

Snadné základy vibrační diagnostiky. Průvodce začátečníka.



Radek Sglunda
Adéla Štefková
Radim Langer



Seznam zkratek

- AVG – průměrná hodnota (z anglického average)
- RMS – efektivní hodnota
(anglicky Root Mean Square, česky střední kvadratická hodnota)
- RPM – počet otáček za minutu (anglicky Revolutions Per Minute)
- * symbol pro násobení (krát)
- μm – mikrometr
- disp. = displacement = dráha
- vel. = velocity = rychlost
- acc. = acceleration = zrychlení

Obsah

Není proč se bát	3
Trocha historie řízení údržby	3
Měření	4
Vyhodnocení hodnot měření	4
Použití norem	4
Co když normy neexistují?	5
A co úspěšnost diagnostiky?.....	5
Časový záznam signálu.....	6
Velikost vibrací	7
Digitalizace signálu.....	7
Vzorkovací frekvence	8
AVG - Průměrná hodnota.....	8
Průměrnou hodnotu AVG si můžeme představit i jinak.	9
Vliv tvaru signálu na průměrnou hodnotu.....	10
Efektivní hodnota RMS.....	11
Přece jen trocha matematiky	12
Nezávislost na délce signálu	12
Co je to frekvence?.....	13
Frekvence otáček stroje.....	14
Snímač vibrací.....	14
Analogie se střídavým napětím v síti.....	15
Frekvence vibrací a co s nimi?.....	15
SI jednotky.....	17
Měření dráhy vibrací	17
Měření rychlosti vibrací	18
Měření zrychlení vibrací.....	19
Stroj je také hmota na pružinách.....	22
Perioda a fáze	22
Detekce a analýza	24
Měření širokopásmové hodnoty.....	24

Druhy snímačů	24
Upevnění snímače na stroj	25
Kde na stroji měřit?	26
Měření otáček	26
Jaké hodnoty měřit na začátku.....	27
Jaké jsou základní poruchy stroje?	27
Jak vyhodnotit naměřené hodnoty?.....	28
Výkonná diagnostika i s jednoduchým měřidlem vibrací	29
Co je rezonance?	30
Elektrická nevyváženost	32
Provádění měření v praxi.	34
Protokoly měření.....	35
Organizace měření a vyhodnocování	35
Kalibrace	36
Časový signál a spektrum.....	37
Pokročilá diagnostika valivých ložisek pomocí demodulace (obálkové analýzy)	40
Poslech vibrací	44
Ultrazvuk.....	44
Přepočty hodnot zrychlení, rychlosti a dráhy	44
Proč měříme nízké frekvence v dráze a vysoké ve zrychlení?	45
Online měření	46
Vyvažování	47
Nastavení základních parametrů měření.....	48
Nastavení snímače	48
Nastavení širokopásmového měření – Overall	48
Časový signál – Time signal.....	49
Spektrum	49
Demod (demodulované) spektrum	50
Závěr	51

Není proč se bát

Jestliže jste postaveni před úkol zavést a provádět ve vašem podniku vibrační diagnostiku, pak v žádném případě nepropadejte panice. Tento obor nabízí jednoduché, ale také složité postupy a metody. Těmi jednoduchými začnete, k těm složitějším se postupně dopracujete. Na začátku budete provádět měření velmi podobná měřením s voltmetrem. Nebudete však měřit napětí, proud, odpor, ale hodnoty vibrací.

Základním úkolem diagnostiky je předcházet neočekávaným poruchám, protože odstranění jejich následků s sebou nese vysoké náklady. Pokud se vám nečekaně zadře valivé ložisko, pak nezůstane jen u něj, ale poškodí se více součástí stroje okolo něj. Proto je to drahé.

Diagnostika vás s předstihem upozorní na zhoršený stav ložiska, vy můžete naplánovat výměnu během pravidelné provozní odstávky a náklady budou mnohem menší. Úkolem diagnostiky je tedy snížení nákladů na údržbu.

Trocha historie řízení údržby

V daleké historii stroje běžely tak dlouho, dokud se neporouchaly. Pak se opravily. Tento přístup měl dvě základní nevýhody. Představme si poměrně malý problém a to opotřebení ložiska. Jeho výměna je snadná a rychlá. Pokud je ale opotřebení veliké, pak se ložisko zadře a celý rotor se přestane otáčet. Rotor třeba váží několik set kilogramů. Jen tak snadno se tedy nezastaví. Jsou přítomné obrovské setrvačné síly, které během několika sekund dokáží zničit celý stroj. Pak je oprava dlouhá a nákladná.

Jiná nevýhoda je náhlé zastavení výrobní linky, opět v důsledku opotřebení jednoho ložiska. Linka např. vyrobí za 1 hodinu výrobky za milion korun. Pokud oprava trvá několik hodin, pak dojde k několika milionové ztrátě.

Následný vývoj systému údržby se pak dostal do stádia preventivních výměn. Každá součástka, která se časem opotřebovává, byla v pevných časových intervalech vyměňována. Uvedeme základní nevýhody. Náklady na údržbu jsou vysoké, protože se pořád něco vyměňuje. Za druhé ve většině případů se součástky vyměňují zbytečně, protože jsou ještě v dobrém stavu. A za třetí – každý zásah údržby není úplně dokonalý. Např. montáž nového ložiska se provede nekvalitně a stav ložiska se bude rychle zhoršovat, takže nakonec stejně dojde k nečekané poruše.

Následně se objevil další systém údržby a tím je prediktivní údržba. Stav a opotřebení stroje se pravidelně měří, a pokud dojde k jeho zhoršení, pak přijde zásah údržby. Tedy až v době, kdy je skutečně potřebný.

Ale jakými metodami stav stroje měřit?

Naprosto dominantní roli v měření stavu stroje má vibrační diagnostika. Umí přesně změřit závažnost všech základních poruch stroje. V dalších kapitolách vysvětlíme vše, co je potřebné pro její používání. Nebudeme zabíhat do teoretických podrobností a matematických vzorců. Pro úspěšné provádění vibračních měření a k následnému vyhodnocení stavu stroje to není potřeba.

Kdysi se akceptovatelné vibrace zkoušely pomocí mince, která se položila na stroj. Pokud spadla, pak byly vibrace považovány za vysoké.

Existuje i mnoho dalších způsobů měření stavu stroje, ale jsou velmi speciální a velmi úzce zaměřené. Žádný z nich nedosahuje výkonu vibrační diagnostiky.

Měření

Co budeme potřebovat? Na prvním místě měřicí přístroj, říkáme mu analyzátor vibrací, snímač vibrací a kabel, kterým snímač propojíme s přístrojem. Takto vybavení vyrazíme mezi stroje. Tomu říkáme pochůzka. Na každém stroji provedeme měření, která se ukládají do paměti přístroje. Po návratu z pochůzky přeneseme naměřená data do počítače a vyhodnotíme je.

Pro provádění vibrační diagnostiky používáme program, který dodal výrobce analyzátoru vibrací. V programu si vytvoříme seznam strojů a budeme zde ukládat naměřená data.

Na pochůzku budeme chodit v pravidelných intervalech, čím častěji, tím lépe. Samozřejmě nelze chodit každý den. Optimální interval je asi 2 týdny. Pokud máme stroje, jejichž provoz je zásadní pro celou továrnu, pak je výhodnější je osadit online systémy, které měří stále.

Vyhodnocení hodnot měření

Nyní máte data v počítači a je potřeba je vyhodnotit. To znamená určit současný provozní stav strojů, a pokud je to potřeba, naplánovat opravu nebo seřízení. Jak na to? Je několik způsobů jak na naměřené hodnoty nahlížet.

Použití norem

Pokud existují nějaké normy, pak je lze použít. Normy nám sdělí hodnoty vibračních mezí. Obvykle pro stav varování a nebezpečí. Při překročení meze varování lze ještě stroj provozovat, ale měli bychom co nejdříve naplánovat zásah údržby. Překročení meze nebezpečí znamená odstávku stroje a jeho opravu. Základní takovou normou je ISO 20816.

Co když normy neexistují?

Pak je zapotřebí jiných postupů.

Pokud máme několik stejných nebo podobných strojů, pak můžeme srovnávat hodnoty mezi nimi. Když vibrace na pěti ze šesti stejných strojů mají hodnotu 2 a na šestém je hodnota 8, pak zjevně na šestém stroji není něco v pořádku.

Další možností – a je to možnost využívaná nejčastěji – je analýza trendu vývoje hodnot vibrací. Pokud je trend dlouhodobě stabilní, pak i provozní stav stroje je stabilní. Tzn. stavy ložisek jsou dobré, nevyváženost je akceptovatelná a tak dále. Jestliže hodnoty vibrací začnou narůstat, pak narůstá nějaké poškození a je potřeba stroj opravit nebo seřídit, např. provést vyvážení.

Trend, neboli srovnávání s hodnotami v minulosti, je nejlepší způsob vyhodnocení provozního stavu. Vidíme již malý nárůst, to znamená, že i zhoršení stavu je teprve malé a máme dostatek času naplánovat zásah údržby.

A co úspěšnost diagnostiky?

Je to podobné jako v péči o lidské zdraví. Chodíme na pravidelné preventivní prohlídky, tzn. něco jako pochůzky. Výsledky prohlídek jsou skvělé, jsme zcela zdraví. A přesto najednou máme zdravotní problém, na který se při prohlídkách nepřišlo.

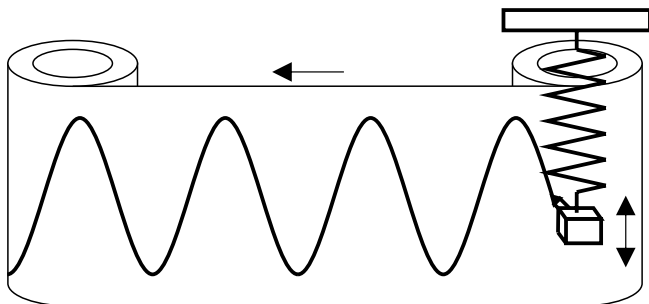
Stejně je to s vibrační diagnostikou. Nikdy nebude mít stoprocentní úspěšnost. Někdy je závada příliš skryta uvnitř stroje a ve vibracích se nemusí snadno nalézt. Nebo jindy byl její rozvoj velmi rychlý a při minulé pochůzce bylo ještě vše v pořádku.

Může se také stát, že naměřené hodnoty nám ještě nepřípadají příliš vysoké a stroj dále provozujeme. Najednou dojde k neočekávané poruše. Pak je zapotřebí meze varování a nebezpečí snížit. Takže i neočekávaná porucha má kladný význam pro budoucí vyhodnocování.

Vibrační diagnostika má při péči o stav strojů naprosto zásadní význam. Neexistuje jiný typ diagnostiky, který umí nalézt tak široké spektrum závad a opotřebení.

Časový záznam signálu

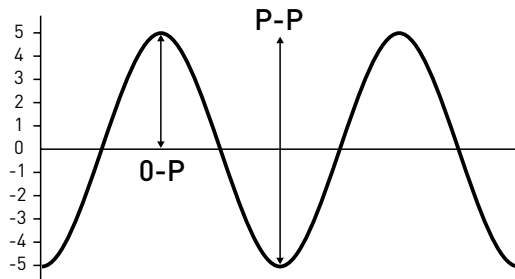
Vibrace jsou kmitavý opakovaný pohyb hmoty mezi dvěma krajními polohami. V této definici není nic nejasného. Důležité je, zda velikost vibrací (tj. vzdálenost krajních poloh) je akceptovatelná pro provoz stroje. Místo velikosti vibrací budeme říkat amplituda vibrací. Důležitá je také rychlost opakování kmitavého pohybu.



Pružina a na ní zavěšené závaží jsou dobrým příkladem pro pochopení vibrací a jejich vlastností. Jestliže pružinu natáhneme a uvolníme, začne závaží kmitat nahoru a dolů. Kmitání se v důsledku odporu vzduchu a vnitřního tření pružiny bude snižovat, až se úplně zastaví. Představme si, že tyto vlivy neexistují a kmitání se nesnižuje. Na závaží upevníme pero a za něj dáme pás papíru. Nyní natáhneme a uvolníme pružinu a současně začneme pohybovat s pásem papíru směrem doleva. Pero na závaží nám vykreslí poměrně pěknou křivku. Tento tvar vibrací je naprosto základním tvarem a matematicky odpovídá funkci sinus. Záznamu na papíru budeme říkat časový záznam vibrací a z něj můžeme vyhodnotit další užitečné parametry vibrací.

Velikost vibrací

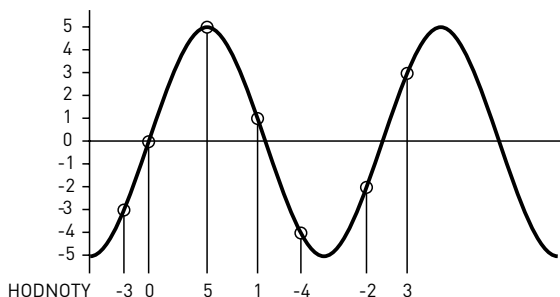
Velikost vibrací snadno změříme pomocí amplitudy 0-P. Říkáme jí špičková hodnota a je to vzdálenost od střední hodnoty signálu (ta odpovídá klidové poloze závaží) do maximální hodnoty. Na obrázku je amplituda 0-P rovna číslu 5.



Pro úplnost bychom měli zmínit také hodnotu P-P, což je vzdálenost mezi maximálními hodnotami. Pro symetrický tvar signálu je P-P hodnota dvojnásobkem 0-P hodnoty. Ale mnoho signálů je nesymetrických a tento vztah neplatí.

Digitalizace signálu

Úkolem digitalizace je převod analogového signálu na čísla. Na obrázku je jen příklad několika odečtených hodnot v signálu. Jsou to amplitudy odečtené ve zvolených časech. Hodnoty jsme odečetli v nepravidelných intervalech a odečetli jsme jich jen málo. Pro skutečné zpracování signálu jich musíme odečíst mnohem více.



Vzorkovací frekvence

Především musíme odečítat hodnoty v pravidelných (stejných) časových intervalech. Např. budeme odečítat hodnoty s intervalem 1 ms ($1 \text{ ms} = 0,001 \text{ sec}$). Pokud délka signálu je např. 1 sec, pak získáme 1 000 vzorků, tedy řadu 1 000 čísel. V budoucnu budeme jednotlivé odečty v časovém signálu vždy nazývat jako vzorky. Jestliže máme dostatečný počet vzorků, pak na ně můžeme aplikovat různé matematické vzorce a můžeme počítat další rozmanité výsledky.

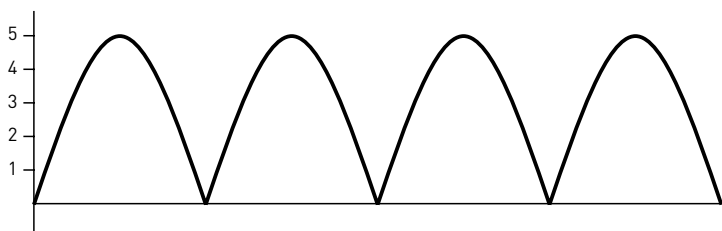
AVG - Průměrná hodnota

Zatím umíme měřit velikost vibrací jako hodnoty 0–P a P–P. Velikost vibrací by se také dala měřit jako průměrná hodnota všech naměřených vzorků. Průměrná hodnota AVG se počítá jako součet hodnot všech vzorků a vydělí se jejich počtem. Je to totéž, jako průměrná váha jednoho jablka v košíku. Nejprve sečteme váhy všech jablek a součet vydělíme jejich počtem.

Nyní tedy zkusíme sečíst všechny hodnoty vzorků a vydělíme počtem. To asi ale nebude příliš užitečné. Signál je symetrický okolo nuly, tzn. že průměrná hodnota bude nula. Něco musíme udělat jinak.

Řešením je promítnout průběh signálu jen do kladné poloviny. Toho dosáhneme tak, že budeme pracovat s absolutními hodnotami vzorků. Ty převracejí záporné hodnoty do kladných, např. absolutní hodnota z -3 je $+3$. Absolutní hodnota z $+3$ zůstává $+3$, zde se nic nemění.

Tvar původního signálu se po převodu vzorků na jejich absolutní hodnoty změní na tvar na obrázku.



Jestliže vypočteme průměrnou hodnotu AVG signálu z obrázku, dostaneme 3,2. Pro funkci sinus platí, že průměrná hodnota AVG je rovna $0,64 \times$ špičková hodnota 0–P. Na obrázku je špičková hodnota 0–P rovna 5 a průměrná hodnota je $0,64 \times 5 = 3,2$.

!!! Pozor, pro signály, které nemají tvar funkce sinus, tento přepočítání neplatí.

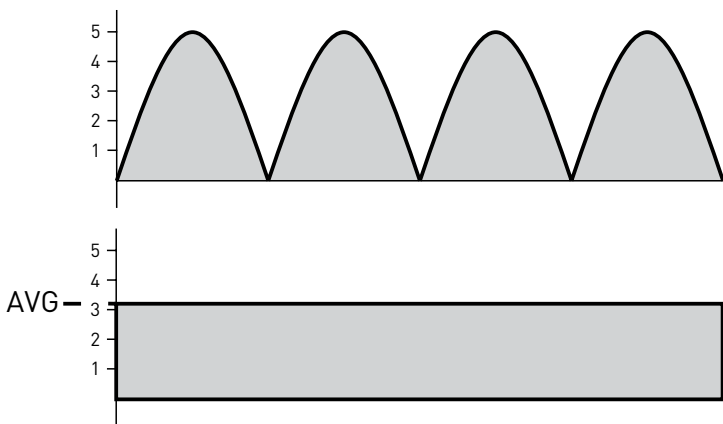
Pro zvědavé povahy uvádíme i matematický vzorec pro spojitý průběh signálu, který si označíme jako $f(x)$.

$$\text{Pak } \text{AVG} = \frac{\int_0^T f(x) dx}{T}$$

$$\text{V našem případě kdy } f(x) = |\sin(x)| \text{ pak } \text{AVG} = \frac{\int_0^T |\sin(x)| dx}{T}$$

Průměrnou hodnotu AVG si můžeme představit i jinak.

Vyplňme a změřme plochu pod funkcí sinus. Matematicky jde o výpočet určitého integrálu, jak jsme zmínili výše. Nyní nakreslíme obdélník, který má stejnou délku jako záznam a nějakou výšku. Plocha obdélníka se vypočítá jako délka vynásobená výškou. Teď je naším úkolem najít takovou hodnotu výšky, aby plocha obdélníka byla rovna ploše pod funkcí sinus.



Tato hledaná hodnota bude rovna právě 3,2 ($0,64 \cdot 5$). Jen opět připomínám, že pro signály, které nemají tvar funkce sinus tento přepočít neplatí a může být jakýkoliv jiný.

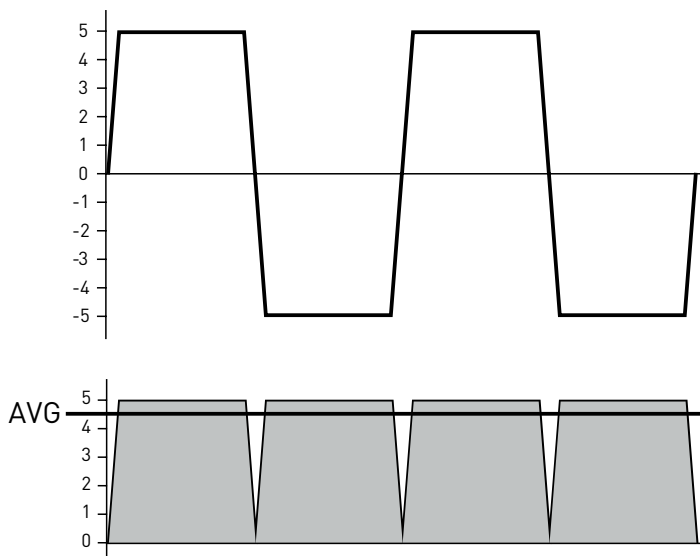
Opět se ještě vrátíme k příkladu s jablky. Máme jich např. 20 různě těžkých a jejich váha dohromady je 4 kg. Průměrná váha je $4 \text{ kg} / 20 = 200 \text{ g}$. Kdybychom vzali 20 jablek, každé o průměrné váze 200 g, pak dohromady budou také vážit 4 kg. To je tentýž přístup, jako nahrazení sinusového (nepravidelného) průběhu jen signálem, kde všechny amplitudy jsou rovny průměrné hodnotě. Tedy je to rovná čára.

Vliv tvaru signálu na průměrnou hodnotu

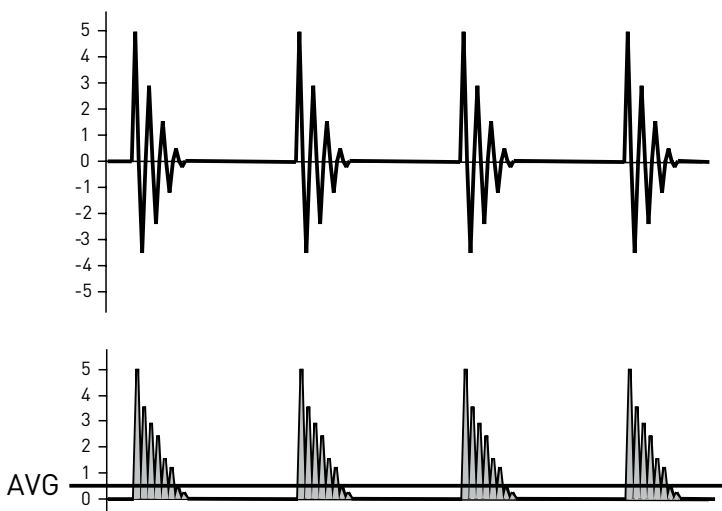
Vysvětlíme to na následujících příkladech.

Případ sinusového průběhu jsme již popsali. Průměrná hodnota je rovna hodnotě 0-P vynásobené číslem 0,64.

Když počítáme průměrnou hodnotu z obdélníkového průběhu, pak po přepočtu na absolutní hodnotu vidíme skoro totéž jako po přepočtu na obdélník. Z toho vyplývá, že průměrná hodnota AVG je skoro stejná (jen o málo menší) jako hodnota 0-P.



V případě, že signál obsahuje jen rázy, je situace opačná. Plocha uvnitř rázů je malá a tak je malá i výška obdélníku pro odvození průměrné hodnoty AVG.



Ukázali jsme tedy, že mezi průměrnou a špičkovou hodnotou není žádný pevný vztah.

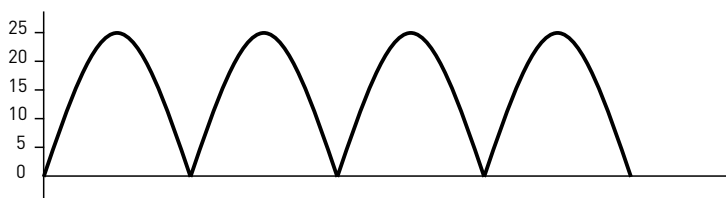
Efektivní hodnota RMS

Průměrná hodnota by jako ukazatel velikosti vibrací fungovala, ale v praxi se nepoužívá. Používá se podobná hodnota, které říkáme RMS (anglicky – Root Mean Square, česky – střední kvadratická hodnota).

Její výhodou je, že odpovídá energii obsažené v signálu. Pod pojmem energie si představme velikost sil, které následně způsobují vibrace.

Např. při nevyváženosti je to odstředivá síla, která nám přináší problémy, protože třese celým strojem, namáhá upevňovací šrouby a namáhá ložiska. Proto se snažíme velikost sil co nejvíce snížit. A to je ekvivalentní snaze o snižování vibrací. Pokud snížíme vibrace, tak jsme snížili síly působící na stroj.

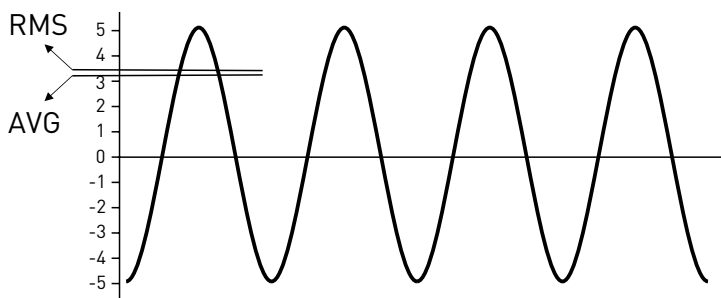
Jak se RMS počítá? Je to podobné jako průměrná hodnota, jen signál tzn. všechny vzorky nejdříve umocníme na druhou. Tím dosáhneme současně jejich transformace do kladných hodnot. Poté vypočítáme odmocninu z průměrné hodnoty.



Na obrázku vidíme průběh signálu $\sin^2$. Maximální amplituda vzrostla na 25. To odpovídá 5^2 , kdy hodnota 5 bylo maximum v původním signálu. Pak vypočteme průměrnou hodnotu a tu odmocníme.

Jestliže průběh signálu odpovídá funkci sinus, pak RMS hodnota se rovná maximální hodnotě 0–P vynásobené 0,71. Při špičkové hodnotě 5 tak dostáváme $RMS = 3,55$. Lze to vyjádřit zase jako obdélník o výšce 3,55 a šířce rovné trvání signálu.

Opět připomínám, že přepočítávací konstanta 0,71 platí jen pro sinusový průběh. Vysvětlení je stejné jako jsme ukázali u průměrné hodnoty.



Přece jen trocha matematiky

Nechť máme digitalizovaný signál y . Tzn. máme posloupnost vzorků $\{y_i\}_{i=1}^N$, čili N hodnot vzorků.

$$\text{Pak} \quad \text{AVG} = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i|}{N} \quad \text{a} \quad \text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N}}$$

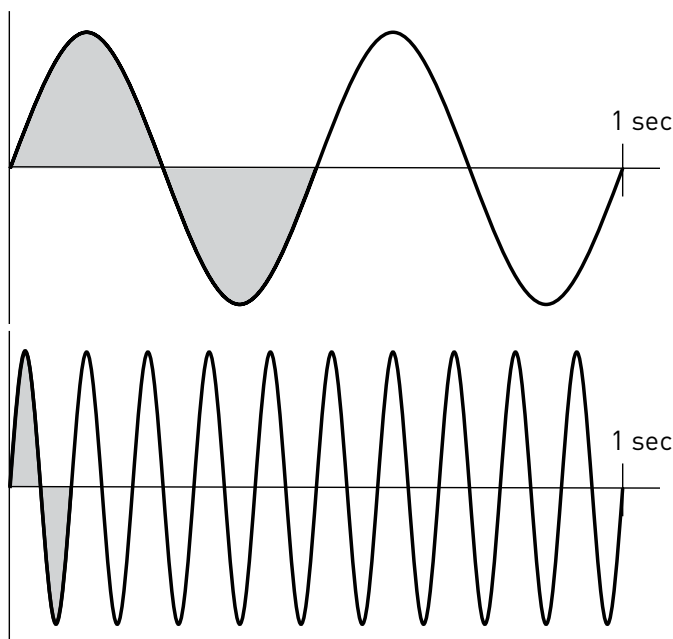
Nezávislost na délce signálu

Pro zvědavé čtenáře jen doplním, že jak hodnota AVG, tak i RMS nezávisí na délce trvání signálu. Jinými slovy delší signál nám nedá větší hodnoty. Důvod je jasný, jedná se o průměrné hodnoty (dělíme počtem vzorků N). Pokud má signál více

vzorků, pak jejich součet sice bude větší, ale po vydělení počtem vzorků dostaneme stejnou hodnotu, jako pro signál kratší. Hodnoty RMS i AVG budou stabilní. Pro stroje s otáčkami nad 10 Hz (600 RPM) stačí měřit signál o délce 1 sec. Pro nízko otáčkové stroje pak měříme déle. Signál by vždy měl obsahovat alespoň 10 otáček. To znamená při otáčkách 2 Hz měříme alespoň 5 sec (jedna otáčka trvá 0,5 sec).

Co je to frekvence?

Různá tuhost pružiny a různá hmotnost závaží ovlivňují jak amplitudu, tak frekvenci vibrací. Frekvenci rozumíme, kolik period pohybu nahoru a dolů provede závaží za určený čas, to je obvykle 1 sekunda.



Na obrázku vidíme dva časové záznamy vibrací. Jejich délka je 1 sec. Nahoře závaží během 1 sec dvakrát dosáhlo minimální polohy a dvakrát maximální. Dole byl pohyb závaží rychlejší a dosáhl desetkrát minima a desetkrát maxima. Je patrné, že závaží pořád opakuje pohyb nahoru a dolů. Jaký je základní (časově nejkratší) pohyb, který se periodicky opakuje? Tento základní pohyb jedenkrát nahoru a dolů je na obrázku vyšrafován. Říkáme mu perioda. Protože celý záznam trvá 1 sec, je patrné, že perioda pomalejších vibrací nahoře trvá 500 ms. Perioda rychlejších vibrací dole trvá 100 ms.

Frekvence se počítá v jednotce Hz a vypovídá, kolikrát za 1 sec se perioda pohybu opakuje. V našem případě nahoře je frekvence rovna 2 Hz (2krát perioda) a dole je to 10 Hz (10krát perioda). Jestliže si délku periody označíme T, pak frekvence:

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{pokud } T \text{ je v sekundách})$$

anebo alternativně:

$$f = \frac{1000}{T} \quad (\text{pokud } T \text{ je v milisekundách}).$$

Frekvence otáček stroje

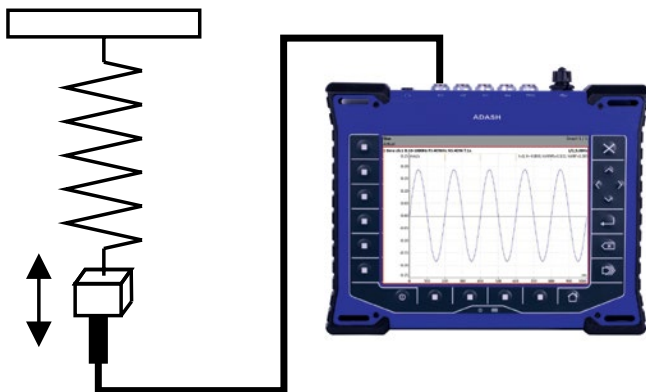
I otáčky jsou opakovaným pohybem, kdy základní perioda je jedno otočení hřídele. Frekvenci otáček lze vyjádřit také v Hz, pak je to počet otočení za 1 sec. Obvyklejší je měření ot/min (anglicky RPM), tato hodnota udává kolikrát se hřídel otočí za jednu minutu. Přepočet je zřejmý:

$$\text{ot/min} = \text{Hz} * 60 \quad \text{a} \quad \text{Hz} = \frac{\text{ot/min}}{60}$$

Číslo 60 je tam, protože minuta má 60 sekund.

Snímač vibrací

Snímač vibrací je zařízení, které převádí vibrace na elektrický signál.



Na obrázku vidíme snímač připevněný na závaží. Pokud závaží rozkmitáme, pak se na výstupu snímače objeví elektrický signál, který měříme přístrojem. Přístroj pak ukáže průběh vibrací, stejně jako jsme průběh předtím kreslili na papír.

Analogie se střídavým napětím v síti

Je to podobné jako měření napětí v síti. To má také amplitudu, jejíž RMS hodnota je 230 V (v USA je to 110 V).

V síti má napětí průběh odpovídající funkci sinus, takže už dokážeme spočítat, že špičková hodnota $0-P$ v síti je $230/0,71 = 324$ V.

Frekvence sítě je 50 Hz (v USA 60 Hz), tzn. délka jedné periody je 20 ms (v USA 16,7 ms).

Frekvence vibrací a co s nimi?

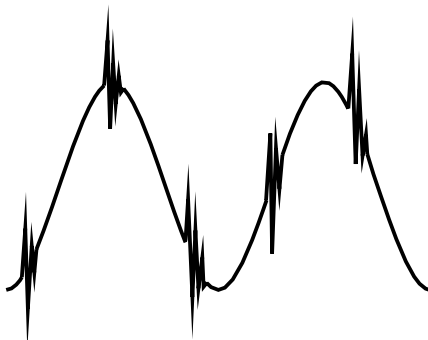
Pojem frekvencí jsme si již vysvětlili. Jaký je jejich význam pro diagnostiku stroje? Je naprosto zásadní. Různé poruchy se totiž ve vibracích projevují na různých frekvencích. Na jakých? To vysvětlíme později.

Také již víme, že pro základní měření mohutnosti vibrací se používá měření RMS hodnoty. Tuto hodnotu můžeme měřit na vibracích libovolného průběhu, nejen na průběhu sinus, který jsme používali pro vysvětlení základních pojmů.

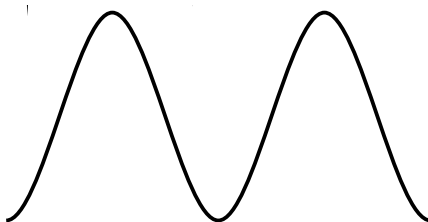
Představme si, že snímač vibrací umístíme na membránu reproduktoru a pustíme hudbu. Membrána se chvěje a my hudbu slyšíme. Pokud signál ze snímače připojíme do analyzátoru vibrací, pak snadno změříme RMS hodnotu. Hudba obsahuje široký rozsah frekvencí. Jsou tam basové frekvence, střední frekvence a vysoké frekvence. Na audio zesilovači máme obvykle tři potenciometry, kterými si nastavujeme amplitudu (tedy sílu) nízkých, středních a vysokých frekvencí. Pokud nastavíme basy na maximum a střední a vysoké frekvence na minimum, pak slyšíme jen hluboké basové tóny. Pokud nyní změříme RMS hodnotu, pak je to hodnota vibrací na nízkých frekvencích. Nyní nastavíme basy a středy na minimum a výšky na maximum, pak slyšíme a měříme jen vibrace na vysokých frekvencích.

Vibrační diagnostika při měření RMS hodnot pracuje na stejném základu. Některé poruchy se projevují na nízkých frekvencích (to je např. nevyváženost), jiné poruchy se projevují na vysokých frekvencích (to je např. stav ložiska).

Jestliže v přístroji nastavujeme parametry měření RMS hodnoty, pak vždy musíme nastavit jaké frekvence chceme měřit, a tedy je v signálu ponechat a které frekvence nechceme měřit a tedy je ze signálu vyloučit. Definujeme vždy pásmový filtr s frekvencí F_{min} a F_{max} . To znamená, že se ze signálu odstraní všechny frekvence nižší než F_{min} a všechny frekvence vyšší než F_{max} .



Na obrázku je jednoduchý průběh signálu, který obsahuje sinusovou složku na nízké frekvenci a vibrační rázy, které jsou na vysokých frekvencích. Jestliže nastavíme měření frekvence tak, aby nízká frekvence byla propuštěna a vysoká odfiltrována, pak budeme měřit signál, který vypadá takto:



Pokud odfiltrujeme nízké frekvence a propustíme rázy, pak budeme měřit signál, který vypadá takto:



Pro odfiltrování vysokých frekvencí nastavíme např.:

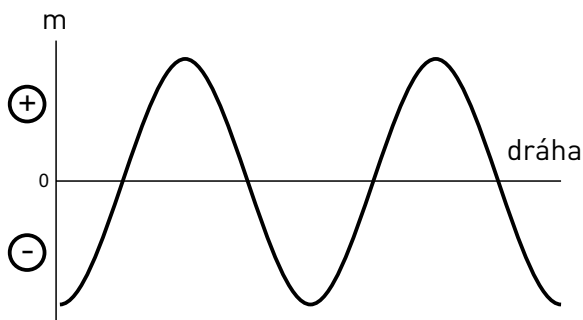
$F_{min} = 10 \text{ Hz}$ a $F_{max} = 500 \text{ Hz}$. Pro odfiltrování nízkých frekvencí nastavíme např.: $F_{min} = 5\,000 \text{ Hz}$ a $F_{max} = 25\,000 \text{ Hz}$.

SI jednotky

Každé měření má svou fyzikální jednotku. Např. hmotu měříme v kilogramech, čas měříme v sekundách. Fyzikální jednotky používané v různých částech světa se mohou lišit. Aby se dosáhlo jisté kompatibility, byla zavedena mezinárodní soustava jednotek SI pro zajištění stejných hodnot měření daných veličin bez ohledu na místo na světě. Mezi základní SI jednotky patří sekunda (s, sec, jednotka času), metr (m, jednotka délky), kilogram (kg, jednotka hmotnosti) a další.

Měření dráhy vibrací

Následující části budou na pochopení o něco náročnější, ale určitě se nám to podaří.



Vraťme se zpět k příkladu pružiny a závaží, na které jsme upevnili pero. Na pohybující se papír pak pero vykreslilo průběh chvění. Ale co to je za chvění? Pokud chceme nějaký proces měřit, tak vždy potřebujeme fyzikální jednotku, která k procesu patří. Jaká jednotka patří k průběhu chvění na pružině? Je zcela patrné, že pero vykresluje dráhu (pozici) závaží v čase.

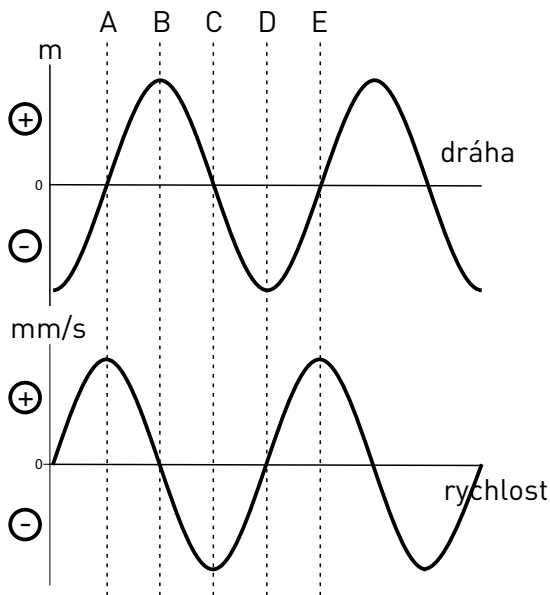
Jednotka SI pro dráhu je metr (m). Také ji můžeme přepočítat na cm, mm, μm , palce nebo milli inch (1 mil = 0,001 palce).

Pokud se závaží pohybuje nahoru, budeme tento směr označovat jako plus (pozitivní). Směr dolů budeme označovat jako mínus (negativní). Vychází to z toho, že hodnoty nahoře jsou kladné a hodnoty dole záporné.

Měření rychlosti vibrací

Můžeme také měřit jinou veličinu. Závaží se pohybuje opakovaně nahoru a dolů. Připojme k závaží tachometr. Bude podobný jako v automobilu. Rozdíl bude ten, že nula bude uprostřed. Ručička se může vychylovat nahoru a dolů podle toho, zda se závaží pohybuje nahoru (to je plus směr) nebo dolů (to je mínus směr). Kdyby takový tachometr byl v automobilu, pak by ukazoval rychlost jak při pohybu dopředu, tak při pohybu dozadu.

Je jasné, že v případě pružiny se rychlost bude také měnit – nebude stabilní. Kdy bude rychlost největší? To je jasné, nejrychleji se závaží pohybuje při průchodu střední polohou. A kdy bude nejmenší? Bude nejen nejmenší, bude přímo nulová. Nastane to při dosažení maximální nebo minimální polohy. Opět je to snadno představitelné. V těchto krajních polohách se závaží úplně zastaví, protože potřebuje změnit směr pohybu.



Takže není nijak překvapivé, že pokud tvar dráhy odpovídá funkci sinus, pak tvar průběhu rychlosti bude také odpovídat funkci sinus. Na obrázku vidíme průběh dráhy a pod ním průběh rychlosti. Vidíme, že průběh rychlosti je o něco posunutý doleva. Je to přesně o čtvrtinu periody. Má-li perioda délku T , pak posun bude o $T/4$ doleva, tedy zpět v čase. Také bychom mohli říci, že průběh rychlosti je posunutý o $3/4 \cdot T$ doprava. To je také pravda. Můžeme odečítat posun oběma směry, protože pohyb je pravidelně se opakující.

Jaká bude fyzikální jednotka? Jedná se o rychlost, takže SI jednotka je m/s. Pro vibrace bychom ale dostávali v m/s velmi malé hodnoty. V praxi se používá mm/s nebo palec/s.

Na obrázku jsou vyznačeny časové pozice A, B, C, D, E. V pozici A letí závaží nahoru (čili do plusové části), právě prochází střední polohou a má maximální rychlost. Ta je také plusová (směr nahoru).

Po opuštění pozice A se závaží blíží do pozice B. Jeho výchylka od středové polohy se stále zvyšuje. Rychlost postupně klesá, protože v pozici B se pohyb zastaví. Rychlost je nulová, výchylka je maximální.

Po opuštění pozice B se blíží závaží do pozice C, kdy prochází střední polohou. Od B do C se rychlost zvyšuje v mínusovém směru, tzn. závaží se pohybuje dolů. V bodě C je negativní rychlost nejvyšší.

Po pozici C se závaží blíží do pozice D, což je maximální negativní výchylka (směrem dolů). Negativní rychlost se snižuje. Tam se závaží zastaví a otáčí směr pohybu, tedy rychlost je nulová.

Po opuštění pozice D se pohybuje závaží směrem nahoru, čili rychlost je pozitivní. Závaží se dostane do střední polohy E a celý proces se opakuje.

Co se hodnot rychlosti týče, tak platí, že jsou pozitivní (plusové), když se závaží pohybuje nahoru (tento pohyb jsme si označili jako plusový). Hodnoty rychlosti jsou negativní (mínusové), pokud se závaží pohybuje dolů.

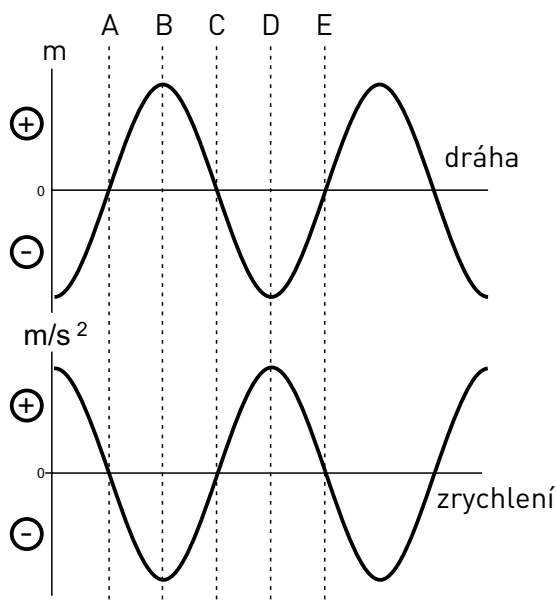
Měření zrychlení vibrací

Poslední používanou veličinou je zrychlení. Fyzikální podstata zrychlení je změna rychlosti. Pokud padá kámen, pak padá stále rychleji, protože na něj působí gravitační síla. A to je velmi dobrý příklad. Aby předmět zrychloval nebo zpomaloval svůj pohyb, musí na něj působit síla. Aby zrychloval automobil, musí působit síla motoru (to je pozitivní–plusové zrychlení ve směru rychlosti, tzn. ve směru pohybu). Naopak, aby zpomaloval, musí působit síla brzd (to je negativní – mínusové zrychlení proti směru rychlosti, tzn. proti směru pohybu).

Také naše závaží zavěšené na pružině je při kmitání vystaveno síle, kterou pružina vytváří. Pokud pružinu stlačíme, pak pružina vytvoří sílu a snaží se dostat zpět do střední polohy. Ale setrvačná síla daná zavěšeným závažím způsobí, že závaží projde střední polohou a začne pružinu natahovat. Natažená pružina opět vytvoří sílu opačného směru, která chce dostat závaží zpět do střední polohy. Tento proces se stále opakuje.

Síla je opravdu ekvivalentem zrychlení. Platí pro ni vzorec $F = m \cdot a$. Hmotnost m je konstantní, takže průběh zrychlení odpovídá průběhu síly.

Na obrázku vidíme průběh zrychlení a dráhu. Vidíme, že průběh zrychlení je posunutý o polovinu periody. Srovnáním s průběhem rychlosti je vidět, že průběh zrychlení je posunutý o čtvrtinu periody doleva čili zpět v čase. Není překvapením, že průběh zrychlení opět odpovídá funkci sinus.



Tady je pochopení o něco složitější, ale pojďme do toho. Popíšeme jednotlivé pozice A až E a procesy mezi nimi.

- A Závaží prochází střední polohou, má maximální rychlost. Ta před A stoupala a za A bude klesat. V tu chvíli nepůsobí žádná síla, tedy zrychlení je rovno nule. Jestliže si chceme pozici A představit v automobilu, tak před A tiskneme plyn a zrychlujeme, v A přemísťujeme nohu z plynu na brzdu a za A tiskneme brzdu a zpomalujeme.
- A–B Závaží se pohybuje nahoru a stlačuje pružinu. Ta vytváří sílu směrem dolů, a to sílu tím větší, čím více je stlačena. Pohyb závaží je pozitivní (pohyb nahoru), zrychlení (t.j. síla) je negativní (t.j. proti pohybu).
- B Síla stlačené pružiny zastavila pohyb nahoru. Závaží mění směr pohybu, rychlost je nulová. Pružina je stále však stlačena a vyvíjí sílu směrem dolů, která zahájí pohyb závaží směrem dolů (negativní pohyb).

- B - C Síla stlačené pružiny stále tlačí závaží dolů a zrychluje jeho pohyb (negativní směr). Současně však tato síla postupně klesá, méně stlačená pružina vyvíjí menší sílu. Závaží tedy zrychluje méně, ale stále ještě směrem dolů.
- C Závaží prochází střední polohou. To je neutrální stav pružiny, kdy není ani stlačená ani natažená a nevytváří žádnou sílu. Zrychlení je tak také nulové.
- C - D Setrvačná síla udržuje pohyb závaží směrem dolů (negativní) a pružina se natahuje. Ta se brání a vyvíjí sílu směřující nahoru proti pohybu dolů. Nyní vlastně nastává souboj dvou sil, setrvačné a odporu pružiny. Síla vytvářená pružinou stále snižuje sílu setrvačnou až ji úplně zruší. Snaží se vrátit do střední neutrální polohy.
- D Síla odporu natahované pružiny zastavila pohyb dolů. Rychlost je nulová, mění se směr pohybu. Natažená pružina stále vytváří pozitivní sílu směrem nahoru a závaží se tak začíná pohybovat také směrem nahoru.
- D - E Zde závaží zrychluje směrem nahoru.
- E Zde se dokončí celá perioda pohybu. Setrvačná síla začne pružinu smršťovat. Dostali jsme do totožné situace jako v pozici A.

Pro dráhu, rychlost a zrychlení budeme používat běžně používané anglické zkratky:

dráha = displacement = disp.,

rychlost = velocity = vel.,

zrychlení = acceleration = acc.

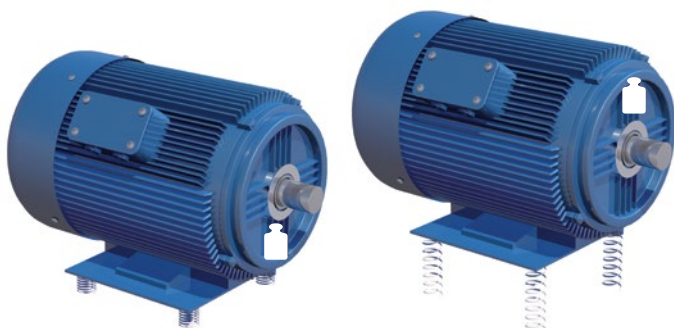
Čili např. $vel_{RMS} = 3 \text{ mm/s}$ znamená, že RMS hodnota rychlosti vibrací je 3 mm/s.

Stroj je také hmota na pružinách

Zatím jsme příklady vibrací ukazovali na závaží a pružině. Má to nějakou souvislost se skutečnými vibracemi na stroji?

Ano, je to naprosto totéž. Stroj představuje závaží a k základu je upevněn na pružinách. Pokud jsou to silent bloky, pak vidíme skutečné pružiny. Ale pokud je stroj upevněn šrouby, tak ty mají také svou pružnost a mohou se prodlužovat a zkracovat. Jen je k tomu potřeba velké síly.

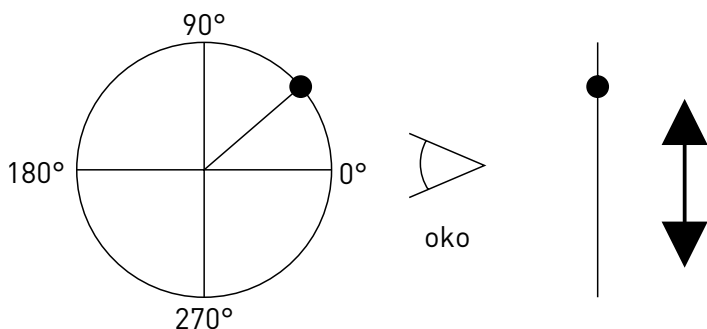
Silou, která způsobuje vibrace stroje, je v naprosté většině případů nevyváženost. Na rotoru existuje těžký bod a při rotaci vytváří odstředivou sílu. A ta pak pohybuje (vibruje) strojem.



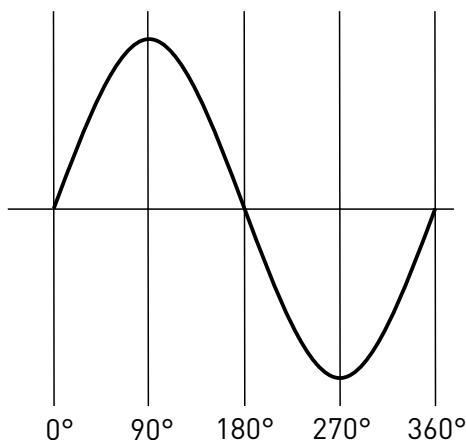
Bílá ikona závaží ukazuje polohu těžkého bodu při stlačení a natažení pružin.

Perioda a fáze

V popisu průběhu dráhy, rychlosti a zrychlení jsme potřebovali vyjádřit posun jednoho signálu vůči druhému. Takovému posunu se říká fázový posun. Použili jsme vyjádření jako čtvrtina periody nebo polovina periody. Posun by se dal definovat přímo v čase, v sekundách. To ale přináší nevýhodu, že perioda různých frekvencí je různě dlouhá. V praxi se proto používá jiný přístup.



Představme si, že kroužíme kuličkou přivázanou na provázku. Při pohledu zepředu vidíme, že kulička krouží kolem středu. Při pohledu ze strany, ale vidíme kuličku vibrující mezi dvěma krajními polohami. Vypadá to stejně jako závaží na pružině. Když změříme průběh tohoto pohybu, dostaneme opět tvar odpovídající funkci sinus.



Tento přístup nám umožňuje si představit jednu periodu jako úhlovou hodnotu. Kulička během jedné periody oběhne kruh jedenkrát kolem dokola. A kruh má 360 stupňů. Takže i délku jedné periody si lze představit jako 360 stupňů. Výhodou tohoto přístupu je to, že nezávisí na frekvenci. Tedy je lhostejné, jak dlouho jedna perioda trvá v sekundách. Úhlově prostě vždy trvá 360 stupňů. Jestliže pak chceme říci, že průběh rychlosti je posunutý o čtvrtinu periody směrem doleva (tedy proti času), pak řekneme, že je posunutý o -90 stupňů. 90° je čtvrtina z 360° a znaménko vyjadřuje směr proti času.

Nyní tedy víme, že posun fáze se udává ve stupních.

Detekce a analýza

Diagnostika má v praxi dva základní úkoly. Prvním je zjištění, že provozní stav stroje se změnil. Tomu říkáme detekce problému. Druhým je pak hlubší analýza vibrací a zjištění, jaká závada či opotřebení se na stroji objevily.

Detekční měření musí být jednoduchá a rychlá, abychom mohli měřit stroje co nejčastěji. Stačí používat měření širokopásmových hodnot. Význam slova širokopásmová je, že měření zahrnuje široké pásmo frekvencí. Měřená hodnota pak může být RMS (ta je nejčastěji používána), 0–P, P–P a další.

Měření širokopásmové hodnoty

Jestliže chceme někomu sdělit, jakou jsme naměřili širokopásmovou hodnotu, vždy musíme sdělit čtyři parametry. Pokud řekneme, že jsme naměřili hodnotu 4,8, tak je to naprosto bezcenné. Pokud přidáme jednotku a je to 4,8 mm/s, už je to o něco lepší. Musíme ještě přidat informaci, jaký typ výpočtu jsme použili (např. RMS). Tedy dostáváme 4,8 mm/s_{RMS}. A čtvrtou informací je to, v jakém frekvenčním pásmu jsme měřili, tedy jaký pásmový filtr byl použit (např. 10–1 000 Hz).

Správné vyjádření tedy je 4,8 mm/s_{RMS} v pásmu 10–1 000 Hz.

Vždy pamatujme na toto pravidlo čtyř.

Pokud se někdy v textu nebo u grafů typ výpočtu neuvádí, pak je lhostejné, zda měříme RMS, nebo 0–P.

Druhy snímačů

Když víme, že můžeme měřit dráhu, rychlost a zrychlení vibrací, měli bychom i říci, čím vibrace měříme v praxi. V drtivé většině případů se pro měření používají snímače zrychlení. Jsou cenově dostupné a umí měřit ve frekvenčním rozsahu až do desítek kHz. Výhodou je, že poměrně snadno umíme převést signál zrychlení na rychlost i dráhu. Jsou tam sice některé komplikace pro velmi nízké a velmi vysoké frekvence, ale to rozebereme později.

Upevnění snímače na stroj

Abychom vibrace stroje měřili přesně, pak snímač musí být na stroj dobře upevněn. Musíme především zajistit opakovatelnost měření. To znamená, že vždy musíme měřit na stejném místě a snímač musí být vždy upevněn stejným způsobem. V žádném případě nemůžeme snímač držet v ruce a na povrch stroje ho jen přitisknout. Způsob upevnění ovlivňuje především měření na vysokých frekvencích. V praxi se používá upevnění pomocí magnetu. Ale magnet nelze jen tak přitisknout na povrch stroje. Ten není rovný a snímač by se při měření mohl houpat. To by zcela znehodnotilo naměřenou hodnotu. Nebyli bychom ani schopni opakovat měření a naměřit stejnou hodnotu. Proto se na stroj lepí měřicí podložky. Jsou nerezové, magnetické a mají zcela rovný povrch. Snímač s magnetem pak na podložce drží dokonale. Opakovatelnost měření je zajištěna. Také je zajištěno, že měříme vždy na stejném místě.



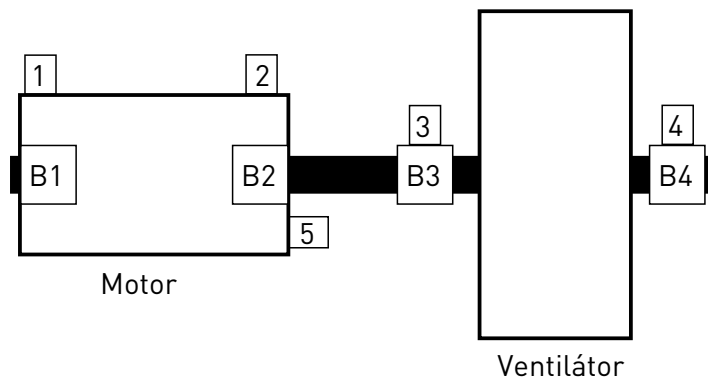
Kde na stroji měřit?

Nejdříve vysvětlíme, co je to radiální a axiální směr měření, tzn. v jakém směru upevníme snímač na stroj.

Radiální směr je směr kolmý k ose otáčení, tedy kolmý k hřídeli. Při horizontální ose je celkem lhostejné, zda jej upevníme vertikálně, horizontálně nebo šikmo. Při vertikální ose to nemá žádný vliv.

Axiální směr je směr rovnoběžný s osou otáčení, čili rovnoběžný s hřídelí.

Pro měření stavu ložiska potřebujeme snímač umístit co nejbližše ložisku. Je celkem lhostejné v jakém směru. Obvykle se využívají radiální směry.



Na obrázku vidíme typické osazení stroje, který se skládá z motoru a ventilátoru. Máme 4 ložiska označené B1 až B4. U každého ložiska měříme radiálně (snímače 1 až 4) a jednou na stroji axiálně (snímač 5).

Měření otáček

Otáčky se měří snímačem otáček, říkáme mu tacho sonda. Tato sonda svítí laserovým paprskem, který namíříme na otáčející se hřídel. Na hřídel jsme předtím, když byl stroj zastaven, nalepili odraznou plošku. Nyní tacho sondu připojíme k analyzátoru a ten přijímá odrazy od reflexní plošky nalepené na hřídeli. Následně měří čas T (je to vlastně perioda) mezi odrazy a počítá frekvenci otáček jako $1/T$.



Jaké hodnoty měřit na začátku

Vždy začínáme se širokopásmovými hodnotami. Nemyslete si, že to je něco méněcenného. Dokážete s nimi provádět vibrodiagnostiku s výbornými výsledky. Později můžete přidávat složitější metody. Nemá smysl, abyste používali postupy, jejichž podstatě zcela nerozumíte. Častým omylem ale také je, že vibrační diagnostika je něco tak snadného jako měření teploty nebo tlaku. Že stačí jednodenní školení, které z vás udělá odborníka. Jednodenní školení vám ukáže, jak snadno začít, abyste měli ihned výsledky. Pak se budete dlouho vyvíjet a postupně pochopíte i složitější postupy. Být odborníkem ve vibrodiagnostice vám zajistí, že vždy velmi snadno najdete zaměstnání, protože budete umět něco, co ostatní neumí. A znát stav strojů a předcházet nečekaným poruchám chce každá továrna.

Pokud budete používat vibrační analyzátory Adash, tak v nich najdete jak základní měření s přednastavenými parametry, tak pokročilá měření, kde si můžete všechny parametry nastavit dle vašich požadavků.



Jaké jsou základní poruchy stroje?

Rozeznáváme dvě základní skupiny poruch stroje. V první jsou mechanické poruchy. Mezi ně patří:

Nevyváženost – tzn. otáčející se rotor má na sobě těžký bod, ten vytváří odstředivou sílu a ta chvěje strojem. Je to stejné jako nevyvážené kolo na automobilu.

Mechanické uvolnění – stroj je upevněn k základu pomocí šroubů, pokud některý z nich ztratí svou tuhost nebo dokonce praskne, pak jde o mechanické uvolnění.

Nesouosost – motor je pomocí spojky spojen např. s čerpadlem. Pokud jejich osy nejsou v přímce, pak mluvíme o nesouososti.

Pro mechanické poruchy měříme hodnoty v rychlosti, v RMS a obvykle v pásmu od 10 Hz do 1 000 Hz. Pokud jsou otáčky nižší než 10 Hz (tj. 600 ot/min), pak měříme už např. od 2 Hz.

Do druhé skupiny patří opotřebení valivých ložisek, závady na ozubení převodovek apod. Zde provádíme měření ve zrychlení, v RMS a obvykle v pásmu 500 Hz až maximální rozsah analyzátoru. Ten bývá obvykle 25 kHz. Zrychlení se měří nejčastěji v g, což je hodnota gravitačního zrychlení. $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$, kde m/s^2 je SI jednotka. Pokud je nutno g převádět na m/s^2 , tak klidně násobíme deseti.

Jak vyhodnotit naměřené hodnoty?

Máme naměřeny první hodnoty. Co teď s nimi?

Pro mechanické poruchy existují normy, které udávají mezní hodnoty pro dobrý stav, varování a nebezpečí. Při překročení varovné meze ještě lze stroj provozovat, ale již je potřeba naplánovat opravu. Také bychom měli stroj měřit častěji, protože již přítomná porucha se může rychle zhoršovat. Překročení meze nebezpečí by mělo znamenat odstavení stroje a jeho opravu či seřízení.

Nejčastěji používaná norma je ISO 20816, která obsahuje několik kategorií strojů a udává jejich mezní vibrační hodnoty. Pro detekci mechanických poruch používá měření rychlosti vibrací.

Bohužel pro stav ložisek žádné normy nejsou. Obvykle používané meze bývají okolo 1 g_{RMS} pro mez varování a 2 g_{RMS} pro mez nebezpečí. Měříme jen vyšší frekvence, obvykle $f_{\text{min}} = 500\text{ Hz}$.

Pokud máme více strojů stejného typu, pak můžeme hodnoty srovnávat mezi stroji. Jestliže na pěti strojích naměříme například 1,5; 1,7; 1,4; 5,6 a $1,3\text{ mm/s}_{\text{RMS}}$, pak je zřejmé, že stroj č. 4 s hodnotou 5,6 není v pořádku.

Jestliže máme naměřeno již více hodnot na jednom místě, např. s odstupem jednoho týdne, pak již můžeme vyhodnocovat trend. Platí následující pravidla: Pokud jsou v trendu víceméně stejné hodnoty ($\pm 15\%$), pak stroj běží ve stabilním stavu a rozhodně na něm nic neopravujeme. Pokud hodnoty stoupají, pak existuje počínající závada a tu musíme řešit.

Pokud máme v trendu na počátku stabilní hodnoty, pak je vezmeme jako referenci. Nastavme si mez varování na dvojnásobek reference a mez nebezpečí na pětinásobek reference.

Pozor na otáčky!

Pokud stroj běží stále na stejných otáčkách, pak nemají vliv na stabilitu hodnot měření. Ale pozor na stroje, které otáčky mění. Hodnota měření se při změně otáček mění i když provozní stav je stejný. V případech např. nevývahy se při rostoucích otáčkách zvětšuje i odstředivá síla a tím se zvýší i hodnota vibrací. Stejně při

opotřebením ložiska. Pokud např. na vnějším kroužku jsou nerovnosti přes které se odvalují kuličky, pak opět při vyšších otáčkách se zvýší i hodnota vibrací. Proto by se na těchto strojích vždy k měření měla ukládat i hodnota otáček. Buď je můžeme změřit tachometrem a analyzátor je uloží k měření nebo otáčky před měřením můžeme zadat ručně nebo je můžeme doplnit k měření až v počítači.

Výkonná diagnostika i s jednoduchým měřidlem vibrací

I s jednoduchým přístrojem lze provádět velmi spolehlivou diagnostiku. Příkladem takového přístroje je např. Adash 4900 Vibrio.



Umí měřit více než jen širokopásmové hodnoty, ale tyto vlastnosti zatím pomineme. Základní měření je měření rychlosti vibrací v pásmu 10–1 000 Hz. Metoda vyhodnocení je RMS: Pokud tedy budeme chtít zapsat hodnotu do zprávy, pak např. napíšeme 4,8 mm/s_{RMS} 10–1 000 Hz. Druhým měřením je měření zrychlení vibrací v pásmu 500–16 000 Hz. Metoda je opět RMS. Budeme tedy psát např. 1,7g_{RMS} 0,5–16 kHz.

Začneme využitím měření zrychlení. Nejčastějším použitím je měření stavu valivého ložiska. Nízké hodnoty cca do 0,3 g_{RMS} vždy znamenají výborný stav. Hovoříme o standardních typech ložisek, které pracují při otáčkách 600–3 600 RPM. Pro nízké otáčky už i hodnota 0,3 g_{RMS} může znamenat opotřebení. Naopak pro vyšší otáčky může při výborném stavu hodnota dosáhnout i vyšších čísel.

Využití hodnot rychlosti vibrací je o něco složitější. Hledáme již popsané mechanické poruchy, kterými jsou nevyváženost, mechanické uvolnění a nesouosost.

Pokud změříme vyšší hodnotu buď podle normy nebo již podle našich zkušeností, pak postupujeme vylučovacím způsobem podle následujících kritérií:

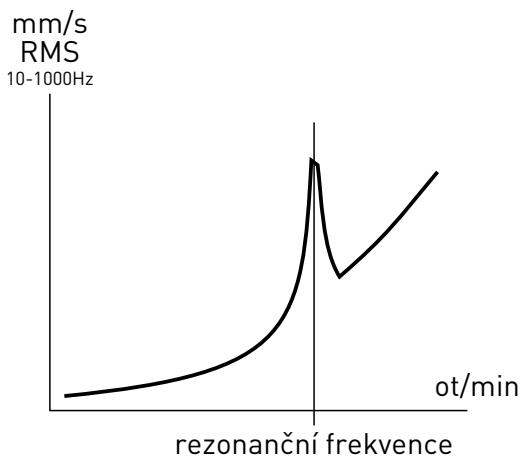
- Pokud jsou vibrace v axiálním směru vyšší než v radiálních směrech, pak je nejpravděpodobnější závadou nesouosost. Měli bychom provést vyrovnaní stroje a měřit znovu.
- Pokud a) neplatí, pak změříme vibrace na všech upevňovacích patkách stroje, tedy tam, kde jsou montážní šrouby. Pokud na některé patce jsou vyšší vibrace, než na ostatních, pak je na ní mechanické uvolnění. Může to být jen uvolněný šroub nebo už je šroub poškozen. Po opravě měříme znovu. Na šroubech nemusíme pro toto měření mít měřicí podložky. Je to jen aktuální srovnání hodnot, stačí upevnění magnetem na patku stroje.

c) Pokud nebyly splněny podmínky a) ani b) pak se s největší pravděpodobností jedná o nevyváženost. Po vyvážení změříme hodnoty znovu.

Může nastat situace, kdy vibrace po opravě či seřízení stále zůstávají vysoké. Pak již zbývají prozatím nezmíněné problémy a těmi jsou např. rezonance nebo elektrická nevyváha.

Co je rezonance?

Mnozí z vás znají pojem kritické otáčky. Tento pojem je důležitý především na lehkých velkých soustrojích, jakým je např. turbína. Ale problém se vyskytuje i na běžných strojích. Představme si, že zvyšujeme otáčky stroje a současně měříme hodnotu rychlostí vibrací v pásmu 10–1 000 Hz. Normální je, že při zvyšujících se otáčkách se zvyšují postupně i hodnoty vibrací. Může ale nastat situace, kdy se hodnota vibrací najednou zvýší rychle o větší hodnotu. Např. při poměrně malé změně otáček z 1 300 RPM na 1 400 RPM vzrostou vibrace na dvojnásobek. To už normální není. Pokud otáčky dále zvyšujeme, tak vibrace zase klesnou. Což je nečekaný paradox. Křivka hodnot vibrací je na obrázku.

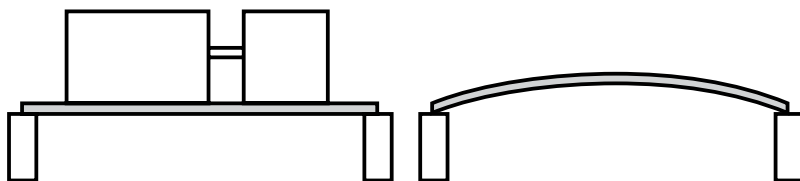


Na ose X jsou otáčky a na ose Y jsou hodnoty vibrací. Frekvenci, na které je špička, říkáme rezonanční frekvence. Jedná se o mechanickou vlastnost stroje, kdy při rezonančních otáčkách odstředivá síla daná nevyvážeností vybudí náhle mnohem vyšší hodnotu vibrací. Proto se těmto otáčkám říká kritické a stroj by na nich v žádném případě neměl být provozován. Co nás v praxi trápí, není ale rezonanční frekvence stroje. Výrobce stroje na toto musí dávat pozor a první kritické otáčky musí být výš než používané provozní otáčky. Toto neplatí například pro turbíny.

Takže samotný stroj je v pořádku. Co tedy může způsobit problém s rezonancí?

Odpověď je snadná. Na vině může být špatná konstrukce montážního rámu. Pokud je stroj upevněn přímo na těžkém betonovém základu, pak se rezonance nemusíme bát. Pokud je však stroj upevněn na ocelovém rámu, který je opřen jen o betonové bloky na obou koncích, pak se rezonance může objevit snadno. Rám může být špatně navržen, jako příliš pružný, a problém se objeví.

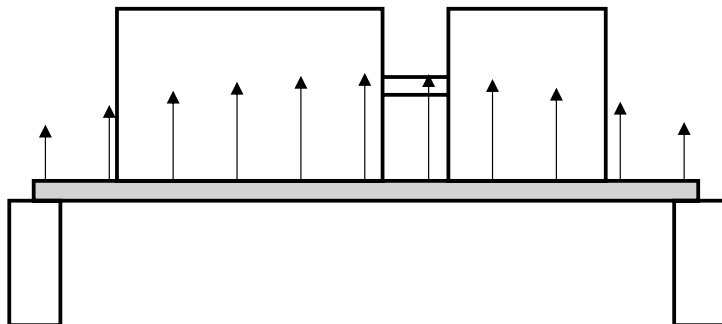
Každý rám má své rezonanční frekvence, nás zajímá jen ta nejnižší. Je to totéž jako struna na kytáře, která se rozvibruje na své rezonanční frekvenci. Je dokonce vidět i pouhým okem, jak dochází k deformaci struny.



Pomocí měření můžeme problém odhalit různými způsoby:

- a) Pokud lze otáčky stroje měnit, pak začneme na nízkých otáčkách a postupně je zvyšujeme. Současně měříme rychlost vibrací v mm/s_{RMS} 10–1 000 Hz. Pokud při nějakých otáčkách vibrace náhle vzrostou a pak zase klesnou, problémem je rezonance rámu na této frekvenci = otáčkách.
- b) Pokud otáčky měnit nelze, pak stroj spustíme do provozních otáček. Začneme průběžně měřit. Vypneme napájení stroje a sledujeme hodnoty vibrací během doběhu. Pokud dojde k jejich výraznému náhlému snížení, pak je podezření na rezonanci.
- c) Pokud otáčky měnit nelze, pak stroj spustíme do provozních otáček a provedeme měření na několika místech rámu.

Získané hodnoty zakreslíme do obrázku.



Pokud dochází k deformaci rámu na rezonanční frekvenci, pak by hodnoty měly vypadat jako na obrázku. Nízké hodnoty na okrajích, kde jsou podpěry a nejvyšší uprostřed.

Pro odstranění tohoto problému je potřeba změnit rám a jeho uložení. Stačí přidat další podpěru doprostřed a rezonanční problém zmizí.

Elektrická nevyváženost

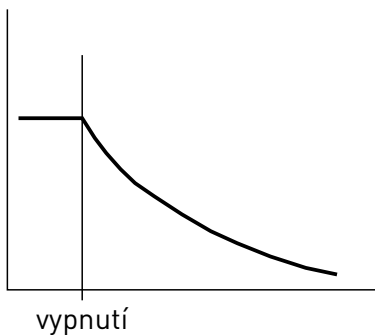
V případě elektromotorů může nastat situace, kdy není v pořádku elektrické vinutí. Může být přerušeno nebo zkratováno, a to současně na více místech. Elektromagnetické síly pak nejsou v pořádku a posunou rotor pryč z těžiště, tedy z místa, kde by měl správně být. To se projeví úplně stejně jako nevyváženost, tedy jako by zdánlivě na rotoru byl těžký bod a jeho odstředivá síla způsobí vibrace. Případné vyvážení rotoru nepřináší žádné větší zlepšení.

Tuto poruchu lze rozpoznat jednoduchým testem. Připojíme na motor snímač a spustíme trvalé měření rychlosti vibrací RMS v pásmu 10–1 000 Hz. To znamená, že na displeji vidíme zhruba každou vteřinu novou naměřenou hodnotu. Nyní motoru vypneme napájení. Začne zpomalovat a po nějakém čase se zastaví. Mohou nastat dvě situace:

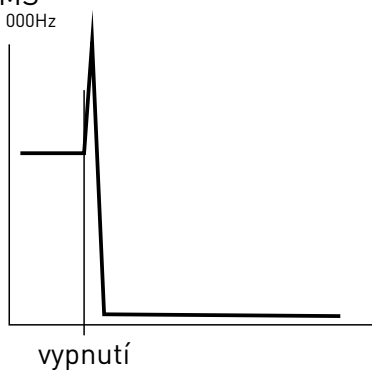
- Po vypnutí napájení se začnou vibrace pomalu snižovat až do zastavení motoru.
- Vibrace se po vypnutí napájení na velmi krátký okamžik zvýší a pak klesnou ihned skoro na nulu.

Dva popsané průběhy vidíme na obrázku.

mm/s
RMS
10–1 000Hz



mm/s
RMS
10–1 000Hz



Vlevo je případ pomalého snižování vibrací, který znamená, že rotor je skutečně nevyvážený. Tedy existuje těžký bod.

Vpravo je případ náhlého poklesu. To znamená, že celý problém s vibracemi souvisí s poruchou elektrických vinutí statoru a rotoru.

Zvídavější z vás se nyní zeptají, co znamená to rázovité zvýšení hodnoty po odpojení napájení v druhém případě. Odpověď je jednoduchá. Po vypnutí napájení zmizely elektromagnetické síly, které rotor vychýlily z jeho správné polohy v těžišti. Došlo tak k mechanickému rázu, když se rotor do těžiště vrátil. Ten způsobil zvýšení vibrací. Pak jsou již hodnoty velmi nízké, protože rotor není mechanicky nevyvážený.

Provádění měření v praxi.

Nejdříve je potřeba vytvořit strukturu vašeho podniku. To znamená vytvořit seznam strojů, které budeme měřit. Pro každý stroj pak vytvořit seznam měřicích míst. Pro tyto seznamy se používají programy, které koupíte společně s měřicími přístroji. Např. firma Adash nabízí program DDS.



V programu si vytvoříme celou strukturu podniku. Lze vytvořit několik úrovní typu Hala 1, Sekce 3 + seznam strojů. Na každém stroji pak vytvoříme měřicí místa a na nich pak požadovaná měření. Tento seznam přeneseme do přístroje a jdeme měřit. U strojů pak jen vybíráme ze seznamu, u kterého stroje jsme a ke kterému místu jsme přichytili snímač.

Nemusíme nic nastavovat. Vše se nastaví automaticky podle předem vytvořeného zadání měření v programu v počítači.

Přenesenému zadání se říká pochůzka. Určuje naši trasu, kde se v podniku budeme pohybovat a měřit.

Po návratu z pochůzky přeneseme všechna měření do počítače a můžeme začít vyhodnocovat.

Programy obsahují mnoho nástrojů, jak vyhodnocení automatizovat, zrychlit a zjednodušit.

Jak často na pochůzku chodit? Asi optimální čas je co dva týdny. Pokud je náš podnik rozsáhlý, tak to může být v intervalech delších. Maximum, které by nemělo být překročeno jsou 2 měsíce.

Na co si dát pozor? Při měření pochůzky nemůžeme udělat mnoho chyb. Parametry máme definovány předem v počítači. Jediné reálné nebezpečí tkví v tom, že můžeme měření provést na nesprávném místě nebo dokonce na nesprávném stroji. Data se pak uloží v počítači ke špatnému stroji a při vyhodnocování budeme zmateni, jak to, že nová data jsou tak nepodobná minulému měření.

Protokoly měření

Vaše vyhodnocení končí vytvořením hlášení údržbě, jaké zásahy by měli provést. Vždy mějme na paměti, že pracovníci údržby příliš nerozumí pojmům vibrační diagnostiky. Proto je jimi ani nezatěžujme. Používejme slovník, kterému rozumí. Hlášení vytvářejme co nejkratší. Nemá smysl do hlášení zahrnovat dlouhý seznam strojů, které jsou v pořádku. Do hlášení patří jen stroje, na kterých má údržba provést seřízení nebo opravu. Údržba má nejraději hlášení, ve kterém je pouze stručné sdělení: VŠE JE V POŘÁDKU.

Organizace měření a vyhodnocování

Naprosto nejlepší je, když si podnik pořídí vybavení pro vibrační diagnostiku a měření s vyhodnocením provádějí jeho zaměstnanci. Protože ti jsou v neustálém kontaktu se strojovým parkem a dostávají průběžně informace z údržby, jaké opravy či dokonce výměny strojů byly provedeny.

Také je možnost nakupovat vibrační diagnostiku zvenčí jako službu. Toto řešení má řadu nevýhod. Externí pracovníci přicházejí jen v definovaných časových intervalech a změří pochůzku. O zásazích údržby mezi pochůzkami se obvykle nic nedozví. Jejich přístup je zcela rutinní, takových podniků, jako je Váš mají mnoho. Vy sami tak nemáte k dispozici vybavení, abyste si v případě potřeby mohli provést měření. To je neoperativní, při příští návštěvě externích vibrodiagnostiků už může být pozdě. Pokud se přece jen rozhodnete pro externí firmu, pak uveďte několik doporučení.

Pokud k vám přijde externí firma s nabídkou měření, vždy je zaveďte ke stroji. Ať provedou měření a řeknou svůj názor na výsledky. Neztrácejte čas s člověkem, který se vymlouvá, že on pouze nabízí a měří jiní. Je vždy pozitivní, když ten, co měření nabízí, již přijde oblečen v pracovních montérkách. Nikdy se nenechejte ošálit tvrzením, že celá vibrodiagnostika je věc velmi složitá a zákazník ji nemůže chápat.

Objevuje se i řešení, kdy pochůzky měříte vy sami a data posíláte jen k vyhodnocení. Vždy je vám sděleno, že je k dispozici tým odborníků, který data vyhodnocuje. Je otázkou, kolik z nich bylo někdy v provozu. Slyšel jsem dobrý komentář od zkušeného diagnostika, který v podniku měří mnoho let. Řekl: „Nenechal bych si doporučit opravu, která může být dost drahá od člověka, kterého jsem nikdy neviděl. A který navíc nikdy neviděl můj stroj.“ To je přesná definice, jak k těmto službám přistupovat. Nikdy se vám nepodaří do smlouvy s externí firmou zahrnout jejich finanční zodpovědnost za to, když závadu neodhalí nebo hlásí závadu, která neexistuje.

A nyní otázka umělé inteligence. V naší firmě jsme se několikrát pokusili ji použít. Poprvé to bylo okolo roku 2000. Mohu zodpovědně říct, že ve vibrační diagnostice nebude aplikovatelná. Důvod je jednoduchý, nikdy nebude k dispozici

tréninková množina, která bude obsahovat dostatečně mnoho výsledků měření na mnoha typech strojů.

Pokud bych to měl srovnat s lékařstvím, tak jak by mohla fungovat umělá inteligence, která by měla umět diagnostikovat choroby nejen pro člověka, ale i u zvířat? Protože člověk je jen jeden typ organismu, tedy jeden typ stroje. A v diagnostické praxi existuje obrovské množství typů strojů.

Když budete posuzovat případné nabídky na externí diagnostiku, vždy buďte velmi podezřívaví a nebojte se hodně vyptávat.

Kalibrace

Dnes je to již většinou jen byrokratická záležitost pro různé systémy kvality a jejich audity. V moderních přístrojích nejsou žádné nastavovací prvky, kterými by se v kalibrační laboratoři daly doladit měřené hodnoty podle etalonu.

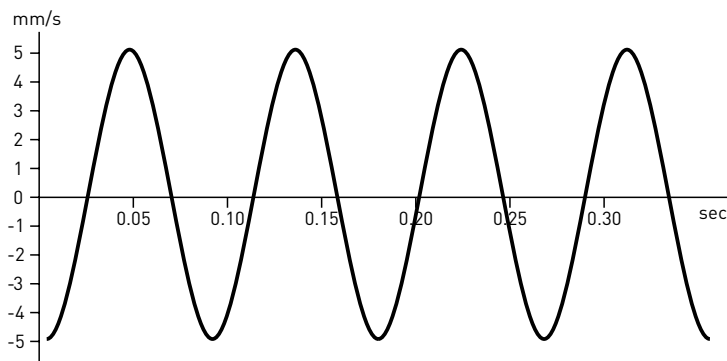
Pokud máme jen jeden přístroj a chceme prověřit, zda měří správně, pak má kalibrační laboratoř smysl. Existují však i elektronické přípravky, které simulují snímač. Generují přesné hodnoty napětí. Připojíme je k přístroji a zkontrolujeme, zda přístroj ukáže správnou hodnotu.



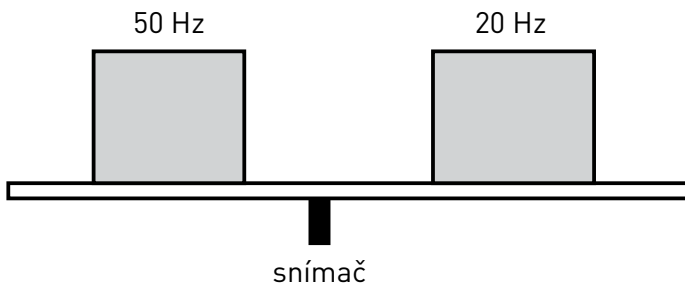
Pokud máme více přístrojů a více snímačů, pak je můžeme mezi sebou při kontrole zaměňovat. Pokud je něco špatně, snadno zjistíme, co to je. Může to být snímač, kabel nebo přístroj.

Časový signál a spektrum

O časovém signálu jsme již poměrně podrobně mluvili. Když se na něj díváme, vidíme vývoj vibrací v čase. Tedy na ose X je čas.



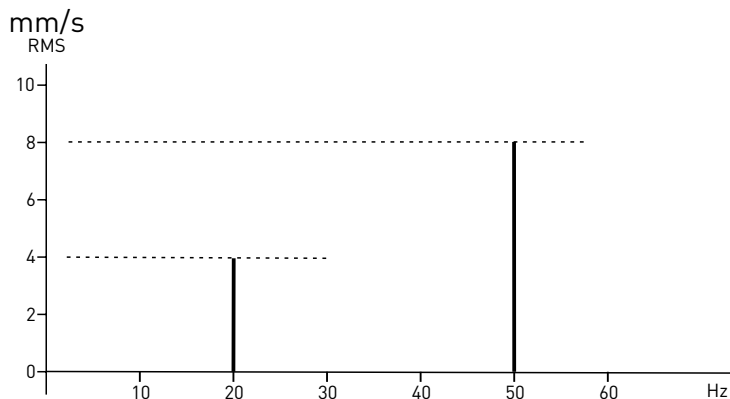
Na vibrace se můžeme podívat i jinak. Tím druhým způsobem je výpočet frekvenčního spektra. Na ose X ve spektru není čas ale frekvence. Samotné spektrum nám ukazuje, na kterých frekvencích vibrace vyzařují energii neboli na kterých frekvencích vibrace jsou a jak silné a na kterých jsou zanedbatelné.



Například na společném rámu upevníme dva elektromotory. Otáčky prvního budou 3 000 RPM (50 Hz) a otáčky druhého budou 1 200 RPM (20 Hz). Na rám pod motory umístíme snímač a budeme měřit rychlost vibrací RMS v pásmu 10–1 000 Hz. Roztočíme první motor. Naměřená hodnota je 8 mm/s_{RMS}. Nyní první motor zastavíme a roztočíme druhý. Nyní naměříme hodnotu 4 mm/s_{RMS}. Nyní roztočíme oba motory současně. Změříme hodnotu vibrací, která je takřka 9 mm/s_{RMS} (přesně 8,94 mm/s_{RMS}).

Pokud máme k dispozici jen tuto hodnotu 9 mm/s_{RMS}, nedokážeme ji rozdělit na dvě složky, které odpovídají jednotlivým motorům běžícím samostatně. Nevíme

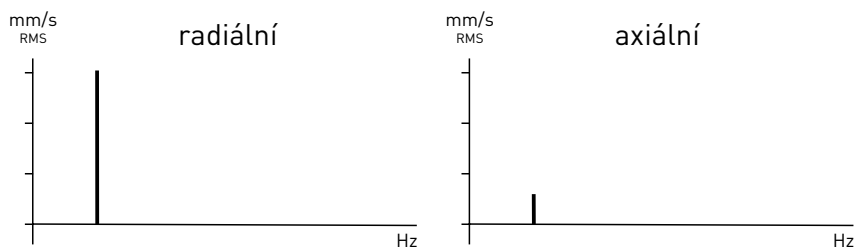
tedy v jakém stavu jsou jednotlivé motory. Pokud ale časový signál přepočítáme na spektrum, tak v něm již jednotlivé složky odlišíme.



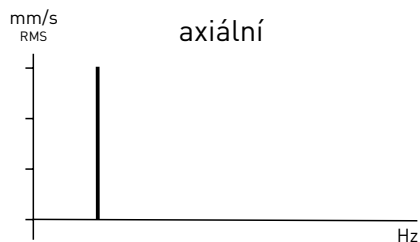
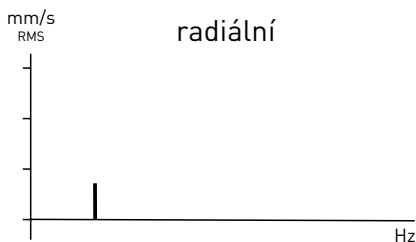
Vidíme dvě spektrální čáry na frekvencích 50 Hz a 20 Hz. Amplituda na 50 Hz je 8 mm/s a amplituda na 20 Hz je 4 mm/s. Spektrum nám tak umožňuje nový pohled na obsah vibrací, který nám časový signál neumožňoval.

Různé závady na strojích se od sebe liší právě frekvenčním obrazem. Spektrum se tak stává mocným nástrojem v analýze vibrací. Při vyhodnocení hledáme vysoké hodnoty, tedy vysoké spektrální čáry a pro ně hledáme, jaká porucha je vyvolává.

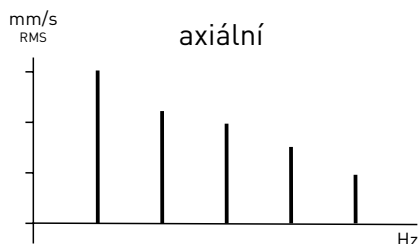
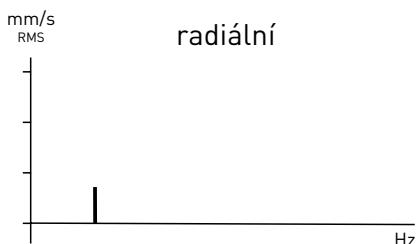
Na několika případech si ukážeme, jak jednoduché je rozlišení mechanických poruch, pokud máme k dispozici spektrum.



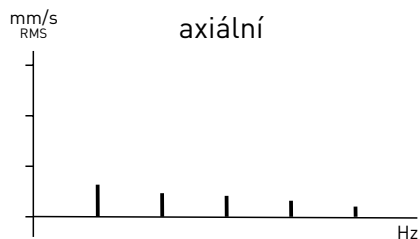
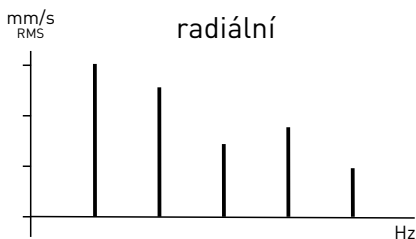
Pokud je vysoká amplituda jen na čáře otáčkové frekvence a v radiálním směru je vyšší než v axiálním, pak se jedná o nevyváženost.



Pokud je otáčková čára vyšší v axiálním směru, pak se jedná o nesouosost.



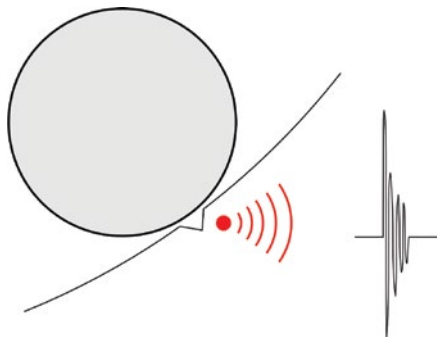
Pokud se vyskytnou i čáry na násobcích otáček (těm říkáme harmonické složky), pak se jedná o výraznou nesouosost. Stále hovoříme o případě, kdy axiální vibrace jsou vyšší než radiální.



Pokud jsou přítomné harmonické složky a vibrace jsou silnější v radiálním směru, pak se jedná o mechanické uvolnění.

Pokročilá diagnostika valivých ložisek pomocí demodulace (obálkové analýzy)

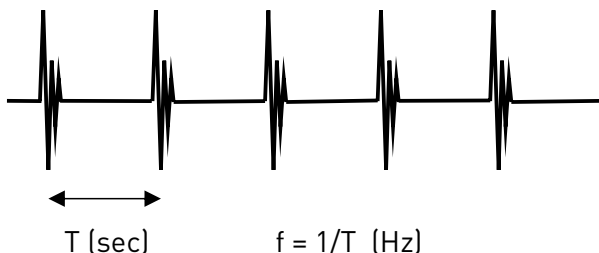
Co to je opotřebení valivého ložiska? Je to opotřebení drah, po kterých se odvalují kuličky nebo válečky a opotřebení povrchu samotných kuliček nebo válečků. Těmto opotřebením se říká pitting.



Co se stane, když kulička narazí na poruchu (díru) na ložiskové dráze?

Vznikne ráz. Je to podobné jako bychom do ložiska udeřili kladívkem. Jak postupně naráží na díru jedna kulička za druhou, tak vzniká časový signál obsahující jednotlivé rázy.

Pokud známe otáčky a rozměry ložiska, pak dokážeme vypočítat, jak daleko od sebe rázy budou. Tedy v jakém časovém odstupu přicházejí. A nyní přichází kouzlo. Pokud se díra objeví na vnějším kroužku, vnitřním kroužku, na kuličce nebo je prasklá klec pak se časové odstupy mezi rázy liší.



Jestliže přicházejí rázy v pravidelném časovém odstupu, pak můžeme vypočítat jejich frekvenci. Tedy kolikrát ráz přijde během jedné sekundy.

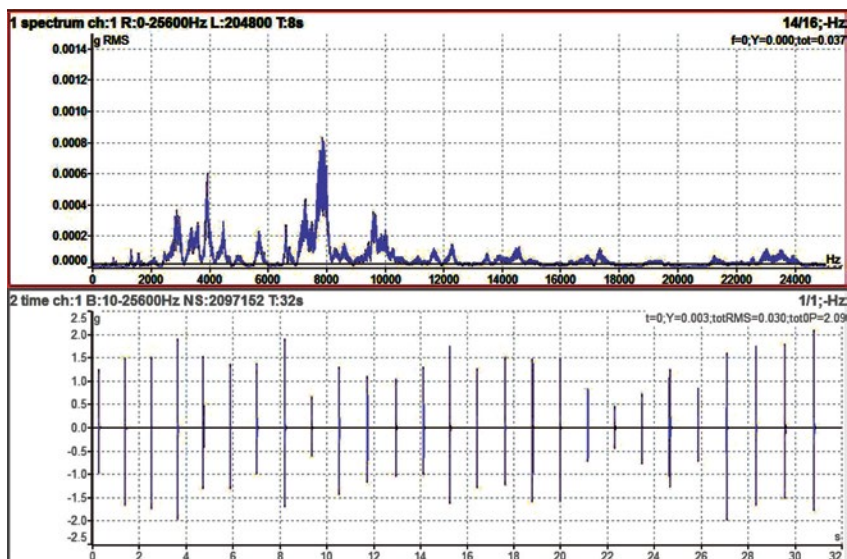
A protože pro různé vady se liší časový odstup, pak se liší i jejich frekvence. Těmto frekvencím říkáme vadové frekvence ložisek. A spektrum nám umožňuje je hledat.

Vadové frekvence existují čtyři:

- BPFO vadová frekvence poruchy na vnějším kroužku
(Ball Pass Frequency Outer)
- BPFI vadová frekvence poruchy na vnitřním kroužku
(Ball Pass Frequency Inner)
- BSF vadová frekvence poruchy na kuličce/válečku
(Ball Spin Frequency)
- FTF vadová frekvence poruchy klece
(Fundamental Train Frequency)

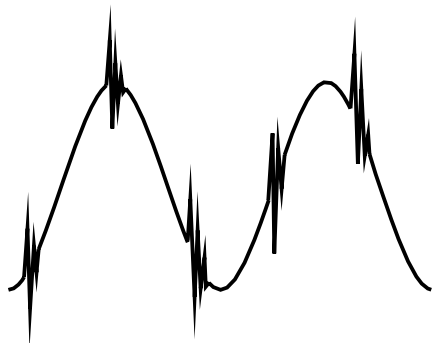
Signál pro demodulaci musí jasně ukazovat rázy. Proto se musí vždy měřit signál zrychlení. Ten měří dobře vysoké frekvence a tam právě jsou rázy přítomny.

Situace, ale není tak úplně jednoduchá. Když spočítáme spektrum z časového signálu s rázy, tak v něm na vadových frekvencích nejsou žádné dobře viditelné amplitudy. Ačkoliv v časovém signálu jsou výrazné špičky (2 g), tak ve spektru je nejvyšší hodnota 0,0008 g_{RMS}.



Důvod je následující. Výška čar ve spektru odpovídá RMS hodnotě. A ta odpovídá energii obsažené v signálu. Určitě si nyní vzpomenete na vysvětlení RMS hodnoty a grafy s vyčerněnou plochou. Spektrum reaguje dobře jen na zřetelné plochy v signálu. Nereaguje dobře na vysoké hodnoty špičky signálu bez významné plochy pod signálem.

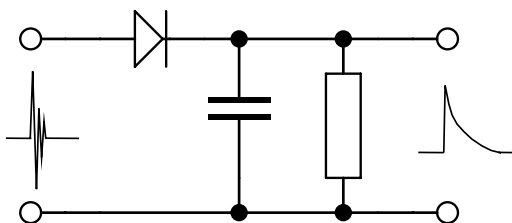
Takže teď víme, proč nemůžeme spektrum vypočítat přímo z naměřeného signálu. Musíme s ním nejdříve něco udělat. Musíme do něj nějaké plochy přidat. Prvním krokem je odfiltrování nízkých frekvencí.



Tuto situaci jsme již jednou popsali. Máme rázy, ale máme také sinusový průběh na otáčkové frekvenci. Ten v signálu nechceme. Proto nejdříve odfiltrujeme vše pod 500 Hz.



Nyní signál pustíme do obálkového modulátoru. Ten nám přidá do rázu plochu.

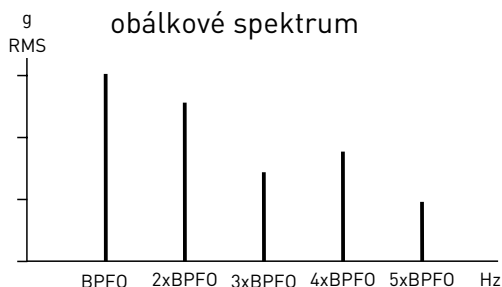


Jednotlivé rázy se usměrní diodou (ta propustí jen kladné napětí), pak nabijí kondenzátor C a ten se pak pomalu vybije přes odpor R. Tím vzniká na výstupu signál podobný obálce rázu.



Na tento signál už reaguje výpočet spektra podstatně lépe a vidíme výrazné špičky.

V případě, že porucha je jen na vnějším kroužku, pak ve spektru vidíme její frekvenci (BPFO) a za ní její harmonické složky.



Pro zvědavé povahy vysvětlím, proč tam harmonické složky jsou. V případě, že vypočítáme spektrum ze signálu, kde je jen sinusový průběh o frekvenci f , pak (za splnění jistých dalších podmínek) ve spektru bude jen jedna výrazná čára na frekvenci f .

Pokud ale časový signál má např. tvar obdélníku, pak ve spektru bude frekvence f a mnoho harmonických. To platí i pro všechny tvary signálu, které nejsou sinusové. Na zkreslení signálu reaguje spektrum vždy tak, že se objeví harmonické složky. A obálkový signál je signál značně zkreslený. K sinusovému průběhu má daleko.

Výhodou demodulace je to, že jsme schopni zachytit poruchu ložiska ve velmi ranném stadiu. Další výhodou znalosti vadových frekvencí je, že nás nepletou jiné frekvence. Ty ve spektru mohou být a nemají s vadou ložiska nic společného (např. rázy způsobené opotřebením zubů na převodovce).

Nyní popíšeme často se objevující chybu v chápání procesu demodulace. Vadové frekvence ložiska mohou být i velmi nízké. Uživatel se ptá, zda musí používat snímač, který tak nízké frekvence dokáže změřit. Naprostý opak je pravdou. Vadové čáry ve spektru vznikají až výpočtem, nikoliv měřením. V měření potřebujeme mít rázy a jejich časové odstupy pak převedeme na frekvenci. Na vadových frekvencích se nic neměří! Pokud bychom měli snímač, který měří až od 500 Hz výše, pak jej klidně můžeme použít. Vždyť stejně před obálkovou modulací všechny frekvence pod 500 Hz odstraňujeme.

Vadové frekvence nám umožňují řešit situace, kdy máme dvě různá ložiska vedle sebe. Ve spektru jasně vidíme, které z nich je poškozeno a potřebuje vyměnit.

Poslech vibrací

Jedná se v podstatě o historicky první způsob vyhodnocování vibrací. Šroubovák se přitiskl čelem na stroj a zadní plocha se přitiskla k uchu.

Naše přístroje i dnes umožňují poslech vibrací. Signál ze snímače je přiveden do sluchátek. Výborně se dají poslouchat právě ložiska (jejich šum nebo hvízdot). Dobře jsou slyšet různé opakující se jevy, různá klepání uvnitř stroje. Samozřejmě nelze poslouchat signál z mechanických poruch. Tedy poslouchat ho můžeme, ale naše ucho není na tak nízkých frekvencích citlivé a také sluchátka přenášejí nízké frekvence s velkým útlumem.

Ultrazvuk

Ultrazvukem nazýváme signál na frekvencích vyšších než 25 kHz. Existují speciální mikrofony, které umí tak vysoké frekvence snímat. Nejcitlivější jsou na frekvencích okolo 40 kHz. Lze je použít pro měření ložisek, ale nepřinášejí proti měření snímačem zrychlení žádné výhody. Jejich použití je užitečné při hledání netěsností v rozvodech tlakového zvuku. Pak se měří ultrazvukovým mikrofonom.

Naše vibrační analyzátory také toto měření umožňují.

Přepočty hodnot zrychlení, rychlosti a dráhy

Abychom takový přepočet mohli provést jednoduše, jen vynásobením konstantou, pak je nutnou podmínkou, aby signál měl sinusový průběh. Pokud ho nemá, nelze přepočet jednoduše provádět. Matematicky to samozřejmě jde, ale musíme umět používat derivace a integrály.

Nechť tedy máme signál zrychlení s nějakou hodnotou RMS a 0-P. Jen připomínám, že hodnota 0-P = RMS/0,71. Frekvence sinusového průběhu je f . Pak platí, že hodnoty rychlostí jsou rovny:

$$vel_{RMS} = \frac{acc_{RMS}}{2 * \pi * f} \quad a \quad vel_{0-P} = \frac{acc_{0-P}}{2 * \pi * f}$$

Následně pro dráhu platí vzorce:

$$disp_{RMS} = \frac{vel_{RMS}}{2 * \pi * f} \quad a \quad disp_{0-P} = \frac{vel_{0-P}}{2 * \pi * f}$$

Ještě znovu připomínám podmínku sinusového průběhu.

Proč měříme nízké frekvence v dráze a vysoké ve zrychlení?

Nejlépe to pochopíme na příkladech. Představme si dva stroje, které vykazují různé hodnoty vibrací.

- A) Stroj, který pracuje na velmi nízkých otáčkách 300 RPM (5 Hz) a vykazuje RMS hodnotu dráhy rovnou 100 μm .
- B) Vysokootáčkový turbo kompresor pracuje na otáčkách 120 000 RPM, což je 2 000 Hz a vykazuje RMS hodnotu zrychlení 1 g.

Pokud stroj A měříme snímačem dráhy, který má citlivost 8 mV/ μm , pak pro hodnotu 100 μm dostáváme 800 mV. Elektrický signál o amplitudě 800 mV změříme velmi snadno. Nyní zkusme stroj A měřit pomocí snímače zrychlení. Nejprve si vypočteme, jaká je hodnota zrychlení na stroji A. Z výše uvedených vzorců plyne, že:

$$\text{acc}_{\text{RMS}} = \text{disp}_{\text{RMS}} * [2 * \pi * f]^2$$

Po dosazení máme:

$$\begin{aligned} \text{acc}_{\text{RMS}} &= 100 \mu\text{m} * [2 * \pi * 5]^2 \doteq 100 \mu\text{m} * (31,4)^2 \doteq 100 \mu\text{m} * 900 = \\ 90\,000 \mu\text{m/s}^2 &= 90 \text{ mm/s}^2 = 0,09 \text{ m/s}^2 = 0,009 \text{ g RMS} \end{aligned}$$

Hodnota 0,009 g je obtížně měřitelná. Při citlivosti 100 mV/g se jedná o hodnotu 0,9 mV, která již může být skryta v šumu.

Pokud stroj B měříme snímačem zrychlení, který má citlivost 100 mV/g, pak pro hodnotu 1 g dostáváme 100 mV, kterou změříme snadno.

Co se stane, pokud zkusíme měřit stroj B snímačem dráhy. Vzorec je:

$$\text{disp}_{\text{RMS}} = \text{acc}_{\text{RMS}} / [2 * \pi * f]^2$$

Po dosazení máme:

$$\begin{aligned} \text{disp}_{\text{RMS}} &= 1 \text{ g} / [2 * \pi * 2\,000]^2 \doteq 10 \text{ m/s}^2 / [12\,000]^2 = 10 \text{ m/s}^2 / 144\,000\,000 = \\ 6,9 * 10^{-8} \text{ m} &= 6,9 * 0,000\,000\,001 = 0,000\,000\,069 \text{ m} = 0,000\,069 \text{ mm} = 0,069 \mu\text{m}. \end{aligned}$$

Při citlivosti snímače 8 mV/ μm bychom dostali 0,5 mV, což je velmi nízká hodnota a může už být překryta šumem. Takže měřit stroj B snímačem dráhy by také nebyl dobrý nápad.

Podobně si spočítejte, jaká by musela být hodnota dráhy při otáčkách 1 Hz a hodnotě zrychlení 3 g. Pokud vám vyšlo, že RMS hodnota dráhy je 0,76 m, pak jste počítali správně. 0,76 m_{RMS} je zhruba 1 m_{0-P} . Tzn., že stroj by vibroval +/- 1 m okolo střední polohy. Chtěl jsem jen ukázat, že vyšší hodnoty zrychlení na nízkých frekvencích jsou nemožné, protože by muselo docházet k obrovským výchylkám v dráze. Stejně tak vyšší hodnoty dráhy na vysokých frekvencích jsou nemožné, protože by muselo docházet k obrovským hodnotám zrychlení.

Online měření

Zatím jsme mluvili pouze o měření přenosným analyzátozem vibrací. Existují ale i přístroje, které měří trvale. Tzn. na stroji jsou namontovány snímače a provozní stav je monitorován spojitě, bez přestávek. To přináší výhodu v tom, že máte provozní stav pod kontrolou spojitě a zachytíte začínající problém ihned. Spojité měření znamená, že např. každou sekundu naměříme novou hodnotu vibrací. Při pochůzkovém způsobu měření získáváme novou hodnotu např. jednou za dva týdny.

Za tento komfort se samozřejmě platí. Ceny online systémů jsou vyšší než pochůzkových systémů. Zatímco přenosný analyzátor nám stačí jeden, online systém potřebujeme jeden pro každý stroj.

Při nastavování online systému je nutné si uvědomit dvě základní fakta:

- 1) výkon procesoru není nekonečný,
- 2) velikost disku pro data není nekonečná.

Ačkoliv obě tvrzení jsou jasná a nikdo je nezpochybňuje, divili byste se, kolik uživatelů na ně zapomíná při nastavování systému. Nespočítají si, kolik místa na disku spotřebují např. za jeden den.



Online systém Adash A3716



Online systém Adash A3800

Systémy v minulosti neměřily úplně spojitě. Uživatel si nastavil, jak často se má hodnota měřit, např. každých 10 minut.

Současné systémy Adash již spojitě měřit umí. Při vývoji jsme také věnovali obrovské úsilí na vyvinutí algoritmů, jak pracovat s velkým množstvím dat.

Základní úvaha je tato: nemá smysl do databáze ukládat hodnoty měření, které se nemění. Pokud je hodnota rovna 3 mm/s pak stačí ji uložit např. jednou za hodinu nebo i více hodin. Při pohledu na grafy samozřejmě víte, že mezera mezi měřeními 3 hodiny neznamená, že se měřilo jednou za 3 hodiny. Víte, že se měřilo pořád a že hodnota byla stabilní. Ukládací algoritmy Adash takový přístup používají pro všechny typy měření. Na paměti při vývoji jsme měli především jednu věc. Uživatelé nesmí uniknout žádná data, která znamenají změnu provozního stavu.

Redukce dat také znamená zrychlení přístupu k datům v databázi a rychlejší zobrazování trendů.

Vyvažování

Měření vibrací umožňuje také velmi snadno vyvažovat rotory. Nebudeme zabíhat do přílišných podrobností. V praxi se provozně vyvažují rotory o jedné nebo dvou vyvažovacích rovinách. Jedno rovinové vyvažování provádíme na úzkých rotorech, kde jejich poloměr je výrazně větší než jejich šířka. Dvou rovinové vyvažování provádíme na rotorech, které jsou širší. Dvou rovinové vyvažování vidíme v praxi u vyvažování kol automobilu. Jedno závaží se dává dovnitř a druhé se dává zvenku.

Popíšeme případ jedné roviny, který je jednodušší. Připojíme snímač na ložisko rotoru a tacho sondu pro měření otáček. Ta je nutná, protože budeme provádět měření amplitudy a fáze jen na otáčkové frekvenci. V našich přístrojích se toto měření jmenuje amp+phase měření. Roztočíme rotor na provozní otáčky a změříme hodnoty. Pak na rotor připevníme zkušební závaží. Jeho hmotnost se doporučuje zhruba pětikrát vyšší než hodnota maximálního přípustného zbytkového nevyváženosti (každý rotor je vždy trochu nevyvážený, pojem maximální přípustný nevyváženost znamená hodnotu, kdy nemusíme vyvažovat a můžeme stroj provozovat bez omezení). Poté znovu rotor roztočíme a změříme hodnoty amplitudy a fáze. Nyní již analyzátor vypočítá, jak těžké závaží je potřeba a kde se má umístit. Poloha vyvažovacího závaží se odečítá od značky na hřídeli, kterou snímá tacho sonda. Odečítá se ve stupních, kdy celý kruh rotoru je 360°. Jestliže hmotnost závaží je menší než maximální přípustný nevyváženost, pak jej ani nemusíme umístit na rotor a můžeme vyvažování ukončit.

Vyvažování ve dvou rovinách probíhá obdobně, jen se provádí více měření. Zkušební závaží je třeba postupně umístit do první a následně do druhé roviny. Výsledkem jsou dvě hmotnosti závaží a dvě pozice. Pro každou rovinu zvlášť.

Vyvažovací proces je dobré vyzkoušet nejdříve v kanceláři např. na stolním ventilátoru. Nevývahu můžeme simulovat např. pomocí plastelíny. Konečné vyvažovací závaží by mělo mít stejnou hmotnost a polohu naproti simulační plastelině.

Pro vyvažování se používá norma ISO 1940, kde najdete popsány jak postupy, tak doporučené maximální zbytkové nevyvážky pro různé druhy strojů a různé hodnoty otáček.

Nastavení základních parametrů měření

Nastavení snímače

ICP zapnuto/vypnuto – Většina snímačů obsahuje vnitřní elektroniku vyžadující napájení, které se nazývá ICP® (PCB Trademark). Pokud snímač napájení nevyžaduje a necháme ICP napájení zapnuté, pak můžeme snímač poškodit. Pokud připojujeme na vstup analyzátoru generátor signálu, pak vždy ponechme ICP vypnuto.

Jednotka – Snímač je zařízení, které převádí nějakou fyzikální veličinu na napětí nebo proud. Snímače vibrací mají na výstupu napětí a musíme nastavit jakou fyzikální veličinu na napětí převádějí. Nejčastěji máme snímače zrychlení, tedy nastavíme g nebo m/s^2 .

Citlivost – Zde nastavíme převodní koeficient mezi jednotkou a výstupním napětím, pro g je to obvykle 100 mV/g. Tzn. je-li hodnota signálu 1g pak na výstupu snímače se objeví 100 mV.

Nastavení širokopásmového měření – Overall

Kanál – Zadáme číslo kanálu, na kterém chceme měření provést.

Jednotka – Fyzikální jednotka, ve které chceme měření provést. Pozor – neplést s jednotkou snímače, ta je např. g, ale přístroj umí signál přepočítat i do mm/s nebo do μm . Takže pro měření stavu ložiska volíme g, pro měření mechanických poruch volíme mm/s.

Hodnota (Detect type) – Volba způsobu vyhodnocení. Nejčastěji volíme RMS, ostatní jsou používány jen ve speciálních případech.

Pásmo Fmin, Fmax (Band Fmin, Fmax) – Zde nastavíme krajní frekvence pásmového filtru. Ten ze vstupního signálu odstraní všechny frekvence nižší než Fmin a všechny frekvence vyšší než Fmax. Pak se vyhodnotí hodnota, tedy např. RMS. Záleží jaké poruchy nás zajímají. Pro měření stavu ložiska volíme vysoké frekvence např. 5–25.6 kHz. Pro pomaloběžná ložiska volíme Fmin menší, např. 500 Hz. Pro měření mechanických poruch volíme nejčastěji 10–1 000 Hz, pro pomaloběžné stroje (otáčky pod 600 RPM, tzn. pod 10 Hz) pak volíme Fmin např. 1 Hz. Čím nižší hodnota, tím déle budete čekat na provedení měření. Čekání je nutné pro uklidnění snímače po jeho přichycení na měřicí podložku. Při hodnotě 10 Hz se čeká 1 sekunda. Při hodnotě 1 Hz se čeká 10 sekund.

Počet vzorků – Nastavením počtu vzorků vlastně nastavujeme jak dlouhé měření chceme provést pro výpočet výsledku. Obvyklá stačí délka 1 s. Pro pomaloběžné stroje pak volíme delší. Měření by vždy mělo obsahovat alespoň 10 otáček rotoru.

Časový signál – Time signal

Měření časového signálu jsme si vysvětlili na příkladu s pružinou a záznamem vibrací. Základní parametry Kanál, Jednotka, Pásmo Fmin, Pásmo Fmax, Počet vzorků již byly vysvětleny v předchozím nastavení širokopásmové hodnoty.

Vzorkovací Frekvence (Sampling Frequency) – Její hodnota určuje jak se bude analogový signál převádět na digitální. Analyzátor nastaví vždy vzorkovací frekvenci sám podle nastavené hodnoty Pásmo Fmax. Nedoporučujeme tuto hodnotu měnit, dokud nebudete mít hlubší znalosti o měření.

Spektrum

Již jsme vysvětlili, že se jedná o přepočet časového signálu na spektrum. Výpočet probíhá pomocí FFT, čili rychlou Fourierovou transformací. Více o výpočtu nepotřebujeme vědět.

Parametry Kanál, Jednotka již byly vysvětleny v předchozím nastavení širokopásmové hodnoty.

Okno (Window) – Nechejte hanning, pochopení funkce okna vyžaduje hlubší znalosti a není nutné pro provádění diagnostiky.

Pásmo Fmin (Band Fmin) – Zde je pouze nastavení Pásmo Fmin. Pokud pro vás nejsou zajímavé frekvence pod 10 Hz, pak nechte 10 Hz, jinak zadejte nižší hodnotu. Nižší hodnota prodlužuje dobu měření, jak jsme již vysvětlili u širokopásmového měření.

Rozsah – Nastavení Frekvenčního rozsahu spektra. Pro měření v mm/s stačí obvykle 1 000 Hz, při měření v g chceme vidět vysoké frekvence, takže zadáme např. 25 600 Hz.

Počet čar – toto nastavení dává podobný smysl jako rozlišení obrázků. Vysoké rozlišení umožňuje zvětšovat obrázek a vidíme detaily. Při zvětšení obrázku s nízkým rozlišením vidíme jen obdélníky bez vnitřní struktury. Podobné je to se spektrem. Pokud máme vedle sebe dvě blízké frekvence, které od sebe potřebujeme oddělit pak musíme zvolit vyšší rozlišení, které to umožní. Hodnota df zobrazená pod hodnotou počtu čar ukazuje, jak velký je frekvenční rozdíl mezi sousedními čarami. Pokud potřebujeme rozlišit dvě frekvence vzdálené např. 2 Hz, pak df musí být alespoň 0.5 Hz. Vyšší rozlišení znamená vždy prodloužení doby měření. Doba měření se vypočte snadno i bez kalkulačky. Vezmeme hodnotu df (tedy vzdálenost sousedních čar) v Hz a vypočteme $T = 1/df$, T je celkový čas měření. Pokud např. nastavíte Rozsah a Počet čar tak, že $df = 0.01\text{Hz}$, pak měření bude trvat 100 sec.

Průměrování – Vibrace nemusí být vždy zcela stabilní nebo mohou obsahovat mnoho šumu. Pak je dobré použít průměrování. Pokud např. nastavíme hodnotu 8, pak se provede 8 individuálních měření a z nich se vypočítá jeden aritmetický průměr, který se zobrazí na obrazovce a uloží. Dostačující hodnota průměrování pro většinu případů je právě již zmíněných 8.

Demod (demodulované) spektrum

V literatuře můžete nalézt i označení obálová analýza. Jedná se o naprosto totožné měření.

Parametry Kanál, Okno, Jednotka, Průměrování – již byly vysvětleny dříve. Demod spektrum lze měřit jen ve zrychlení, proto je výběr jednotek omezený.

Pozor: jak již bylo vysvětleno dříve v samostatné kapitole, neplést význam Demod Fmin, Fmax a význam Rozsahu.

Demod Fmin, Fmax – opět definice frekvencí vstupního pro filtru, v demodulaci je úkolem tohoto filtru odstranit frekvence otáček a harmonických složek. Zůstat mají jen rázy, protože jen ty jsou potřeba pro následnou obálovou modulaci.

Rozsah – Rozsah spektra po aplikaci obálky, zde chceme vidět vadové frekvence ložisek, ty jsou obvykle jednotky až desítky Hz. Rozsah tak stačí do několika stovek Hz.

Počet čar – Nemí třeba mít mnoho čar. Vadové frekvence jsou poměrně daleko od sebe, takže nepotřebujeme velké rozlišení. 1 600 čar naprosto stačí.

Co dodat závěrem?

Pokud je měření pečlivé a spolehlivé, můžeme včas odhalit závady a poruchy stroje a to v konečném důsledku znamená úsporu času a financí. S nadsázkou lze říct, že se měření stane vašim nezastupitelným pomocníkem.

Jistě se z vás po prvním měření nestane mistr, ale nicméně věříme, že se postupem času zdokonalíte a tento manuál věnujete dalším začátečníkům 😊

Koneckonců víme o čem mluvíme, svět vibrací je naším světem.

Navíc v tom nezůstanete sami. Na našich webových stránkách najdete spoustu článků, videí a dalších manuálů týkajících se této problematiky.

VIDEO



Manuály a informační listy



WEB



Krátký průvodce vibrační diagnostikou



This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

ADASH spol. s r. o.

Hlubinská 32/1379

Ostrava, 702 00

+420 596 232 670

info@adash.com

www.adash.com

1. vydání, 2025

© ADASH spol. s r. o.