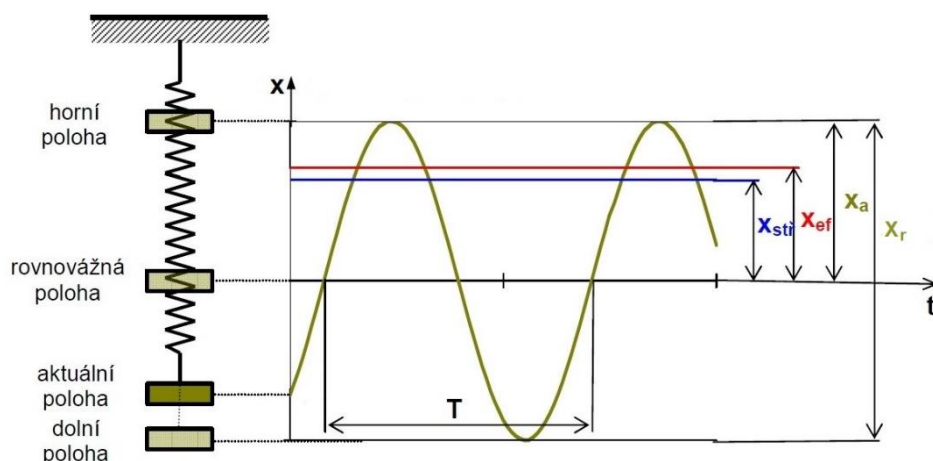
Ideální harmonický pohyb s úhlovou frekvencí  $\omega$  je definován rovnicí:

$$x = x_0 \sin \omega t \quad (4.1) [4]$$

V daném časovém okamžiku lze sledovat *Výchylku z rovnovážné polohy*, *Rychlost* a *Zrychlení*. Pomocí těchto tří veličin lze charakterizovat kmitání. [9]

#### 4.1.1 Výchylka

Výchylka určuje vzdálenost mezi polohou hmotného bodu v daném časovém okamžiku a jeho rovnovážnou polohou. Na Obrázku 10 jsou znázorněny jednotlivé výchylky  $x$  kmitajícího hmotného bodu na čase  $t$ . [9]



Obrázek 10 - Výchylka kmitajícího hmotného bodu [9]

#### Amplituda $x_a$

Amplituda neboli maximální výchylka, je maximální vzdálenost rozkmitaného hmotného bodu od rovnovážné polohy. Používá se při hodnocení krátkodobých jevů, protože necharakterizuje časový průběh ani frekvenci. [10]

### Maximální rozkmit $x_r$ (peak to peak)

Maximální rozkmit, je vzdálenost mezi největší kladnou a zápornou hodnotou výchylky, nejjednodušeji definována jako dvojnásobná amplituda: [10]

$$x_r = 2x_a \quad (4.2) [9]$$

### Střední výchylka $x_{stř}$ (average)

Střední výchylka je průměrná hodnota amplitudy v průběhu vlny. Charakterizuje časový průběh kmitání, v praxi se však moc nepoužívá. [10]

Střední výchylka je pak definována vztahem:

$$x_{stř} = \frac{1}{T} \int_0^T x \, dt \quad (4.3) [10]$$

### Efektivní výchylka $x_{ef}$ (Root Mean Square – RMS)

Efektivní výchylka je z hlediska hodnocení výchylek kmitajícího bodu nejdůležitější veličinou. Charakterizuje časový průběh kmitů a současně má také přímý vztah k energetickému obsahu kmitání. Na základě efektivní výchylky se tak dá v praxi posuzovat nebezpečnost kmitů. [10] Je definována vztahem:

$$x_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 \, dt}. \quad (4.4) [10]$$

#### 4.1.2 Rychlost

Měří se rychlost změny výchylky hmotného bodu. Jedná se o nejčastěji používanou veličinu pro měření vibrací. [11] Rychlost je první derivací výchylky podle času:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega x_0 \cos(\omega t) = v_0 \cos(\omega t) = v_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.5) [11]$$

Fáze rychlosti kmitání je proti fázi výchylky posunuta o  $(\pi / 2)$ .

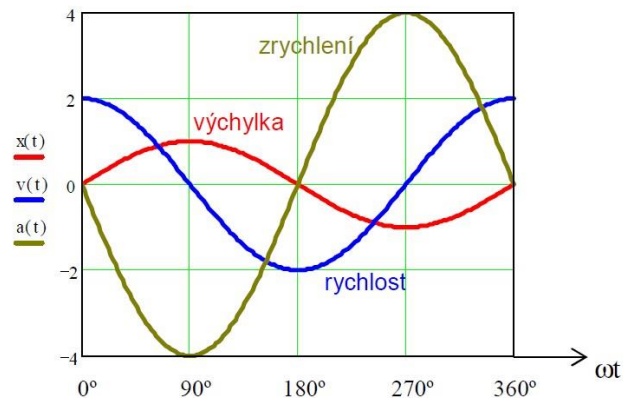
### 4.1.3 Zrychlení

Zrychlení je podle Newtonova zákona měřítkem síly, která na částici působí. Proto je okamžité zrychlení dáno časovou změnou rychlosti. [12] Odvozeno může být buď první derivací rychlosti podle času nebo druhou derivací okamžité výchylky podle času:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x_0 \sin(\omega t) = -a_0 \sin(\omega t) = a_0 \sin(\omega t + \pi) \quad (4.6) [12]$$

Fáze zrychlení je proti fázi rychlosti posunuta o  $(\pi / 2)$  a proti výchylce o  $\pi$ , což znamená, že je s ní v protifázi.

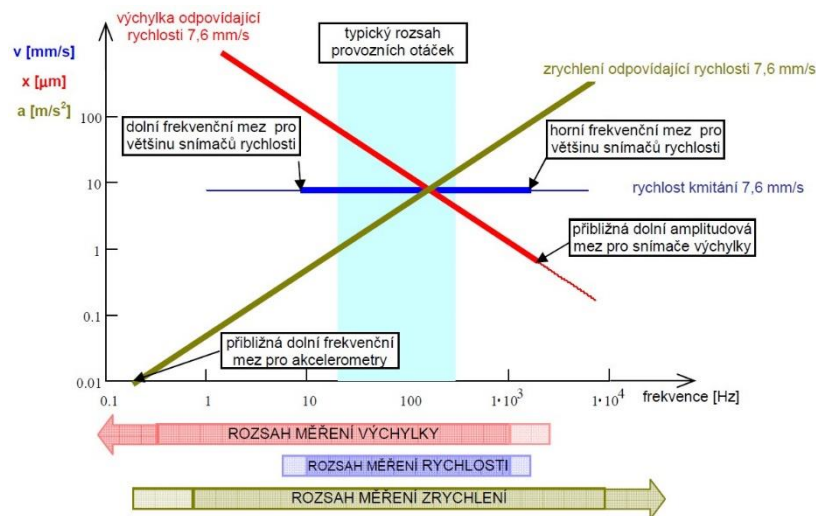
Teoreticky stačí znát jednu z veličin, a zbývající dvě lze snadno dopočítat. Rychlost se vždy o  $(\pi / 2)$  opoždí za výchylkou a zrychlení o dalších  $(\pi / 2)$  za rychlostí. To je jasně patrné i z Obrázku 11. [9]



Obrázek 11 - Vztah mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením [9]

Při měření je však nutné brát v úvahu i nepříznivé vlivy působící na jeho přesnost, a proto je vhodné volit měřenou veličinu tak, aby dávala dostatečný odstup signálu od šumu. Šum je v měření přítomen vždy a u slabých signálů to znamená větší nepřesnosti měření. [9]

Z Obrázku 12 vyplývá, že pro nižší frekvence je vhodná měřící veličina výchylka, pro střední rychlost a pro vyšší frekvence zrychlení. [9]

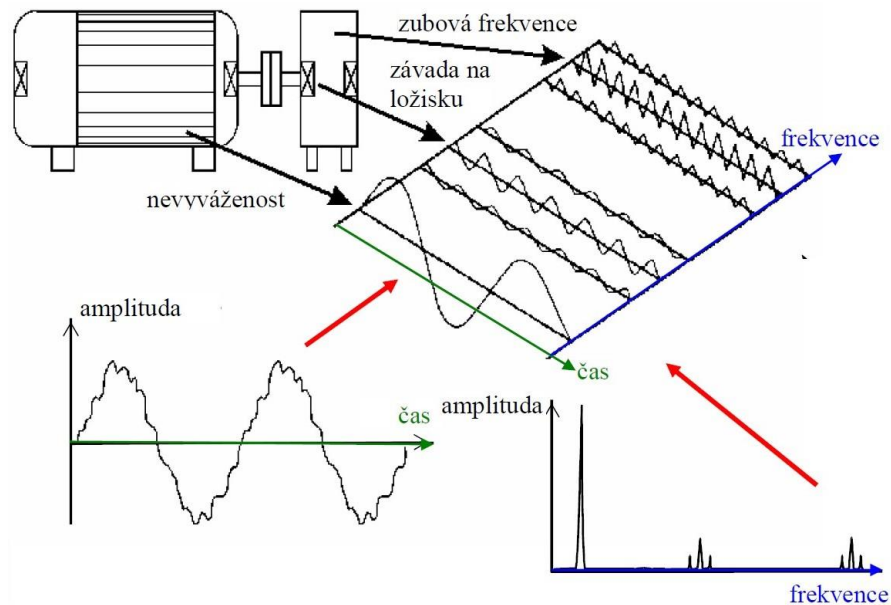


Obrázek 12 - Frekvenční omezení při měření [9]



## 4.2 Frekvenční analýza

Frekvenční analýza patří mezi nejdůležitější nástroje pro nalezení periodických a neperiodických jevů ve vibračním signálu. Princip je znázorněn na Obrázku 13.



Obrázek 13 - Frekvenční analýza [9]

Každá časová vlna je vyvolána více než jedním zdrojem vibrací o různých frekvencích. Frekvenční analýza slouží k identifikaci zdroje šíření vibrací tím, že provádí rozklad původního časového průběhu veličin popisující mechanické kmitání na jednotlivé harmonické (sinusové nebo kosinusové) frekvenční složky. Z těch už je následně zdroj vibrací lépe identifikovatelný. [4] [7] [9]

Původní časový průběh lze poté získat součtem všech analyzovaných harmonických složek. [7]

### 4.2.1 Fourierova transformace

Pomocí Fourierovy transformace se analyzují periodické a neperiodické signály. V praxi bývají signály při frekvenční analýze vibračních soustav především neperiodické. [7]

Použitím Fourierových transformací se původní funkce nahrazuje posloupností harmonických funkcí o různých frekvencích a fázích tak, aby jejich součet dal zpět původní funkci. [12]

#### Přímá Fourierova transformace

Přímá Fourierova transformace je dána spojitým integrálem:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.7) [12]$$

Kde  $j = \sqrt{-1}$ .

Časová funkce  $x(t)$  je převedena na frekvenční funkci  $F(x)$ .

Zpětná Fourierova transformace je definována vztahem:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f)e^{j2\pi ft} df \quad (4.8) [12]$$

#### Diskrétní Fourierova transformace DFT

Diskrétní Fourierova transformace je nejvhodnější pro použití v praxi. Poskytuje totiž pro diskrétně (čárově) vyjádřený signál (vzorky), diskrétně vyjádřený výsledek, který je možné následně zpracovávat číslicově řízenými stroji. [7]

Diskrétní Fourierova transformace je definována vztahem:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (4.9) [7]$$

Kde  $N$  = počet vzorků;  $k = 0, 1, \dots, N-1$ .

Zpětná diskrétní Fourierova transformace je definována vztahem:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k)e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (4.10) [7]$$

Kde  $n = 0, 1, \dots, N-1$ .

Platí základní vztah mezi délkou vzorku  $T$ , počtem diskrétních hodnot  $N$ , vzorkovací frekvencí  $f_s$  a rozsahem a rozlišením frekvenčního spektra  $f_{max}$ ,  $\Delta f$ :

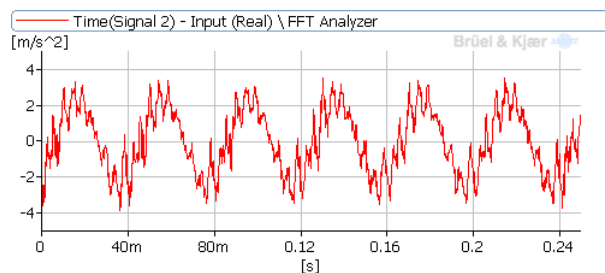
$$\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{f_s}{n} \quad (4.11) [9]$$

$$f_{max} = \frac{f_s}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{N}{T} \quad (4.12) [9]$$

Kde  $\Delta f$  je rozlišení čar ve spektru;  $f_{max}$  je Nyquistova frekvence.

## Rychlá Fourierova transformace FFT

Rychlá Fourierova transformace je urychlující algoritmus, který se používá pro výpočet diskrétní Fourierovy transformace. Předpokládá se lineární systém. Doba výpočtu klasické FFT je závislá na délce vstupního signálu, který je nejkratší pro délky mocnin dvou. Metoda spočívá ve vhodném rozložení výpočtu na několik samostatných výpočtů, pro jejichž řešení existují rychlé metody. [7]

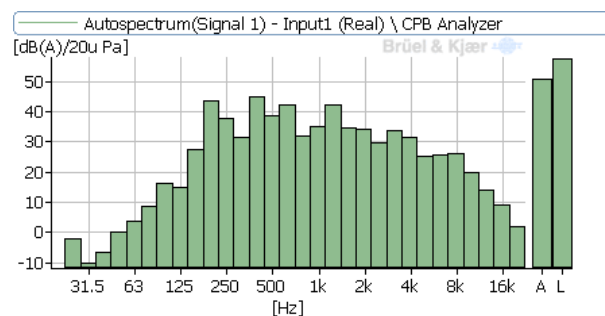


Obrázek 14 - Časový průběh FFT [29]

Algoritmus rychlé Fourierovy transformace je implementován ve všech současných analyzátoch vibrací, takže není nutné, aby jej uživatel podrobně ovládal. Nejdůležitějšími parametry transformace a měření jsou: Frekvenční rozsah, počet spektrálních čar, počet průměrů, typ průměrování, míra překrytí a typ spouště. [9]

## Použití frekvenčního filtru

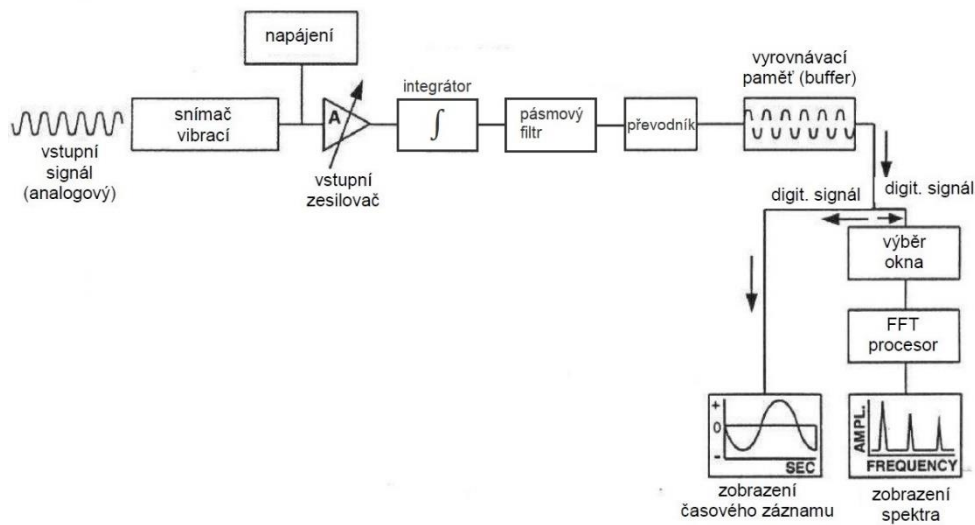
Pásmové filtry propouštějí kmity jen v určitém rozsahu kmitočtů. Používají se různé typy filtrů, které se podle šířky pásma dělí na *Oktávové*, *Třetinooktávové* a *Selektivní*. [10] Na obrázku 15 je výstup po použití oktávového filtru.



Obrázek 15 - Výstup po použití oktávového filtru [29]

### 4.3 Měřicí řetězec

Měřicí řetězec je soubor všech přístrojů používaných k měření chvění. Hlavními částmi měřicího řetězce jsou *Snímače chvění, Zesilovače, Integrátory, Filtry, Převodníky*, případně další přístroje. Na Obrázku 16 se nachází schéma měřicího řetězce kmitání. Funkce jednotlivých částí je popsána níže. Výsledný použitelný kmitočtový rozsah celé měřicí aparatury je dán nejvyšší dolní a nejnižší horní hranicí kmitočtového rozsahu jednotlivých členů soustavy. [10]



Obrázek 16 - Měřicí řetězec [9]

#### Snímače kmitání

Snímač kmitání je první člen měřicího řetězce. Pro přesný výsledek měření je velmi důležitá správná volba snímače. Snímači kmitání se podrobněji zabývám v kapitole 4.4.

#### Předzesilovače a zesilovače

Zesilovače mohou být střídavé nebo stejnosměrné lineární, dále pak nelineární logaritmické nebo integrační. [12]

Hlavní funkcí předzesilovače je přeměna vysoké výstupní impedance (výstupního odporu) ze snímače na mnohem nižší, se kterou jsou schopny pracovat následně připojené měřicí a analyzující přístroje. Další funkce předzesilovačů mohou být zesilování malých výstupních signálů ze snímače, které může být i přesné cejchované, nebo s cílem normalizace výstupního signálu ze snímače s nevhodnou citlivostí. Předzesilovač může také plnit funkci integrátoru. Při použití piezoelektrických snímačů bývá předzesilovač vestavěn přímo do měřicích a analyzujících přístrojů, v ostatních případech jsou používány samostatné předzesilovače. [12]

Základní rozdělení předzesilovačů je na *Napěťové* a *Nábojové*.

Napěťový předzesilovač musí mít vstupní odpor co nejvyšší a vstupní kapacitu co nejnižší. To zamezuje snížení citlivosti snímače. Napěťová citlivost se značí  $S_e$  a její jednotka je  $(\text{mV}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ . [12]

Nábojový předzesilovač musí mít vysoký vstupní odpor i kapacitu. Nábojová citlivost se značí  $S_q$  a její jednotka je  $(\text{pC}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ . Použití konkrétního typu předzesilovače záleží především na tom, zda je piezoelektrický snímač uvažován jako zdroj napětí nebo náboje. [12]

### **Integrátory**

Integrátor (integrační / derivační zesilovač) je v měřicím řetězci implementován pro převod snímaného signálu a stanovení všech veličin popisujících chvění, tedy výchylku, rychlost a zrychlení. Většinou se jedná o převod zrychlení (piezoelektrický akcelerometr) na signál rychlosti nebo výchylky. Ze vztahu mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením vyplývá, že tento převod je realizován jednou či dvěma integracemi původního signálu. Méně obvyklý je pak převod výchylky na signál rychlosti nebo zrychlení, který je realizován jednou či dvěma derivacemi. Tyto přepočty jsou evidentní z matematických vztahů mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením. [12]

### **Filtry**

Filtry mohou mít v měřicím řetězci různé funkce. Umožňují oddělení vyšetřované měřicí veličiny v různých kmitočtových pásmech, určení jednotlivých kmitočtových složek v měřené veličině, omezení kmitočtového pásma měřené veličiny nebo vyloučení rušivých složek od měřené veličiny. Filtry mohou být konstruovány jako přepínatelné a přeladitelné v celém kmitočtovém pásmu. [12]

## 4.4 Snímače kmitání

Snímače chvění jsou prvními členy měřicího řetězce. Snímač na stroji zachycuje signál, který obsahuje široké spektrum frekvencí. Každý snímač má dvě funkční části. První je detekční část neboli čidlo a druhá je převodník neboli měnič. Hlavní funkcí snímače je převod mechanické veličiny na elektrický signál. [10]

Snímače kmitání lze dělit podle několika různých hledisek.

Mohou být *Aktivní* (nepotřebují ke své funkci zdroj elektrické energie) a *Pasivní* (potřebují ke své funkci napájení z vnějšího zdroje elektrické energie). [4]

V kapitole „4.1 Měření mechanického kmitání v časové oblasti“ jsou uvedeny veličiny, na základě kterých lze sledovat kmitavý pohyb. Podle toho se tedy rovněž dělí i snímače kmitání, tedy na *Snímače výchylky, rychlosti a zrychlení*. Norma ČSN ISO 13373-1 uvádí toto rozdělení takto: [13]

- Bezdotykový snímač, jehož výstup je přímo úměrný relativní výchylce mezi nerotujícími a rotujícími elementy stroje;
- snímač rychlosti, jehož výstup lze integrovat na výchylku;
- akcelerometr, jehož výstup lze zpracovat tak, aby dával libovolný ze tří parametrů (výchylka, rychlost, zrychlení).

Nejdůležitější dělení snímačů chvění je na *Absolutní* a *Relativní*. [10]

### 4.4.1 Absolutní snímače kmitání

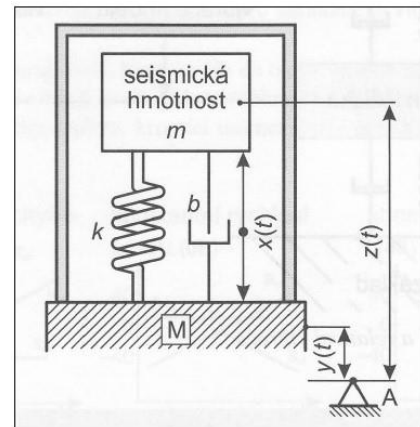
Norma ČSN ISO 13373-1 tyto snímače definuje jako „*Seismická zařízení, která se normálně montují na konstrukci stroje a jejichž výstup je mírou absolutních vibrací konstrukce*“. [13]

U absolutních vibrací tělesa je pohyb vztahován ke gravitačnímu poli Země neboli k pevnému fixnímu bodu. Absolutní snímače jsou připevněny ke kmitajícímu předmětu a měří veličinu mechanických vibrací vzhledem k seismické soustavě (vlastní setrvačné). Proto je vhodný pro měření v místech, kde nelze umístit vhodný relativní pevný bod vztažného bodu senzoru. [7] [10]

Absolutní snímač kmitání je znázorněn na Obrázku 17.

Jedná se o systémy s jedním stupněm volnosti, tuhostí  $k$  a koeficientem tlumení  $b$ , který je parametrem tlumiče a je definován silou při jednotkové rychlosti, tj.  $F = b \cdot v$ . Při kmitavém pohybu tělesa setrvává seismická hmota  $m$  vzhledem k nekmitajícímu okolí relativně v klidu. [7]

Kmitající předmět  $M$  vykonává časově proměnný pohyb  $y(t)$  vůči fiktivnímu klidovému bodu a toto vibrující těleso je budičem síly mechanické soustavy. Pohyb tělesa  $M$  tedy měříme vzhledem k seismické hmotě  $m$ . Aby nedocházelo ke zkreslení měření, musí být seismická hmota  $m$  a hmota snímače ve srovnání s hmotou kmitajícího předmětu  $M$  malá. [7]

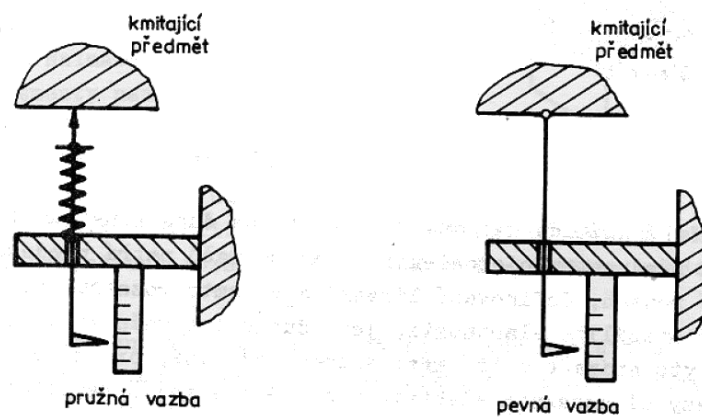


Obrázek 17 - Absolutní snímač kmitání [7]

Absolutní snímače vibrací měří v podrezonanční oblasti zrychlení a v nadrezonanční oblasti výchylku. Z toho důvodu se absolutní snímače dělí na *Snímače zrychlení (akcelerometry) s vysokoladěnou setrvačnou soustavou* a na *Snímače výchylky s nízkoladěnou setrvačnou soustavou*. [10]

#### 4.4.2 Relativní snímače kmitání

Relativní snímače kmitání se skládají ze dvou částí. Jedna část je připevněna na referenčním stacionárním předmětu, vůči kterému se mechanické kmitání měří. To může být jiná část stroje, základová deska stroje apod. Druhá část je snímače je pohyblivá a je s kmitajícím předmětem spojena buď silově (pružně) nebo kinematicky (pevně), což je znázorněno na Obrázku 18. [7] [10]



Obrázek 18 - Pružná a pevná vazba relativního snímače [10]

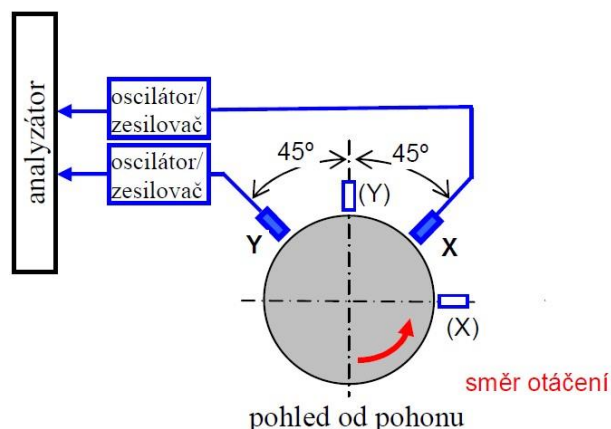
Relativní snímače mechanických kmitů obsahují pasivní měřicí soustavu dostatečné tuhosti, která přenáší mechanické kmitání měřeného předmětu do těla snímače. Použití relativních snímačů je vhodné pro měření nízkofrekvenčních kmitů, mající malé fázové a amplitudové zkreslení. Zároveň jsou relativní snímače vhodné pouze pro měření výchylek, nikoliv zrychlení. [7]

### 4.4.3 Snímače výchylky, polohy a posuvu

Snímače výchylky, polohy a posuvu nejčastěji pracují na indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém a optickém principu. Umožňují určit okamžitou polohu zkoumaného tělesa. Výchylka určuje změnu vzdálenosti nebo polohy objektu vzhledem k referenční poloze a je důležitou veličinou v místech, kde je nutné sledovat malé vůle a tolerance strojních dílů. Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které může přímo měřit vibrační výchylku rotujícího hřídele vůči stacionárnímu ložisku nebo skříní stroje. Vzhledem k relativně velké složitosti snímačů výchylky je však toto v současné době prakticky jejich jediné využití. [14] [15]

Většina používaných snímačů výchylky pracuje na principu vířivých proudů, tedy na indukčním principu. Tyto senzory využívají závislost indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Typický frekvenční rozsah je od 0 Hz do 10 kHz, což odpovídá 600 000 ot/min, s rozsahem měření od 1 mm do 10 mm a rozsah pracovních teplot je od - 50 °C do 200 °C dle provedení. [4] [7]

Obvykle se používají dva snímače výchylky pootočené o 90°, viz Obrázek 19. [9]



Obrázek 19 - Nejčastější umístění snímačů výchylky [9]

### Indukční snímače

Indukční snímače jsou nejpoužívanější pro měření výchylky, polohy a posuvu. Jejich hlavní výhodou oproti jiným metodám a snímačům, je vysoká odolnost proti nepříznivým okolním pracovním podmínkám, jako jsou prach, olej, voda, vlhkost, elektromagnetické rušení nebo teplota. Proto je lze přímo, bez přídavné izolace apod., použít na exponovaných místech vystavených nepříznivým podmínkám. Indukční snímače reagují jen na elektricky vodivé materiály. [16]



Snímač měří vzdálenost mezi špičkou snímače a vodivým povrchem. Skládá se z několika za sebe řazených bloků elektrických obvodů, které pracují v posloupnosti: *Oscilátor*, *Vyhodnocovací obvody (Evaluation Circuit)*, *Koncový stupeň (Output Circuit)*.



Obrázek 20 - Bloky obvodů v indukčním snímači [16]

Oscilátor generuje vysokofrekvenční střídavý proud, který prochází cívkou zabudovanou ve snímači, čímž v okolí špičky snímače vytváří vysokofrekvenční elektromagnetické pole. Pokud jsou do tohoto pole vloženy elektricky vodivé předměty (např. hřídel stroje), jsou v materiálu generovány vířivé proudy. Ty způsobí odváděním energie ze systému změnu magnetického pole. Magnetické pole působí vlivem vzájemné indukčnosti zpátky na cívku tak, že ta změní svoji impedanci. Okamžitá vzdálenost cílové plochy se namoduluje na tuto vlnu. Po ovlivnění nosné vlny a vířivých proudů proměnnou vzdáleností cílové plochy při vibracích se signál vede zpět do demodulátoru. Demodulací lze získat potřebný signál, odpovídající časovému průběhu výchylky, vysokofrekvenční signál je přeměněn na nízkofrekvenční. Takto vzniklý nízkofrekvenční signál je poté veden do vyhodnocovací jednotky. [9] [16]

Celé měření je díky vysoké frekvenci elektromagnetického pole velmi závislé na celkovém odporu. Kably, které vysokofrekvenční signál vedou, jsou proto vyráběny v přísné toleranci těchto elektrických hodnot a jejich délku není možné upravovat. Jakékoliv poškozením změna délky nebo stínění kabelu by mělo za následek zkreslení výsledků. [16]

Rozsah měření indukčního snímače závisí na tom, při jaké vzdálenosti předmětu od špičky snímače začne předmět ovlivňovat impedanci cívky. To se řádově děje v rozsahu jednotek až desítek milimetru. [16]

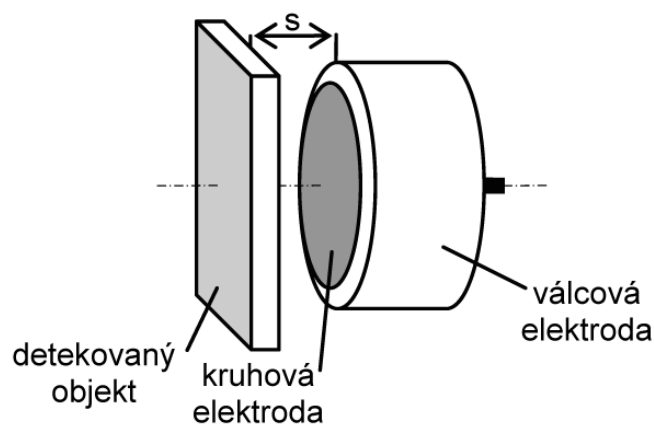
## Kapacitní snímače

Kapacitní snímače lze použít jako náhradu indukčních snímačů v situacích, kdy je potřeba detekovat i jiné než vodivé materiály. [17]

Skládají se z několika za sebe řazených bloků elektrických obvodů, které pracují v posloupnosti: RC Oscilátor (OSC), vyhodnocovací obvody, koncový výkonový stupeň.

Hlavním aktivním prvkem kapacitního snímače je kondenzátor, který je tvořen minimálně dvěma elektrodami v pouzdru, z nichž alespoň jedna musí být pohyblivá. Takovýto kondenzátor má nějakou základní kapacitu, která se pak dále mění se změnou dielektrika – přiblížení detekovaného objektu. Kapacitní snímač je pak doplněn rezistorem, s kterým je součástí RC oscilátoru. Ten je tedy rozladován právě změnou kapacity aktivního snímače. V případě měření vodivých materiálů se uplatňuje jako dielektrikum vzduch mezi senzorem a detekovanou kovovou ploškou. [17]

Výstupní napěťový signál oscilátoru je usměrněn a filtrován pro získání stejnosměrné složky. Ta je poté porovnávána v komparátoru s referencí. [17]



Obrázek 21 - Kapacitní snímač polohy [17]

#### 4.4.4 Snímače rychlosti

Pro měření rychlosti kmitavého pohybu se užívají indukční elektrodynamické snímače. Typický frekvenční rozsah je od 1 Hz do 3500 Hz a rozsah pracovních teplot je od -50 °C do 125 °C. Snímače rychlosti jsou zvláště vhodné pro měření nízkofrekvenčních vibrací. [7]

##### Elektrodynamické snímače

Elektrodynamické snímače rychlosti vycházejí z principu Faradayova zákona elektromotorické indukce. Snímač je tvořen cívkou s pohyblivým jádrem tvořeným permanentním magnetem. Cívka je uložena na velmi měkkých pružinách a vlivem své setrvačnosti zůstává v klidu, zatímco permanentní magnet je pevně spojen s pouzdrem snímače a tím při správné montáži i se skříní měřeného stroje. [7]

Když se cívka pohybuje v magnetickém poli, indukuje se, vlivem přenosu energie z magnetického pole do cívky na jejích vývodech napětí. Velikost tohoto indukovaného napětí je přímo úměrná relativní rychlosti mezi cívkou a magnetickým polem a platí pro něj vztah: [18]

$$u = B \cdot l \cdot v \quad (4.13) [18]$$

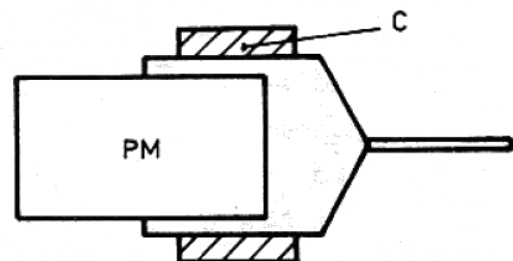
Kde  $B$  je indukce magnetického pole ve vzduchové mezeře;  $l$  je délka vodiče cívky;  $v$  je rychlost kmitání pouzdra senzoru.

Indukované napětí má stejný průběh jako rychlost pohybu cívky s citlivostí asi  $10 \text{ V/ms}^{-1}$ , speciální snímače pro seismická měření až  $10 \text{ kV/ms}^{-1}$ . [19]

Výhodou snímačů rychlosti je relativně vysoké výstupní napětí při nízkém odporu zdroje, díky čemuž nejsou tyto snímače citlivé na poškození izolace a na elektrická pole. [9]

Nevýhodou je velká citlivost na boční vibrace (jiné než ve směru citlivé osy). Snadno může dojít ke kontaktu cívky s pouzdrem snímače a tím k jeho poškození. Na toto musí být brán zřetel při montáži snímače. Měl by být umístěn na stacionární část stroje, na rovné ploše, která je o něco větší než základna snímače. [9]

Vzhledem k působení gravitační síly musejí mít snímače určené pro montáž ve vertikálním směru jinou konstrukci než snímače pro horizontální směr. [9]



Obrázek 22 - Relativní elektrodynamický snímač rychlosti [10]

#### 4.4.5 Snímače zrychlení (Akcelerometry)

Akcelerometry jsou seismická zařízení, která generují výstupní signál úměrný mechanickému vibračnímu zrychlení měřeného tělesa. V současnosti se používají jako základní snímače vibrací, zejména pro měření na nepohyblivých částech rotačních strojů. Používané jsou zejména proto, že mají ve srovnání s ostatními typy snímačů nejméně nevýhod, disponují širokým frekvenčním rozsahem od 0,1 Hz do 30 kHz a podle provedení jsou schopny pracovat až do teploty 250 °C. Pro zjištění výchylky a zrychlení je možné výstupní signál integrovat. [7] [9]

U akcelerometrů není vztažná seismická hmota v klidu a pracovní oblast je pod kmitočtem vlastních netlumených kmitů. Díky velké tuhosti a nízké hmotnosti seismické hmoty je u akcelerometrů dosahováno velkých hodnot kmitočtu vlastních kmitů. [9]

Nejpoužívanější jsou akcelerometry na *Piezelektrickém principu*. Další typy akcelerometrů jsou *Piezorezistivní* nebo *Kapacitní*. [18]

##### **Piezelektrické akcelerometry**

Piezelektrické snímače zrychlení se skládají z piezelektrického materiálu, což může být křemen, křišťál, titaničitan barnatý ( $\text{BaTiO}_3$ ) a titaničitan olovnatý ( $\text{PbTiO}_3$ ), atd., seismické hmoty a pouzdra. [4] [10]

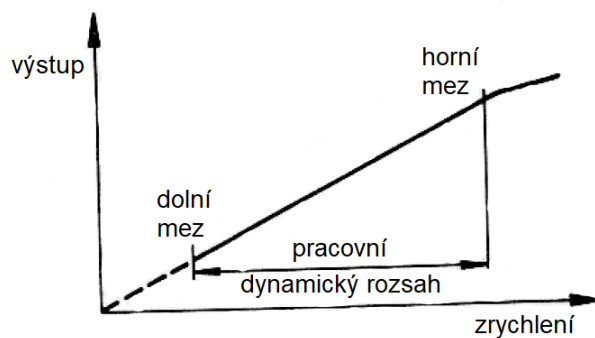
Princip funkce akcelerometru je ten, že při deformaci destičky z piezelektrického materiálu vzniká elektrický náboj, jehož velikost je přímo úměrná této deformaci. Destička je umístěna mezi dvěma hmotami, z nichž jedna je setrvačná (seismická) referenční hmota a druhá je pevně spojená s pouzdem snímače a tím při správné montáži i se skříní měřeného stroje. Setrvačná hmota je uložena pružně. S kmitajícím strojem tedy současně kmitá hmota pevně spojená s pouzdem snímače, zatímco referenční setrvačná hmota zůstává v klidu, čímž je na piezelektrický prvek vyvíjena síla, způsobující jeho deformaci. Deformací pak vzniká elektrický náboj, který je přímo úměrný zrychlení skříně stroje. [9]

Požadavkem na snímače zrychlení je, aby elektrický signál byl při nízkých hodnotách zrychlení co největší. Z tohoto důvodu by měl mít piezelektrický člen velkou hmotnost a velké rozměry. To by však bylo uživatelsky nepřívětivé. Proto se používají předzesilovače, které dovolují zmenšení hmotnosti a rozměrů piezelektrických destiček.

Hmotnost snímače by totiž měla být menší než 1/10 hmotnosti kmitajícího předmětu. [4] [10]

Piezoelektrické měřicí systémy patří mezi aktivní, což znamená, že si samy generují elektrický signál a nepotřebují napájecí zdroj. Piezoelektrické destičky však produkují elektrický výstup pouze tehdy, když na ně působí síla. Z tohoto důvodu nemohou provádět statická měření. Namáhání piezoelektrického elementu může být tahové, tlakové nebo smykové. Podle toho se upravují konstrukce jednotlivých akcelerometrů. [10]

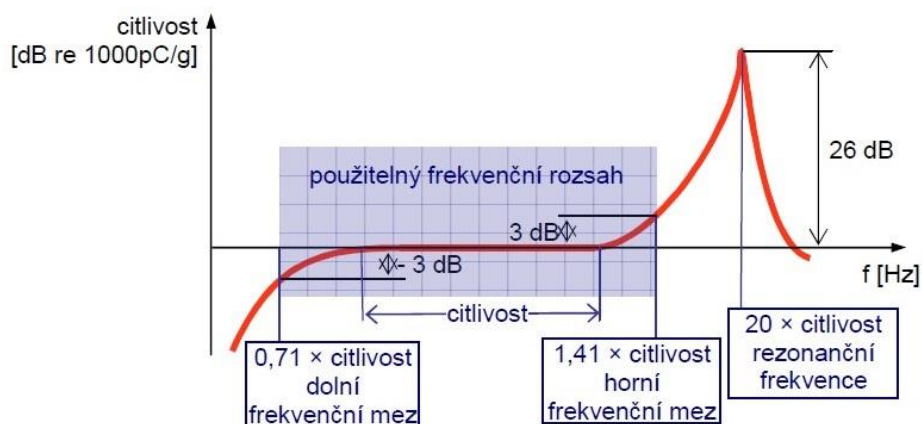
Pro měření kmitání je důležitý pracovní dynamický rozsah snímače (Obrázek 23).



Obrázek 23 - Dynamický rozsah snímače [10]

Dolní mez je většinou dána elektrickým šumem kabelů nebo použitého předzesilovače a pohybuje se v řádech  $m/s^2$ . Horní mez je dána mechanickou pevností snímače a pohybuje se od 50 do 100  $km/s^2$ , u speciálních snímačů však až do 1000  $km/s^2$ . [10]

Další důležitou charakteristikou piezoelektrických akcelerometrů je frekvenční charakteristika (Obrázek 24). [10]



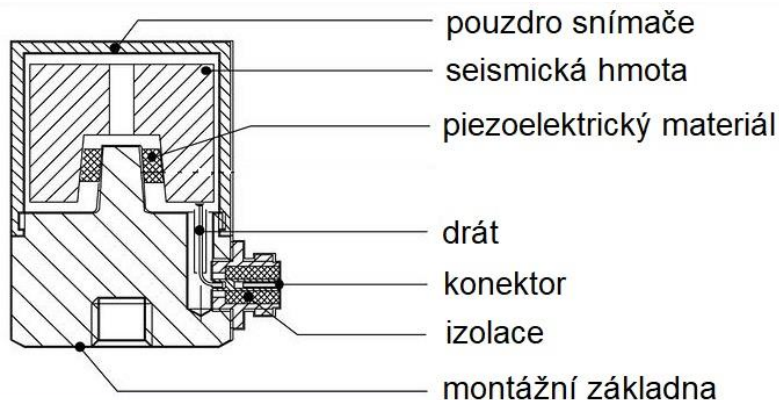
Obrázek 24 - Frekvenční charakteristika [9]

Z frekvenční charakteristiky lze vypočítat citlivost snímače a frekvenční rozsah jeho použitelnosti. Citlivost akcelerometru se udává v ( $\text{pC}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ), ( $\text{pC}/\text{g}$ ), ( $\text{mC}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) nebo v ( $\text{mV}/\text{g}$ ). Pokud je frekvence kmitání pod dolní frekvenční mezí použitého snímače, pohybuje se setrvačná hmota společně se skříní stroje a negeneruje se elektrický náboj. Dolní mez je dána tuhostí pružného uložení, materiálovým tlumením, hmotností referenční hmoty, dolním mezním kmitočtem předzesilovače a citlivostí snímače na změnu teploty prostředí. Horní frekvenční mez snímače je zhruba ve třetině jeho rezonanční frekvence a je dána rezonančním kmitočtem systému seismická hmota – pružina. Maximální přípustná chyba kmitočtu je 12 %. [9] [10]

Jak již bylo zmíněno, piezoelektrické akcelerometry mohou smykové nebo tlakové.

### Smykové akcelerometry

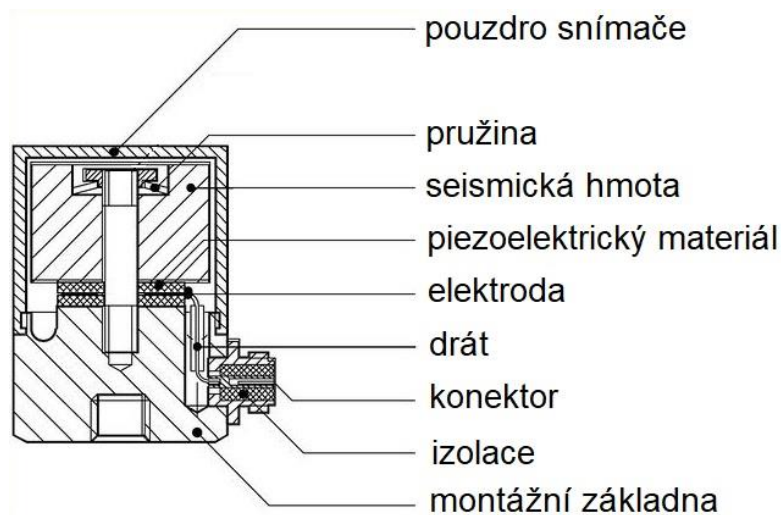
Piezoelektrické prvky (destičky) jsou konfigurovány tak, aby na ně byla vyvíjena smyková deformace, vytvářející elektrický náboj. Tato konstrukce je v dnešní době nejpoužívanější, protože piezo destičky jsou izolovány od základny, což pomáhá snižovat citlivost na teplotu a náchylnost k deformaci základny. Další výhodou je lepší linearita pracovní části kmitočtové charakteristiky a větší pracovní kmitočtový rozsah. Nevýhodou této konstrukce je relativně nízký poměr citlivosti k hmotnosti, díky čemuž je zapotřebí použití předzesilovače. [20]



Obrázek 25 - Konstrukce smykového akcelerometru [20]

## Tlakové akcelerometry

Piezoelektrické prvky (destičky) jsou konfigurovány tak, aby na ně byla vyvíjena tlaková deformace, vytvářející elektrický náboj. Seismická hmota je spojena s pružinou, díky čemuž mají tyto snímače vyšší poměr citlivosti k hmotnosti. Nevýhodou tohoto řešení je však náchylnost na teplotní vlivy a na deformaci základny. Tlakové akcelerometry vynikají svou robustností, a proto jsou využívány v aplikacích s vysokými otřesy. [20]



Obrázek 26 - Konstrukce tlakového akcelerometru [20]

## Akcelerometry IEPE (ICP®)

Piezoelektrické akcelerometry typu IEPE (Internal Electronic Piezoelectric) mají zesilovač integrovaný do samotného senzoru. Hlavními výhodami tohoto řešení je snížení šumu signálu na absolutní minimum, zjednodušení konstrukce zesilovače a poskytnutí výstupního signálu s nízkou impedancí. Integrovaný zesilovač však omezuje teplotní rozsah senzoru na  $-55\text{ °C}$  až  $160\text{ °C}$ . [21]

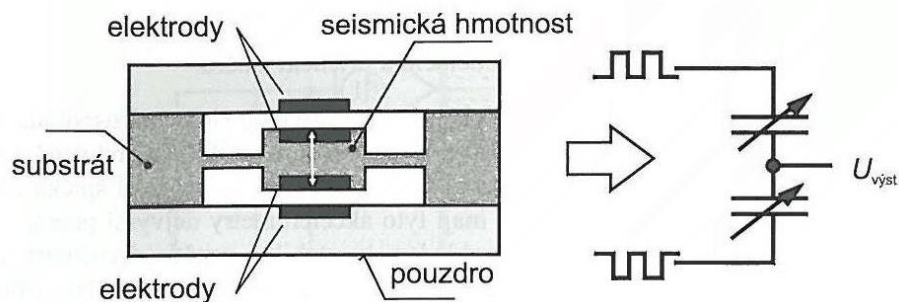
Někteří výrobci označují tento typ akcelerometru obchodním označením ICP®. [20]

## Akcelerometry Charge Mode

U tohoto typu akcelerometru se implementuje obvod zesilovače mimo senzor. Toto fyzické oddělení umožňuje složitější konstrukci zesilovače s rozšířenými možnostmi filtrování. Zároveň však toto řešení zvyšuje náchylnost k chybám. Lze sice dosáhnout většího dynamického rozsahu, ale na zesilovači vzniká šum, který se dále zvyšuje v důsledku prodloužené délky speciálních kabelů. Celý tento systém je také nákladnější. Díky externě umístěnému zesilovači se výrazně zvyšuje teplotní rozsah senzoru, který je  $-70\text{ °C}$  až  $540\text{ °C}$ . Speciální senzory mají ještě širší rozsahy provozních teplot. [21]

## Kapacitní akcelerometry

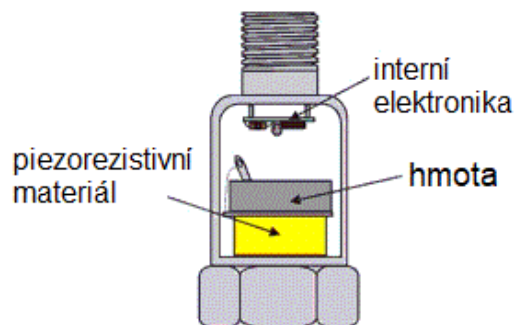
Kapacitní elektromechanické MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) akcelerometry jsou založeny na změně kapacity desek kondenzátoru. Protože při pohybu seismické hmotnosti se jedna kapacita zvětšuje a druhá zmenšuje, vyhodnocuje se rovnou rozdíl hodnot kapacit. Miniaturní struktura je zabudovaná společně s analogovými a digitálními obvody vyhodnocení uvnitř integrovaného obvodu, což dohromady vytváří velmi odolný a zároveň velmi spolehlivý senzor. Tyto snímače jsou obvykle přesné a velmi citlivé, ale vhodné i pro nízké dynamické rozsahy zrychlení. Frekvenční rozsah bývá od 0 Hz do 6 kHz, teplotní rozsah pak od -55 °C do 250 °C. Vyznačují se malými rozměry, ale jsou obvykle dražší a méně odolné na vysoké teploty než piezoelektrické akcelerometry. Technologie MEMS bývá nejvíce spojována právě s kapacitními akcelerometry, ale může být využita i v piezorezistivních akcelerometrech. [15] [22]



Obrázek 27 - Kapacitní akcelerometr [15]

## Piezorezistivní akcelerometry

Piezorezistivní akcelerometr je senzor, který využívá piezorezistivní materiál místo piezoelektrického krystalu a jeho prostřednictvím převádí sílu, vytvořenou tlakem hmoty, na změnu odporu. Tato změna trvá do doby, dokud se neobnoví původní tvar materiálu. V integrovaných piezorezistivních akcelerometrech se využívá síť vyleptaných měřících piezorezistivních snímačů (můstků) zapojených ve Wheatstonově můstku. [23]



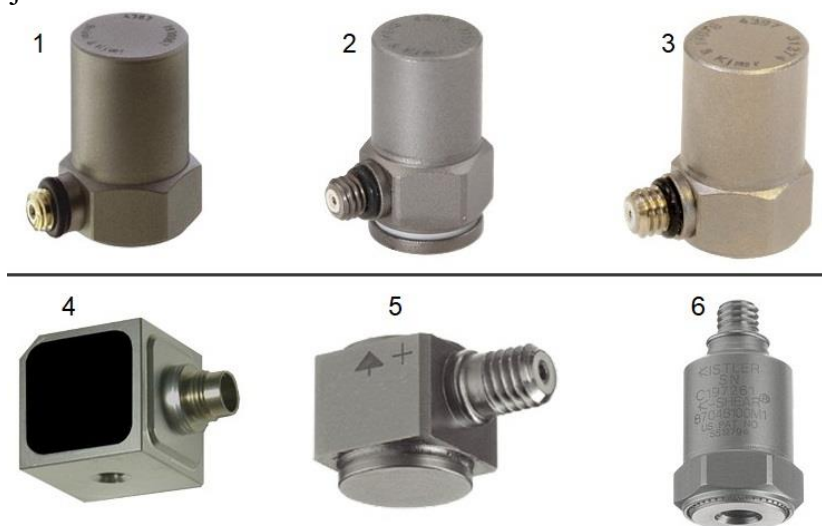
Obrázek 28 - Piezorezistivní akcelerometr [23]



Narozdí od piezoelektrických snímačů mohou ty piezorezistivní měřit i konstantní zrychlení, tj. frekvenci změn od 0 Hz. U piezorezistivních akcelerometrů je nutné napájení. [4]

Piezorezistivní akcelerometry mají obvykle velmi nízkou citlivost, díky čemuž nejsou pro přesné testování vibrací tolik vhodné. Piezorezistivní akcelerometry jsou také citlivé na kolísání teploty, což vyžaduje teplotní kompenzaci, která je však v mnoha snímačích zahrnuta. Piezorezistivní akcelerometry jsou mnohem dražší než kapacitní akcelerometry MEMS, takže se obecně pro testování s nižší frekvencí a amplitudou nepoužívají. [22]

Na Obrázku 29 se nachází příklady snímačů zrychlení výrobců Kistler a Brüel & Kjær.



Obrázek 29 - Příklady snímačů zrychlení Kistler a Brüel & Kjær [30] [31]

V Tabulce 1 se nachází vybrané parametry snímačů na Obrázku 29

Tabulka 1 - Parametry snímačů Kistler a Brüel & Kjær [32] [33] [34]

číslo	model	frekvenční rozsah	teplotní rozsah	citlivost
1	Brüel & Kjær 4383 (typ Charge)	0.1 až 8400 Hz	- 74 až + 250 °C	31 ± 2% pC/g
2	Brüel & Kjær 4394 (vysokofrekvenční)	1 až 25000 Hz (Amplituda ± 10 %)	- 50 až + 125 °C	9,8 ± 2% mV/g
3	Brüel & Kjær 4397-A (vysokofrekvenční)	1 až 10000 Hz (Amplituda ± 5 %) 4 až 2500 Hz (Fáze ± 5°)		
4	Kistler 8396 (kapacitní MEMS, nízkofrekvenční)	0 až 3500 Hz (dle podtypu)	- 55 až + 125 °C	(40 až 2000) ± 5% pC/g (dle podtypu)
5	Kistler 8276 (typ Charge)	1 až 7000 Hz	- 55 až + 165 °C	5,5 ± 5% pC/g
6	Kistler 8704B (ty IEPE)	0,5 až 10000 Hz (dle podtypu)	- 55 až + 100 °C	(50 až 200) ± 5% mV/g (dle podtypu)

#### 4.4.6 Montáž snímačů chvění

Správný výsledek měření kmitání je vysoce závislý na montáži snímače. Způsob upevnění je dán především cílem, rozsahem, časovou náročností, přesností a opakovatelností měření. Důležitými parametry jsou potřebná frekvenční pásma, přístupnost měřicího místa a požadavky na rychlost a přesnost měření. [4]

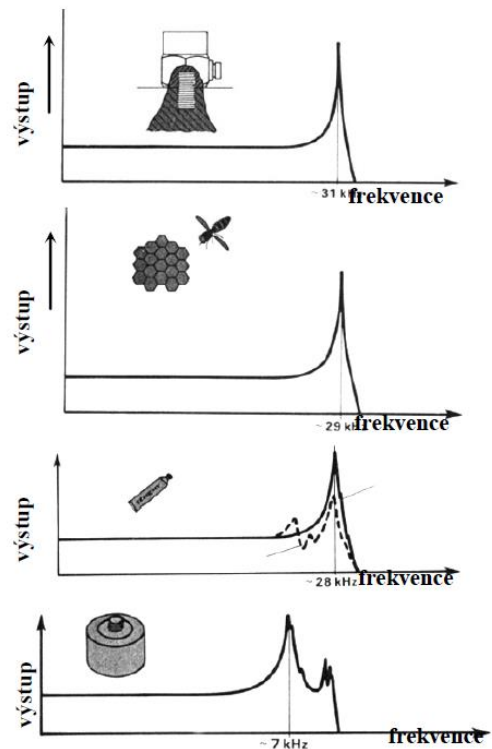
Nejpřesnější spojení snímače je pomocí šroubu, protože poskytuje nejvyšší tuhost spojení. Pracovní kmitočtový rozsah je v rozmezí 15 – 40 kHz. [7]

Lze využít i upevnění pomocí magnetu se šroubem. Toto spojení se vyznačuje jednoduchostí a rychlostí montáže. Rezonanční kmitočet se však sníží o jednu čtvrtinu až pětinu. Dosedací plocha musí být rovná a především feromagnetická. [10]

Další možností je použití pojivového materiálu, jako jsou lepidla nebo tmely. Tento způsob se hodí pro opakovaná měření ve stejných místech. Pracovní kmitočtový rozsah se však velmi zúží. [10]

Některé lehčí snímače lze připevnit pomocí včelího vosku, který je však limitován teplotou 40 °C, při které začíná měknout. Možné je i použití oboustranné lepicí pásky. [4]

Při umísťování snímače je třeba brát ohled na vhodnou volbu měřicích míst, aby výsledky měření co nejvíce odpovídaly skutečné velikosti vibrací. Snímač by měl být umístěn na čisté povrchy, aby mezi povrchem stroje a dosedací plochou snímače nebyly žádné nečistoty. U magnetického přichycení snímače může dojít ke zmagnetování volných ocelových pilin z okolí a přichycení pod jeho dosedací plochu, což vede ke zkreslení výsledků. Plocha pod snímačem by měla mít odpovídající rovinnost a rozměry. Snímač by měl být také umísťován co nejblíže k místu vzniku vibrací. [24]



Obrázek 30 - Kmitočtový rozsah pro různé způsoby upevnění snímače [35]

#### 4.4.7 Přenosná zařízení

V dnešní době je již možné použít moderní přenosná zařízení, která mohou sloužit jako vibrometr, analyzátor i zobrazovač. Umožňují zobrazení výchylky, rychlosti, zrychlení, časového signálu i spektra. Mezi takovéto přístroje patří například ADASH 4900 Vibrio. [25]



Obrázek 31 - Přenosný analyzátor ADASH 4900 [25]

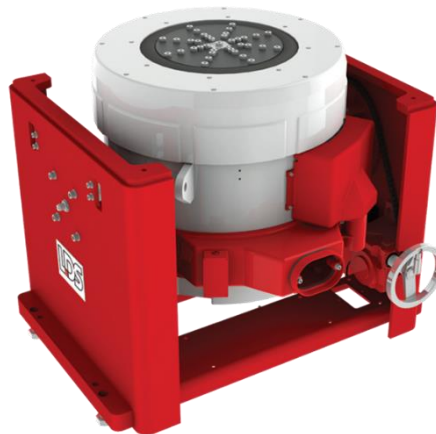
#### 4.4.8 Budiče kmitání

Budiče kmitání se používají pro zjištění některých dynamických vlastností systému stroj – nástroj – obrobek, pro stanovení vlastní frekvence určitého zařízení nebo jeho částí. Budiče fungují tak, že rozkmitávají příslušné předměty budící silou známých vlastností.

Nejpoužívanější typy budičů jsou *Mechanické* a *Elektrodynamické*. [10]

Mechanické budiče fungují na principu klikového mechanismu nebo na principu odstředivém. [10]

Elektrodynamické budiče mají oproti mechanickým menší výkony, ale mohou pracovat při vyšších kmitočtech. [10] Na Obrázku 31 je elektrodynamický budič kmitání Brüel & Kjær LDS V875LS.



Obrázek 32 - Budič kmitání Brüel & Kjær LDS V875LS [36]

Pro vysoké kmitočty je vhodnější použití *Piezelektrických* nebo *Magnetostrikčních* budičů kmitání. [10]

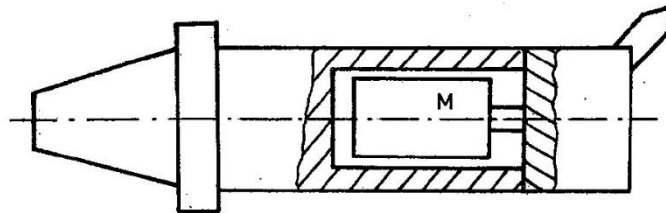
#### 4.4.9 Tlumiče kmitání

Tlumiče kmitání jsou zařízení, která umožňují snížení vynuceného nebo samobuzeného kmitání. Dělí na *Statické* nebo *Dynamické*. [1]

Mezi statické tlumiče patří mechanické nebo hydraulické lunety, které navíc kromě určitého stupně tlumení poskytují i zvýšení tuhosti. [1]

Základní dynamické tlumiče fungují tak, že rozkmitávají cizí těleso stejnou frekvencí, ale působí na základní systém fází opačnou vůči budící síle. Dynamické tlumiče mohou mít i vlastní tlumení (například tlumící hmotu). [1]

K tlumení se dají použít i setrvačníky nebo torzní tlumiče chvění, které tlumí kmitání důsledkem tření mezi kotoučem a plochami volně se otáčejícího setrvačníku. [1]



Obrázek 33 - Dynamický tlumič kmitání [1]

#### 4.4.10 Cejchování snímačů

Cejchování znamená provádět kalibraci s úředním ověřením. Způsob cejchování snímačů kmitání je různý podle toho, zda se jedná o snímač absolutní či relativní, snímač výchylky, rychlosti nebo zrychlení. Principálně je však dvojí, a to *Statické* a *Dynamické*.

Statické cejchování lze použít pouze u relativních snímačů výchylky a provádí pomocí měrek, mikroskopu nebo mikrometrického šroubu. [10]

Dynamické cejchování probíhá za pomoci speciálních přístrojů. Cejchovaný snímač, například piezoelektrický akcelerometr se vloží do přístroje, který je následně nastaven na určitou hodnotu zrychlení. Výstupní elektrické signály kmitajícího cejchovaného snímače a referenčního normálu, tedy cejchovacího přístroje, jsou v poměru citlivosti. [10]

Cejchovat lze i bez speciálních cejchovacích přístrojů, například pomocí budičů kmitání, které jsou popsány v kapitole 4.4.8. [10]

## 4.5 Moderní metody a přístroje

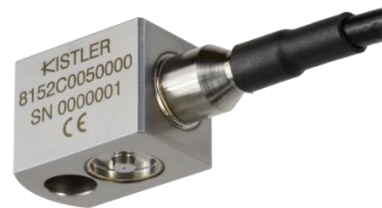
### 4.5.1 Akustická emise

Pojem akustická emise se označuje fyzikální jev, při němž se pozorují akustické signály vysílané mechanicky nebo tepelně namáhaným tělesem, a zároveň diagnostickou metodu založenou na tomto jevu. [26]

Akustická emise patří k pasivním inkohherentním metodám, využívá postupných vlnových pulsů. Jedná se o je nedestruktivní metodu. Neovlivňuje tedy měřený objekt a podává integrální informace o momentálním dynamickém stavu materiálu. Signály akustické emise doprovázejí dynamické procesy v materiálu, což se projevuje jako postupné elastické vlnění. Zdrojem těchto vlnových balíků jsou náhlá uvolnění energie v materiálu. [26]

Frekvenční i amplitudové pásmo akustické emise je rozsáhlé od jednotek Hz (seizmická měření) po vysoké ultrazvukové frekvence. Měřením akustické emise se zjišťuje počet a tvar vlnových pulsů, jejich rychlost, útlum, odraz, násobnost dráhy, dozvuk atd. [26]

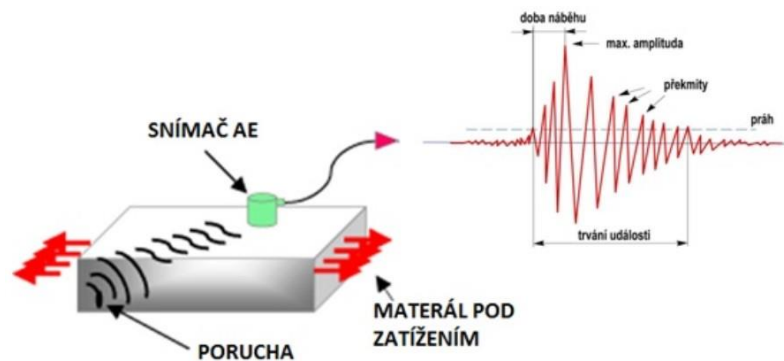
Snímače akustické emise, převádějící balíky vln akustické emise na elektrické signály, jsou obvykle keramické piezoelektrické snímače, případně rezonanční snímače s daným rozsahem frekvencí (například 30kHz, 300kHz). Na Obrázku 34 se nachází senzor pro měření akustické emise Kistler 8152C. [26]



Obrázek 34 - Senzor pro měření akustické emise Kistler 8152C

[37]

Analýza a zobrazení signálu se obvykle provádí až po ukončení vlastního měření, tj. po cyklech registrování jednoho nebo několika souběžných pulsů. Jestliže systém snímačů detekuje několik balíků akustické emise během jistého předem daného času, je možné za určitých



Obrázek 35 - Princip akustické emise [38]

okolností předpokládat, že pulsy vycházejí z jednoho zdroje akustické emise (tedy mají tutéž příčinu). Časový rozdíl mezi detekcí "téhož" balíku vln akustické emise různými snímači je používán pro lokalizaci zdroje akustické emise. [26]

Nevýhodou metody je dosud neobjasněný způsob vzniku emisních balíků, a tedy nemožnost jednoznačné interpretace měření nebo příliš malá energie mnohých akustických pulsů, čímž tyto pulsy mohou zanikat v šumovém pozadí detektoru. [26]

#### 4.5.2 Laserové interferometrické vibrometry

Laserové interferometrické vibrometry lze využít v aplikacích, kde je použití dotykové měřicí techniky nevhodné či nemožné, například měření v těžko přístupných místech. Laserové bezkontaktní snímače vibrací nabízí široký frekvenční rozsah, měření objektu na velkou vzdálenost a relativně vysokou přesnost. Mohou měřit vibrace do 30 MHz s velmi malou nejistotou měření a lineární fázovou odezvou. Princip laserových vibrometrů je založen na interferenci dvou koherentních, lineárně polarizovaných paprsků. Jako zdroj záření se používají nízko výkonové lasery. Pomocí laserových interferometrů lze bezdotykově přímo měřit amplitudu kmitů, odečítáním interferenčních proužků. Tyto přístroje se využívají jen pro nízké rychlosti vibrací. [7] [27]

Laserové bezkontaktní snímače vibrací nabízí široký frekvenční rozsah, měření objektu na velkou vzdálenost, relativně vysokou přesnost a flexibilitu. Nevhodné je použití v prašných a špatně viditelných podmínkách, kde hrozí nebezpečí zkreslení výsledku měření.

Na Obrázku 36 se nachází Laserový vibrometr SIOS LSV NG, který je vybavený softwarem FFT (rychlé Fourierovy transformace) pro spektrální analýzu. [7] [27]



Obrázek 36 - Laserový vibrometr SIOS LSV NG [39]

## 5 Porovnání a zhodnocení metod a snímačů

Je velmi důležité zvolit si pro konkrétní aplikaci správný druh metody měření a snímače. Obecně lze konstatovat, že pro nižší frekvence jsou nejvhodnější snímače výchylky, pro střední frekvence snímače rychlosti a pro vyšší frekvence snímače zrychlení.

Snímače výchylky mohou být buď na indukčním nebo kapacitním principu, přičemž oblast jejich využití se liší hlavně v materiálu, který jsou schopny snímat. Indukční snímače jsou schopny snímat pouze vodivé materiály. Mají však vyšší citlivost a vysokou odolnost proti nepříznivým okolním pracovním podmínkám a znečištění, a proto se pro měření kmitání při obrábění hodí víc.

Pro monitorování kmitání na pohyblivých částech stroje je výhodné použít snímače rychlosti. Musí se s nimi však zacházet opatrně a rozvážně volit jejich montáž, protože jsou velmi náchylné na mechanické poškození v bočním směru.

V dnešní době se však pro monitorování kmitání používají nejvíce snímače zrychlení neboli akcelerometry. Nejpoužívanějším typem jsou piezoelektrické akcelerometry, které nabízejí vysokou citlivost i frekvenční rozsah. Vyrábí se v mnoha různých provedeních, která se liší konstrukcí a tím pádem i vlastnostmi. Z principu funkce nejsou piezoelektrické akcelerometry schopny měřit konstantní zrychlení, tedy frekvenci 0 Hz. V aplikacích, které by to vyžadovaly tak lze použít kapacitní MEMS snímače. Jsou však dražší, méně odolné a mají menší frekvenční rozsah. V úvahu připadají i piezorezistivní akcelerometry, které jsou však ještě dražší, mají menší citlivost a při kolísání teplot mohou podávat zkreslené výsledky.

Mezi moderní metody v oblasti měření mechanického kmitání patří akustická emise nebo laserové interferenční vibrometry.

Akustická emise využívá postupných vlnových pulsů. Má velmi široký frekvenční rozsah, který však začíná až kolem hodnoty 50 Hz. Výhoda akustické emise je, že umožňuje získat okamžitý náhled na stav sledovaného objektu.

Laserové interferometry se nejvíce hodí pro použití v místech, kde uživatel není schopen provést měření pomocí výše popsaných snímačů chvění. Nabízejí široký frekvenční rozsah, měření objektu na velkou vzdálenost a relativně vysokou přesnost.

U dotykových snímačů je třeba správně zvolit způsob montáže, protože je to další faktor, který omezuje výsledný frekvenční rozsah snímače.

Důležitou roli hraje samozřejmě také cena. Ta se mírně u jednotlivých výrobců snímačů liší. Řádově se pohybujeme od tisíců korun v případě snímačů výchytky, přes akcelerometry pohybující se nad hranicí 10 000 Kč, po výrazně dražší měřicí systémy akustické emise. Musíme si však uvědomit, že samotný snímač pro měření nestačí, je třeba dalších členů měřícího řetězce, které jsou v práci popsány.

V Tabulce 2 se nachází přehled snímačů a metod pro měření kmitání.

Tabulka 2 - Přehled metod a snímačů pro měření kmitání

typ snímače		absolutní / relativní	dotykové / bezdotykové	frekvenční rozsah [Hz]	pracovní teplotní rozsah
výchytky polohy posuvu	indukční	absolutní	bezdotykové	0 až 10000	-50 až +200 °C
	kapacitní	absolutní	bezdotykové (dotykové ne pro měření kmitání)		-55 až +250 °C
rychlosti	elektrodynamické	absolutní - bezdotykové; relativní - dotykové	dotykové	1 až 3500	-50 až +125 °C
		absolutní	dotykové		-55 až +160 °C
	piezoelektrické	absolutní	dotykové	0,1 až 30000	-70 až +540 °C
		absolutní	bezdotykové		-55 až +250 °C
zrychlení (akcelerometry)	kapacitní	absolutní	dotykové	0 až 7000	-20 až +70 °C
	piezorezistivní	absolutní	dotykové		-55 až +165 °C
moderní metody	akustická emise	absolutní	bezdotykové	50 až 900000	-55 až +165 °C
	laserové interferometrické vibrometry	absolutní	bezdotykové	0 až 30 MHz	



## 6 Závěr

Kmitání způsobené budící silou je v procesu obrábění nežádoucím jevem. Zvláštní pozornost je třeba věnovat samobuzenému kmitání. To je nebezpečné hlavně z toho důvodu, že první impulz vedoucí k jeho vzniku není dodnes objasněn. I to je důvod, proč je tento druh kmitání velice obtížné během procesu obrábění zcela eliminovat. Díky znalosti vlivu některých parametrů rezného procesu na samobuzené kmitání ho však lze alespoň omezit.

Pro zajištění stability výrobního procesu, zachování kvality výroby i bezpečnosti práce je nutné provádění pravidelné diagnostiky. V případě měření kmitání se používají měřicí zařízení se snímači, které se dělí podle vlastností i způsobu snímání. Dalšími částmi měřícího řetězce jsou různé zesilovače, integrátory, filtry, kabeláž, atd. Pro správný výsledek měření je důležité, aby tato zařízení byla správně obsluhována, což znamená, že obsluha měřících zařízení by měla být dostatečně proškolená.

Po naměření jsou hodnoty zpracovávány v analyzátoch. Může být provedena frekvenční analýza, která slouží k identifikaci zdroje šíření vibrací tím, že provádí rozklad původního časového průběhu veličin popisující mechanické kmitání na jednotlivé harmonické frekvenční složky. Z těch už je následně zdroj vibrací lépe identifikovatelný.

Aby byla zajištěna přesnost měřících přístrojů je nutná jejich pravidelná kalibrace a cejchování.

Správný měřicí systém by měl technicky, kvalitativně i ekonomicky vyhovovat požadavkům a potřebám uživatele.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Dynamický model soustružení [2].....	- 10 -
Obrázek 2 - Schéma dynamického vyvažování [2].....	- 13 -
Obrázek 3 - Princip polohové vazby [5] .....	- 14 -
Obrázek 4 - Vliv koeficientu tření a rychlosti pohybu [1] .....	- 15 -
Obrázek 5 - Závislost hloubky řezu na úhlu nastavení [1].....	- 19 -
Obrázek 6 - Obrábění kuželu a obrábění jednostranného osazení [1].....	- 19 -
Obrázek 7 - Podélný a příčný směr drsnosti [28].....	- 20 -
Obrázek 8 - Vlnitost povrchu [3] .....	- 20 -
Obrázek 9 - Harmonický kmitavý pohyb [6] .....	- 21 -
Obrázek 10 - Výchylka kmitajícího hmotného bodu [9].....	- 22 -
Obrázek 11 - Vztah mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením [9] .....	- 24 -
Obrázek 12 - Frekvenční omezení při měření [9] .....	- 24 -
Obrázek 13 - Frekvenční analýza [9] .....	- 25 -
Obrázek 14 - Časový průběh FFT [29] .....	- 27 -
Obrázek 15 - Výstup po použití oktávového filtru [29] .....	- 27 -
Obrázek 16 - Měřicí řetězec [9] .....	- 28 -
Obrázek 17 - Absolutní snímač kmitání [7] .....	- 31 -
Obrázek 18 - Pružná a pevná vazba relativního snímače [10] .....	- 31 -
Obrázek 19 - Nejčastější umístění snímačů výchylky [9].....	- 32 -
Obrázek 20 - Bloky obvodů v indukčním snímači [16] .....	- 33 -
Obrázek 21 - Kapacitní snímač polohy [17] .....	- 34 -
Obrázek 22 - Relativní elektrodynamický snímač rychlosti [10].....	- 35 -
Obrázek 23 - Dynamický rozsah snímače [10] .....	- 37 -
Obrázek 24 - Frekvenční charakteristika [9].....	- 37 -
Obrázek 25 - Konstrukce smykového akcelerometru [20].....	- 38 -
Obrázek 26 - Konstrukce tlakového akcelerometru [20] .....	- 39 -
Obrázek 27 - Kapacitní akcelerometr [15] .....	- 40 -
Obrázek 28 - Piezorezistivní akcelerometr [23].....	- 40 -
Obrázek 29 - Příklady snímačů zrychlení Kistler a Brüel & Kjær [30] [31] ...	- 41 -
Obrázek 30 - Kmitočtový rozsah pro různé způsoby upevnění snímače [35]..	- 42 -
Obrázek 31 - Přenosný analyzátor ADASH 4900 [25].....	- 43 -
Obrázek 32 - Budič kmitání Brüel & Kjær LDS V875LS [36].....	- 43 -
Obrázek 33 - Dynamický tlumič kmitání [1] .....	- 44 -
Obrázek 34 - Senzor pro měření akustické emise Kistler 8152C [37].....	- 45 -
Obrázek 35 - Princip akustické emise [38] .....	- 45 -
Obrázek 36 - Laserový vibrometr SIOS LSV NG [39].....	- 46 -

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Parametry snímačů Kistler a Brüel & Kjær [32] [33] [34] .....	- 41 -
Tabulka 2 - Přehled metod a snímačů pro měření kmitání.....	- 48 -

## 7 Použité zdroje

- [1] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [2] JANČINA, Martin. *Vliv kmitání technologické soustavy na jakost polymerních výrobků*. Zlín, 2008. Diplomová. UTB. Vedoucí práce Doc. Ing. Imrich Lukovics, CSc.
- [3] PALÁDI, Ondřej. *Hodnocení tlumících charakteristik strojních součástí z plastů*. Zlín, 2011. Diplomová. UTB. Vedoucí práce Prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.
- [4] WIZOVSKÁ, Lucie. *Chvění při obrábění – principy vzniku, způsoby detekce*. Plzeň, 2011. Bakalářská. ZČU. Vedoucí práce Ing. Lukáš Skopeček.
- [5] ING. FOJTŮ, Petr. *Problematika samobuzeného kmitání při obrábění* [online]. ČVUT [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>
- [6] *Mechanické kmitání* [online]. ČVUT [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: [http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/kmitani\\_mechanika.pdf](http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/kmitani_mechanika.pdf)
- [7] STRACHOŇ, Martin. *Vibrodiagnostika průmyslových strojů*. Zlín, 2009. Diplomová. UTB. Vedoucí práce Doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
- [8] ČSN ISO 20816. *Vibrace - měření a hodnocení vibrací strojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [9] BILOŠOVÁ, Alena a Jan BILOŠ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: ČÁST VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012 [cit. 2020-07-29]. ISBN 978-80-248-2755-1. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2755-1.pdf>
- [10] MÁDL, Jan. *Experimentální metody v teorii obrábění*. 4. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1988.

- [11] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [12] NAVRÁTIL, Miroslav a Oldřich PLUHAŘ. *Měření a analýza mechanického kmitání: metody a přístroje*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [13] ČSN ISO 13373. *Monitorování stavu a diagnostika strojů - monitorování stavu vibrací*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [14] Snímače pro monitorování stavu vibrací strojů. *ElektroPrůmysl* [online]. 2016 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/snimace-pro-monitorovani-stavu-vibraci-stroju>
- [15] VOJÁČEK, Antonín. Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů. *Automatizace* [online]. 2015 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>
- [16] VOJÁČEK, Antonín. Bezkontaktní indukční snímače přiblížení - obecný popis. *Automatizace* [online]. 2014 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/indukcni-snimace-priblizeni-obecny-popis.html>
- [17] VOJÁČEK, Antonín. Bezkontaktní kapacitní snímače přiblížení - obecný popis. *Automatizace* [online]. 2014 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/bezkontaktni-kapacitni-senzory-priblizeni-obecny-popis.html>
- [18] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *AUTOMA* [online]. 2010, **2010**(1), 32-36 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [19] *Snímače polohy* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: [https://vyuka.hradebni.cz/file.php/133/snimace\\_polohy\\_24.pdf](https://vyuka.hradebni.cz/file.php/133/snimace_polohy_24.pdf)
- [20] HANLY, Steve. Piezoelectric Accelerometers: Mysteries On How They Work. *Blog Endaq* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://blog.endaq.com/piezoelectric-accelerometers-how-they-work-and-where-to-buy>

- [21] DILLION, Mike. ICP vs Charge Mode Sensors and Instrumentation. *The Modal Shop* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z:  
<http://www.modalshop.com/calibration.asp?ID=1045>
- [22] HANLY, Steve. Accelerometers: Taking the Guesswork out of Accelerometer Selection. *Blog Endaq* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z:  
<https://blog.endaq.com/accelerometer-selection>
- [23] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 2. díl - Piezorezistivní. *Automatizace* [online]. 2007 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z:  
<https://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601>
- [24] HELEBRANDT, František, Ladislav HRABEC a Jan BLATA. *PROVOZ, DIAGNOSTIKA A ÚDRŽBA STROJŮ* [online]. Ostrava: VŠB, 2013 [cit. 2020-07-29]. ISBN 978-80-248-3028-5. Dostupné z:  
<http://interdiago.vsb.cz/kom/upload/12-Provoz,%20diagnostika%20a%20%C3%BAAdr%C5%BEba%20stroj%C5%AF%2009.pdf>
- [25] *A4900 Vibrio M kapesní průvodce* [online]. ADASH [cit. 2020-07-29]. Dostupné z:  
<https://adash.com/documents/A4900/Adash-A4900-Vibrio-M-kapesni-pruvodce-cz.pdf>
- [26] *Akustická emise* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z:  
<http://www.ped.muni.cz/wphy/projekty/kemis.html>
- [27] Laserové vibrometry. *SVMTECH* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z:  
<https://www.svmtech.cz/cz/laserove-vibrometry>
- [28] GAJDOŠÍK, David. *Měření drsnosti povrchů se zaměřením na měřící techniku Mytutoyo SJ 210*. České Budějovice, 2013. Bakalářská. JU. Vedoucí práce PaedDr. Bedřich Veselý, Ph.D.
- [29] Frekvenční analýza. *EKOSOFTWARE* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z:  
<https://www.ekosoftware.cz/frekvencni-analyza>
- [30] ACCELEROMETER SENSORS. *Brüel & Kjaer* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z:  
<https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/accelerometers>

- [31] Accelerometers from Kistler. *Kistler* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z:  
[https://www.kistler.com/en/products/components/accelerometers/?pfv\\_metrics=metric](https://www.kistler.com/en/products/components/accelerometers/?pfv_metrics=metric)
- [32] *Test & Measurement acceleration, acoustic emission and dynamic force*. Kistler, 2020.
- [33] *Piezoelectric Charge Accelerometer Types 4383 and 4383-V* [online]. Brüel & Kjær [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2041.ashx>
- [34] *Miniature CCLD Accelerometers Types 4394 and 4397-A* [online]. Brüel & Kjær [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2051.ashx>
- [35] *KMITÁNÍ PŘI OBRÁBĚNÍ* [online]. VŠB [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_10.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_10.pdf)
- [36] MEDIUM-FORCE SHAKER LDS V875LS. *Brüel & Kjær* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/products/shakers-and-exciter/LDS-shaker-systems/medium-force-shakers/V875LS>
- [37] ATEX & High Temperature Acoustic Emission Sensor Type 8152. *Kistler* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/product/type-8152c/>
- [38] *Nedestruktivní metody testování - Akustická emise* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=6390&typ=html](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=6390&typ=html)
- [39] Laserový vibrometr. *OptiXs* [online]. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/mereni-povrchu-38k/odmerovani-polohy-116k/laserovy-vibrometr-214p>