

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Literární rešerše souboru technických norem z oblasti
Vibrace, rázy a měření vibrací a rázů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub FIALA**
Osobní číslo: **E16B0009P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Literární rešerše souboru technických norem z oblasti
Vibrace, rázy a měření vibrací a rázů**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Proveďte literární rešerši souboru technických norem ICS 17.160 - Vibrace, rázy a měření vibrací a rázů. Zaměřte se zejména na normy týkající se následujících bodů:

1. Popište metody hodnocení vibrací a maximální přípustné hodnoty vibrací elektrických točivých strojů.
2. Popište metody monitorování stavu a diagnostiky strojů.
3. Popište způsoby měření vibrací, zpracování a analýzy signálu.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **17.160 - Vibrations, shock and vibration measurements. International Organization for Standardization [online]. [cit. 20.4.2018]. Dostupné z: [https://www.iso.org/ics/17.160/x./](https://www.iso.org/ics/17.160/x/)**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Šobra**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na literární rešerši technických norem z oblasti Vibrace, rázy a měření vibrací a rázů. V úvodní kapitole se tato bakalářská práce zaměřuje na hodnocení vibrací a na maximální přípustné hodnoty vibrací elektrických točivých strojů. V další kapitole se tato bakalářská práce věnuje metodám monitorování stavu a diagnostiky strojů. V závěrečných dvou kapitolách se bakalářská práce věnuje způsobům měření vibrací, zpracování a analýze signálu. Ačkoliv je tato práce rozdělena do čtyř kapitol, normy použité pro vytvoření této práce se můžou objevit ve všech kapitolách., protože může mezi nimi vzniknout určitá spojitost.

Klíčová slova

Vibrace, rázy, monitorování, diagnostika, analýza, měření, hodnocení

Abstract

This bachelor thesis is focused on literary research of technical standards in the field of vibration, shock and vibration and shock measurement. In the introductory chapter, this bachelor thesis focuses on the evaluation of vibrations and the maximum permissible values of vibration of electrical rotating machines. In the next chapter, this bachelor thesis deals with methods of monitoring the condition and diagnostics of machines. In the final two chapters, the bachelor thesis deals with methods of vibration measurement, signal processing and analysis. Although this thesis is divided into four chapters, the standards used to create this work can be found in all chapters because there may be some connection between them.

Key words

Vibration, shock, monitoring, diagnostics, analysis, mensuration, evaluation

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

.....
podpis

V Plzni dne 11.6.2019

Jakub Fiala

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Šobrovi, Ph.D. za jeho velmi cenné rady a připomínky během tvorby této práce a za jeho čas věnovaný konzultacím.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 8 |
| ÚVOD | 10 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 11 |
| 1 METODY HODNOCENÍ VIBRACÍ A MAXIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÉ HODNOTY VIBRACÍ ELEKTRICKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ | 12 |
| 1.1 ČSN EN 60034-14 ED. 2 | 12 |
| 1.1.1 <i>Metody hodnocení vibrací</i> | 12 |
| 1.1.2 <i>Maximální přípustné hodnoty vibrací</i> | 14 |
| 1.2 ČSN ISO 10816 – OBECNĚ | 15 |
| 1.3 ČSN ISO 10816-3 | 16 |
| 1.3.1 <i>Metody hodnocení vibrací</i> | 16 |
| 1.3.2 <i>Provozní meze</i> | 17 |
| 1.4 ČSN ISO 10816-5 | 17 |
| 1.4.1 <i>Metody hodnocení vibrací</i> | 17 |
| 1.4.2 <i>Provozní meze</i> | 18 |
| 1.5 ČSN ISO 10816-6..... | 18 |
| 1.5.1 <i>Metody hodnocení vibrací</i> | 18 |
| 1.6 ČSN ISO 10816-7 | 19 |
| 1.6.1 <i>Metody hodnocení vibrací</i> | 19 |
| 1.6.2 <i>Dělení čerpadel</i> | 19 |
| 1.6.3 <i>Pásma hodnocení a jejich hranice</i> | 19 |
| 1.7 ČSN ISO 10816-8..... | 19 |
| 1.7.1 <i>Kritéria vibrací</i> | 20 |
| 1.7.2 <i>Maximální přípustné hodnoty vibrací</i> | 20 |
| 1.7.3 <i>Křivky mezí pro celkové hodnoty rychlosti vibrací</i> | 21 |
| 1.8 ČSN ISO 10816-21 | 21 |
| 1.8.1 <i>Metody průměrování a veličiny pro hodnocení vibrací větrných turbin</i> | 21 |
| 1.8.2 <i>Kritéria hodnocení</i> | 22 |
| 1.8.3 <i>Provozní meze</i> | 22 |
| 1.9 ČSN ISO 14839 – OBECNĚ | 23 |
| 1.10 ČSN ISO 14839-2 | 23 |
| 1.10.1 <i>Metody hodnocení vibrací</i> | 23 |
| 1.10.2 <i>Maximální přípustné hodnoty vibrací</i> | 24 |
| 1.11 ČSN ISO 20816 – OBECNĚ | 24 |
| 1.12 ČSN ISO 20816 – 1 | 25 |
| 1.12.1 <i>Metody hodnocení vibrací</i> | 25 |
| 1.12.2 <i>Faktory, ovlivňující kritéria hodnocení</i> | 26 |
| 1.13 ČSN 01 1411..... | 26 |
| 1.13.1 <i>Mohutnost kmitání</i> | 26 |
| 2 METODY MONITOROVÁNÍ STAVU A DIAGNOSTIKY STROJŮ | 28 |
| 2.1 ČSN ISO 13373-1 | 28 |
| 2.1.1 <i>Monitorování stavu vibrací</i> | 29 |
| 2.2 ČSN ISO 13373-3 | 31 |
| 2.2.1 <i>Diagnostický přístup</i> | 31 |
| 2.3 ČSN ISO 10816-3 | 32 |
| 2.4 ČSN ISO 10816-7 | 33 |
| 2.5 ČSN ISO 10816-21 | 33 |
| 3 ZPŮSOBY MĚŘENÍ VIBRACÍ | 34 |
| 3.1 ČSN ISO 10816 A ČSN ISO 20816-1 | 34 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.1.1 | Měření vibrací | 34 |
| 3.1.2 | Měřicí místa na nerotujících částech..... | 35 |
| 3.1.3 | Měřicí místa na rotujících hřídelích | 36 |
| 3.1.4 | Měřicí přístroje..... | 37 |
| 3.2 | ČSN ISO 20816-2 | 37 |
| 3.2.1 | Měřicí postupy | 37 |
| 3.3 | ČSN ISO 20816-4 | 38 |
| 3.3.1 | Měřicí postupy | 38 |
| 3.4 | ČSN EN 60034-14 ED. 2 | 39 |
| 3.4.1 | Měřené veličiny..... | 39 |
| 3.4.2 | Velikost vibrací..... | 39 |
| 3.4.3 | Měřicí zařízení..... | 40 |
| 3.4.4 | Měřicí místa..... | 40 |
| 4 | ZPRACOVÁNÍ A ANALÝZA SIGNÁLU | 41 |
| 4.1 | ČSN ISO 18431-1 | 41 |
| 4.1.1 | Úprava signálu | 41 |
| 4.1.2 | Určení typu signálu | 42 |
| 4.1.3 | Analýza signálů | 42 |
| 4.2 | ČSN ISO 18431-2 | 44 |
| 4.2.1 | Vztah pro diskrétní Fourierovu transformaci..... | 44 |
| 4.2.2 | Obvyklá časová okna | 45 |
| 4.3 | ČSN ISO 18431-3 | 47 |
| 4.3.1 | Časově-frekvenční transformace | 48 |
| 4.4 | ČSN ISO 18431-4 | 48 |
| 4.5 | ČSN ISO 13373-2 | 48 |
| 4.5.1 | Úprava signálů | 48 |
| 4.5.2 | Analýza ve frekvenční oblasti | 49 |
| 4.5.3 | Analýza vibrací v časové oblasti..... | 49 |
| | ZÁVĚR..... | 50 |
| | SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ..... | 51 |

Úvod

Cílem této bakalářské práce je provést literární rešerši technických norem, ve kterých se pojednává o problematikách vibrací a rázů.

S problematikou vyhodnocování a měření vibrací se nejvíce zabývají normy ČSN ISO 10816 a ČSN ISO 20816. Tyto normy stanovují požadavky na měřicí přístroje, postup měření i vyhodnocování naměřených hodnot.

Další problematikou je monitorování stavu a diagnostika strojů. Tento problém se nejvíce řeší v normách ČSN ISO 13373, ve kterých jsou uváděny jednotlivé typy systémů a také diagnostické přístupy.

Závěrečná problematika se týká zpracování a analýzy signálu. Normy, které se týkají tohoto problému, jsou ČSN ISO 18431. V těchto normách se seznámíme jak s úpravami signálu (filtrování, vzorkování), tak i s analýzou v časové a frekvenční oblasti.

Ačkoliv tato práce pojednává o různých problematikách, normy, které se zde používají, mají mezi sebou jistou návaznost. Některé normy jsou pro dané oblasti pouze stručně charakterizovány a na bližší informace včetně podrobných vzorců je odkazováno přímo do daných norem.

Seznam symbolů a zkratek

| | |
|--------------------------------------|---|
| a | Zrychlení vibrací |
| ADC..... | Analogový digitální převodník |
| AML | Aktivní magnetická ložiska |
| $a_w(t)$ | Zrychlení v daném frekvenčním pásmu měření jako funkce času |
| a_{w0} | Širokopásmová efektivní hodnota zrychlení |
| a_{we} | Odlíšné energetický ekvivalentní střední hodnoty |
| a_x, a_y | Amplitudy trajektorie vibrací ve směrech x a y |
| ČSN | Česká státní norma |
| D_{max} | Maximální výchylka motoru ze středu vůle radiálního AML |
| f_s | Vzorkovací frekvence |
| H..... | Výška osy stroje |
| ISO..... | International Organization for Standardization |
| m..... | Frekvenční vzorek |
| T..... | Perioda |
| T_0 | Doba hodnocení |
| T_e | Kratší časové úseky |
| $v(t)$ | Okamžitá hodnota rychlosti kmitání v periodě T |
| $w(n)$ | Funkce časového okna |
| x | Výchylka vibrací |
| $X(m)$ | diskrétní Fourierova transformace |
| $x(n)$ | Vzorkovaná fyzikální veličina v časové oblasti |
| x_{rms} | Efektivní hodnota velikosti vibrací |
| \tilde{v} | Efektivní hodnota rychlosti |
| $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ | Výstřednosti od středu vůle AML ve směrech x a y |
| ω | Úhlová rychlost vibrací |

1 Metody hodnocení vibrací a maximální přípustné hodnoty vibrací elektrických točivých strojů

1.1 ČSN EN 60034-14 ed. 2

Tato norma se vztahuje na točivé elektrické stroje, konkrétně na mechanické vibrace určitých strojů (stejnoseměrné a trojfázové střídavé) s výškou osy od 56 mm a se jmenovitým výkonem do 50 MW, s provozními otáčkami od 120 min^{-1} do $15\,000 \text{ min}^{-1}$.

Tato norma se ale nevztahuje na stroje, které jsou namontované na *pracovním místě* (norma, která se vztahuje na stroje měřené na pracovním místě, je část ISO 10816 a ISO 7919), dále také např. pro trojfázové komutátorové motory, trojfázové stroje pracující v jednofázových sítích, jednofázové stroje, vodorovné hydrogenerátory, turbogenerátory větší než 20 MW a sériové stejnosměrné stroje nebo stroje s magnetickými ložisky [1].

1.1.1 Metody hodnocení vibrací

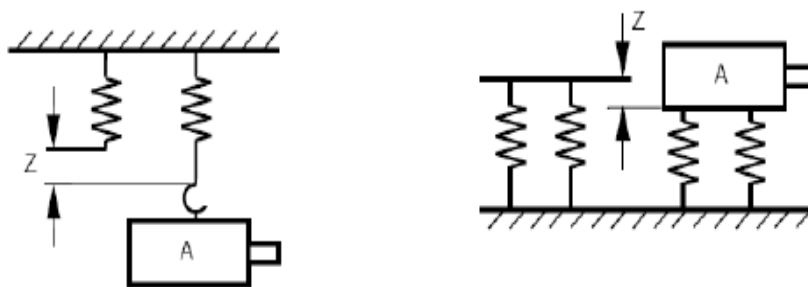
Aby bylo možné hodnotit, jaký vztah je mezi vyvážením a vibracemi točivých strojů, musí být zaručená určitá montáž stroje, jelikož montáž stroje je úzce spojena s vibracemi elektrického stroje. Vibrace je tedy nutné měřit na samostatném stroji za určitých stanovených zkušebních podmínek. Z těchto podmínek pak můžeme obnovovat zkoušky a tím si zajistíme srovnatelnost měření.

Z hlediska montáže stroje se podle [1] rozdělují uložení na:

- Pružné uložení
- Pevné uložení

Pružné uložení

Toto uložení spočívá v tom, že se stroj zavěsí na pružinu, nebo se položí na pružnou podložku (viz obrázek 1)



A – zkoušený stroj

Z – výchylka (o ní se zmíníme později)

Obr. 1: Příklad pružného uložení stroje [1]

Z toho obrázku lze stanovit pružnost závěsného systému pro stroje s určitou hmotností a v závislosti na jmenovitých otáčkách od 600 min^{-1} do 3600 min^{-1} . Pokud by se jednalo o otáčky nižší než 600 min^{-1} , není měření s tímto uložením vhodné.

Pevné uložení

Toto uložení spočívá v tom, že se stroj připevňuje na pevnou desku, nebo přímo na pevnou podlahu.

Z hlediska pevného uložení se stroje rozdělují dle [1] na:

- Vodorovné
- Svislé

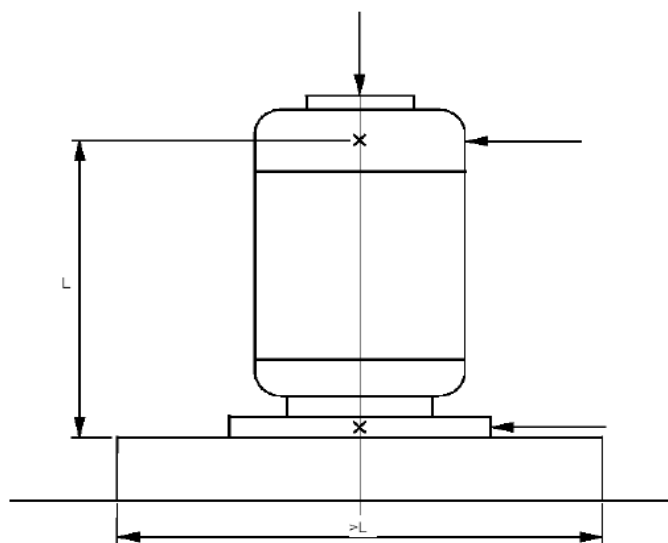
Vodorovné stroje

Tyto stroje by dle [1] měly být:

- Připevněné přímo k pevné podlaze, nebo
- Pomocí svojí základové desky k pevné podlaze, nebo
- K pevné desce, která by měla vyhovovat požadavkům pevného uložení

Svislé stroje

Zatímco u vodorovných strojů byly popsány 3 způsoby připevnění, u svislých strojů je připevnění složitější. Svislé stroje by měly být podle [1] namontovány na pevnou pravoúhlou nebo kulatou ocelovou desku s vyvrtaným otvorem ve středu pro konec hřídele. Navíc by plocha pro přírubu měrného elektrického stroje měla být opracovaná a měla by být s otvory se závity na přírubové šrouby. Pro názornou ukázkou svislého uložení je zde uveden příklad na obrázku 2.



L – výška stroje k hornímu ložisku

Obr. 2: Příklad svislého uložení stroje [1]

1.1.2 Maximální přípustné hodnoty vibrací

Základním rozdělením maximálních přípustných hodnot vibrací je dle [1] následující:

- Mezní hodnoty vibrací tělesa ložiska, které se dále rozdělují na:
 - a) Mezní hodnoty velikosti vibrací
 - b) Mezní hodnoty rychlosti vibrací střídavých strojů na kmitočtu odpovídajícím dvojnásobku síťového kmitočtu
 - c) Axiální vibrace
- Mezní hodnoty relativních vibrací hřídele

Mezní hodnoty vibrací tělesa ložiska

- a) **Mezní hodnoty velikosti vibrací** – tyto mezní hodnoty se týkají tří výsledných efektivních hodnot vibrací: rychlosti vibrací, výchylky vibrací, zrychlení vibrací. Která hodnota z těchto tří bude největší, ta se stane rozhodující pro hodnocení velikosti vibrací. Tyto mezní hodnoty jsou pak dány tabulkově, ve kterých se stroje rozdělují podle dvou stupňů A a B (tyto stupně jsou použity z důvodů zvláštních požadavků na vibrace), podle uložení stroje a také podle výšky osy H.
- b) **Mezní hodnoty rychlosti vibrací střídavých strojů na kmitočtu odpovídajícím dvojnásobku síťového kmitočtu** – tyto mezní hodnoty se týkají dvoupólových strojů, které by mohly mít při tomto kmitočtu elektromagneticky buzené vibrace. Při tomto hodnocení musí být stroj v pevném uložení. Tabulka je stejná jako v předchozím případě, ale mění se pouze mezní hodnota velikosti vibrací pro výšku osy $H > 280$ mm, ale jen v případě, že by dominovala složka vibrací na kmitočtu odpovídající dvojnásobku síťového kmitočtu.
- c) **Axiální vibrace** – tyto vibrace se týkají ložisek a jejich konstrukce. Při těchto axiálních pulzacích by mohlo dojít k poškození pouzdra ložisek. Pro tyto vibrace platí stejná tabulka jako pro mezní hodnoty velikosti vibrací.

Mezní hodnoty relativních vibrací hřídele

Toto měření se doporučuje používat pouze pro stroje, které obsahují kluzná ložiska s otáčkami $> 1\,200\text{ min}^{-1}$ a se jmenovitým výkonem $> 1\,000\text{ kW}$. Mezní hodnoty jsou dané tabulkou, která se rozděluje na dva stupně A a B (důležitost zařízení)

1.2 ČSN ISO 10816 – obecně

Tyto normy jsou navrženy pro hodnocení vibrací různých typů strojů na měření na nerotujících částech. Tato část je návodem pro měření v místnostech a týká se např. mohutnosti vibrací na ložiskách stroje, dále také ložiskových stojanech. V každé normě označené 10816-X se hodnocení vyhodnocuje pomocí dvou kritérií: **Velikosti vibrací** a **Změna velikosti vibrací** (výjimkou je ČSN ISO 10816-8 [6]).

1.3 ČSN ISO 10816-3

Tato norma se konkrétně vztahuje na průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 min^{-1} a $15\,000 \text{ min}^{-1}$ při měření in situ.

1.3.1 Metody hodnocení vibrací

Jak již bylo zmíněno výše, metody hodnocení vibrací se rozlišují pomocí dvou kritérií:

- 1) **Velikost vibrací** – Pro posuzování kritéria velikosti vibrací norma zavádí pásma a meze hodnocení. Tyto pásma se liší pro jednotlivé kategorie strojů, tak jak je norma definuje, a vycházejí z maximálního přípustného dynamického zatížení ložisek a stroje samotného. Pásmo **A** je takové, ve kterém by se měly stroje nacházet při začátku provozu – tj. nové stroje. Stroje, jejichž vibrace leží v pásmu **B**, norma označuje jako stroje, které mohou být provozovány po neomezeně dlouhou dobu. Stroje ležící v pásmu **C** již nejsou vhodné pro dlouhodobý provoz a vyžadují opravu. Pásmo **D** potom zahrnuje vibrace strojů vyloženě nebezpečných při provozu.

Podle tohoto kritéria se tedy určuje maximální hodnota vibrací s přijatelnými dynamickými zatíženími na ložiskách a také se zjišťuje přenos vibrací do okolního prostředí.

Jednotlivé meze jsou stanoveny tak, aby pásmo vibrací, ve kterém se stroj nachází, odráželo skutečný stav bez ohledu na použitý typ ložisek. K zařazení do těchto pásem se 18 využívá měření efektivní hodnoty rychlosti vibrací, což ve většině případů postačuje. Vyžití samotné rychlosti bez frekvence ale může vést k značným výchylkám vibrací – např. pro pomaloběžné stroje. Naopak u strojů s vysokými otáčkami to může mít za následek velké zrychlení. Proto norma stanovuje frekvenční rozsah, ve kterém je zavedeno kritérium konstantní rychlosti, pod a nad tímto frekvenčním rozsahem je přípustná rychlost vibrací funkcí frekvence. U naprosté většiny strojů se setkáváme s tím, že vibrace mají jedinou frekvenční složku stanovenou rychlostí rotace rotační části stroje.

- 2) **Změna velikosti vibrací** – Změna velikosti vibrací se provádí vzhledem ke zvolené

referenční hodnotě. Velikost vibrací se v průběhu času může značně měnit (zvyšovat i snižovat), což by mělo být důvodem ke zjištění příčiny a přijetí opatření, i když se vibrace stroje nenachází ve výše definovaném pásmu C. Tyto změny jsou totiž stejným indikátorem poškození stroje jako samotná velikost vibrací. Vzhledem k tomu, že při vyhodnocování změny velikosti porovnáváme s referenční hodnotou, norma stanovuje, že se měření provádí v jednom stejném místě a za pokud možno stejných provozních podmínek.

1.3.2 Provozní meze

Tyto meze se určují na základě dlouhodobého provozu stroje. Dle [2] se provozní meze rozdělují na **výstraha** a **přerušeni provozu**, přičemž mez **výstraha** slouží jako varování, že došlo k dosažení max. přípustné hodnoty vibrací, ale neznáme to, že je potřeba stroj ihned vypnout, ale při této mezi se může normálně pokračovat v provozu a oprava se tedy může dělat za chodu stroje. Naopak mez **přerušeni provozu** znamená, že pokud dojde k překročení dané velikosti vibrací, může dojít i k poškození stroje, proto se doporučuje ihned opravit závadu nebo nepřetržitě stroj vypnout.

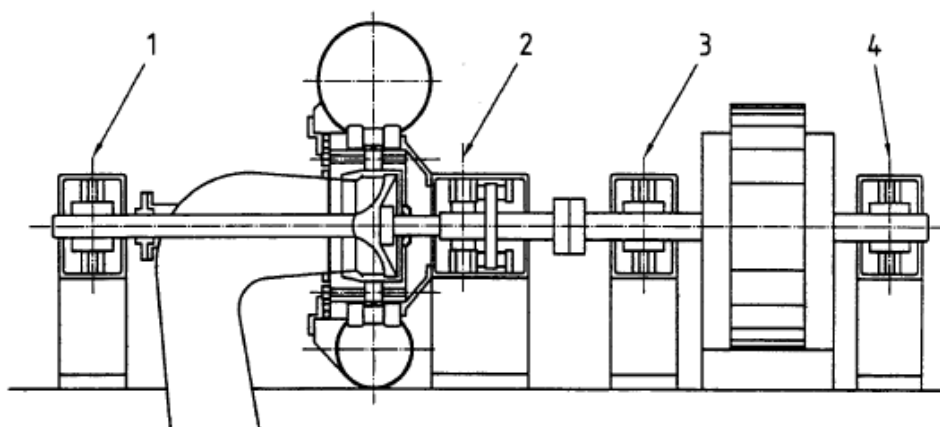
Stanovení těchto mezí je uvedeno v [2], zároveň také tabulky.

1.4 ČSN ISO 10816-5

Tato norma se konkrétně vztahuje na soustrojí ve vodních elektrárnách a čerpacích stanicích.

1.4.1 Metody hodnocení vibrací

Pro tuto normu platí stejná kritéria, jako pro [2], proto není nutné, je znovu připomínat. Hranice pásem hodnocení jsou opět udány tabulkově (stroje rozděleny do 4 skupin, to odpovídá 4 tabulkám. Tato tabulka platí pro místa měření 1,2,3 a 4, která jsou znázorněna na obrázku 3.



Obr. 3: Místa měření u soustrojí ve skupině 1 s horizontálním hřídelem a ložisky v ložiskových stojanech nebo ve štitěch, uchycených na tuhém základě, s otáčkami nad 300 1/min [3]

1.4.2 Provozní meze

Obdobně jako to bylo u předchozí normy, se meze rozdělují na **výstraha** a **přerušení provozu**, ve kterých platí stejné podmínky, jako u [2].

Nicméně tyto meze mohou podle [3] být zablokovány z důvodu zvláštních provozních podmínek, kdy stroj pracuje např. mimo jeho normální rozsah. Z tohoto důvodu se tyto meze musí řídit pomocí druhé skupiny vybraných hodnot (jsou vybrány podle maximálních hodnot vibrací, které byly akceptovány při převzetí stroje).

1.5 ČSN ISO 10816-6

Tato norma se konkrétně vztahuje na stroje s vratným pohybem se jmenovitým výkonem nad 100 kW.

1.5.1 Metody hodnocení vibrací

Kritéria vibrací jsou zde uvedeny jako stupně mohutnosti vibrací, přičemž tyto hodnoty jsou dány tabulkově a graficky. Pro určení stupně mohutnosti je nutné změřit celkové efektivní hodnoty (od 2 Hz až 1000 Hz) výchylky, rychlosti a zrychlení [4]. Z každé z těchto tří veličin se vybere největší efektivní hodnota, která byla naměřená na hlavní konstrukci stroje, aby se určil stupeň mohutnosti. Z těchto tří stupňů mohutnosti se vybere největší hodnota, která se zaznamená do tabulky.

Pásma hodnocení jsou stejná jako u [2].

1.6 ČSN ISO 10816-7

Tato norma se konkrétně vztahuje na odstředivá čerpadla pro průmyslová použití včetně měření na rotujících hřídelích.

1.6.1 Metody hodnocení vibrací

Hodnocení vibrací se rozděluje opět pomocí dvou kritérií, která jsou popsána již v kapitole 1.3 podle [2]. Tato kritéria se používají pouze za ustálených podmínek a jmenovitých otáčkách stroje, nemohou se tedy použít v přechodovém stavu (např. rozběh). Avšak i v přechodovém ději se musí vibrace omezit, aby se vyloučil škodlivý kontakt mezi statorovými a rotorovými částmi. Podle [5] se udává, že maximální vibrace při přechodovém ději by měly být pod horní mezí pásma C.

1.6.2 Dělení čerpadel

Dle [5] se rozdělují čerpadla do dvou skupin:

- a) Čerpadla, u kterých musí být splněná určitá úroveň spolehlivosti, pohotovosti anebo u nich existují bezpečnostní důvody (např. čerpadla použitá na toxické, nebo jinak nebezpečné kapaliny).
- b) Čerpadla, která se používají pro méně důležité informace (např. čerpadla, ve kterých neúčinkují nějaké nebezpečné látky- pro kapaliny)

1.6.3 Pásma hodnocení a jejich hranice

Tyto pásma hodnocení se shodují s normou [2] a hranice těchto pásem je opět znázorněná tabulkově. V této tabulce jsou uvedeny meze rychlosti vibrací pro obě skupiny čerpadel (tyto meze rychlosti jsou uvedeny v efektivní hodnotě). Dále se v tabulce vyskytují také maximální provozní meze (výstraha, přerušení provozu – viz [2], kapitola 1.3.2) a přijímací zkoušky jak in situ, tak u výrobce.

1.7 ČSN ISO 10816-8

Tato norma se konkrétně vztahuje na pístové kompresory.

1.7.1 Kritéria vibrací

Pro tyto kritéria platí, že maximální hodnoty vibrací pro celkové rychlosti, výchylky a zrychlení vibrací musí být v efektivní hodnotě.

Pásma hodnocení

Rozdělují se dle [6] následovně:

- **Pásmo A, B:** Pro tyto pásma platí, že jsou kompresory s těmito vibracemi vhodné pro dlouhodobý provoz.
- **Pásmo C:** Kompresory v tomto pásmu s určitými vibracemi jsou považovány za nevhodné, co se týče dlouhodobého provozu. V tomto pásmu lze kompresor používat po nějakou omezenou dobu, kdy by bylo možné kompresor opravit.
- **Pásmo D:** Hodnoty vibrací u těchto kompresorů jsou tak veliké, že by mohlo dojít k poškození kompresoru a jeho připojeného zařízení.

Kritéria pro přejímku

Musí se dohodnout mezi dodavatelem a zákazníkem ještě před instalací. Pro stanovení těchto kritérií pro přejímku je uvedena tabulka.

1.7.2 Maximální přípustné hodnoty vibrací

Podle [6] jsou přípustné hodnoty dány tabulkově a jedná se o celkové přípustné hodnoty pro výchylku, zrychlení a rychlost jak u horizontálních, tak vertikálních systémů kompresorů.

Po této tabulce by následovaly další dvě tabulky, přičemž ve druhé by se jednalo o rychlost vibrací a ve třetí o zrychlení vibrací.

Pro tyto hodnoty z tabulek platí, že se jedná o kompresor, který je připevněný na tuhých základech (např. beton). Jsou ale také případy, kdy je kompresor a pohon připevněn na rámu. V tomto případě musí být rám dostatečně tuhý a musí být připevněn na betonovém základě (nesmí docházet k rezonanci).

1.7.3 Křivky mezi pro celkové hodnoty rychlosti vibrací

Pokud se jedná o sinusové signály, existují určité vztahy mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením vibrací. Tyto vztahy se pak dají použít pro přepočítání výchylky a zrychlení vibrací na rychlost vibrací.

- Výchylka: $x = \int v dt = \iint (adt) dt = -\frac{i}{\omega} v = -\frac{1}{\omega^2} a$

- Rychlost: $v = \frac{dx}{dt} = \int a dt = i\omega x = -\frac{i}{\omega} a$

- Zrychlení: $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x = i\omega v$

i – imaginární jednotka;

ω – úhlová rychlost vibrací, $\omega = 2\pi f$.

1.8 ČSN ISO 10816-21

Tato norma se konkrétně vztahuje na větrné turbíny s vodorovnou osou rotoru s převodovkou.

1.8.1 Metody průměrování a veličiny pro hodnocení vibrací větrných turbín

Tato metoda se zavádí v důsledku změny větru (jak síly, tak směru). Zatím, co u většiny norem se měření provádí za ustálených podmínek, zde to není možné. Proto se vymyslela tato metoda průměrování, kde se musí naměřit několik hodnot a poté zprůměrovat.

Jako příklad výpočtu si zde uvedeme zrychlení a_{w0} , což je širokopásmová efektivní hodnota. Tato hodnota charakterizuje celkové zatížení za celkovou dobu hodnocení.[7]

$$a_{w0} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} a_w^2(t) dt}$$

$a_w(t)$ – zrychlení v daném frekvenčním pásmu měření jako funkce času;

T_0 – doba hodnocení

Dále pak rychlost vibrací v_{w0} by mohla být vypočítána podobným způsobem.

Doba hodnocení T_0

Tato doba se mění v závislosti na použité frekvenci. Pokud by se jednalo např. o stožár s frekvencí mezi 0,1 Hz a 10 Hz, doba hodnocení je nastavena na 10 minut. Takovýmto způsobem se může měřit i s frekvencí pod 1 Hz (frekvence otáčení rotoru).

Nicméně může se stát, že nastanou vibrace mezi 10 Hz a více než 100 Hz. Takovéto vibrace se vyskytují na převodovkách a generátorech přímo na jejich konstrukci a doba hodnocení by byla na těchto spektrech 1 minuta.

Mohlo by se také stát, že by bylo nutné dobu hodnocení rozdělit na kratší časové úseky. Je to z důvodu výrazně se měnícího buzení vibrací, protože podle toho se mění energeticky odlišné ekvivalentní hodnoty.

$$a_{w0} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{e=1}^n a_{we}^2 T_e}$$
$$kde \quad T_0 = \sum_{e=1}^n T_e$$

1.8.2 Kritéria hodnocení

Viz [2]. Jediná změna, která se týká těchto kritérií je ta, že místo strojů se jedná o větrné turbíny a jejich komponent.

1.8.3 Provozní meze

Pro [7] platí, že se pracovní meze rozdělují na **výstraha**, **poplach** a **vypnutí**.

- **Výstraha** – tato mez není pevně daná, protože může mít různou úroveň u různých větrných turbín. Nicméně se ale doporučuje, aby tato hodnota byla nastavena podle základní hodnoty + 25% meze B/C pásem hodnocení. Pokud by základní hodnota byla zvolena nízká, mohla by tato mez být pod pásmem C.
- **Poplach** – tato mez slouží pro ochranu větrných turbín a jejich komponent před poruchou, která by mohla vést k nebezpečným pracovním podmínkám větrné turbíny. Hodnoty pro tuto mez bývají pro většinu turbín stejné z hlediska podobné konstrukce. Doporučuje se, aby hodnota této meze nepřekračovala 1,25 násobek

hodnoty meze pásem C/D.

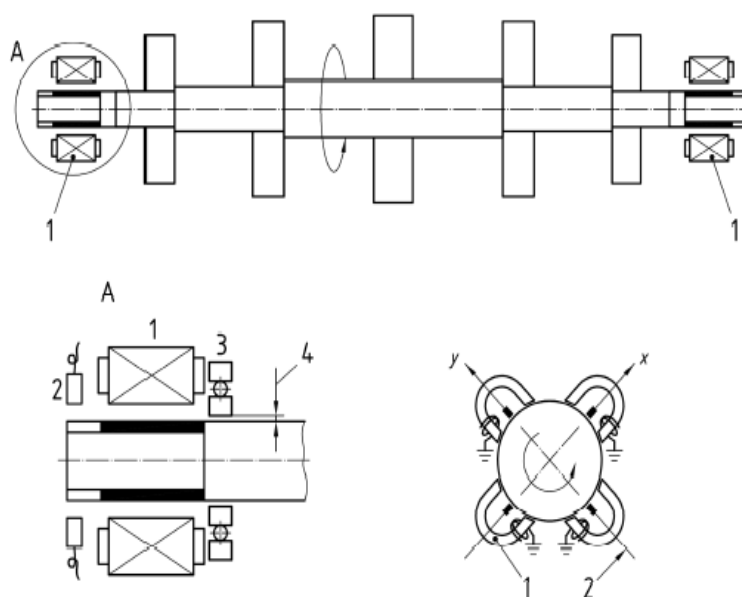
- **Vypnutí** – při této mezi dochází k přerušení provozu. Avšak tyto meze nejsou předem stanoveny, protože závisí na typu turbíny a také na větrných podmínkách. Pouze občas se stává, že meze určuje předem výrobce.

1.9 ČSN ISO 14839 – obecně

Tyto normy jsou navrženy pro točivé stroje, které jsou vybaveny aktivními magnetickými ložisky a dosedacími ložisky. Konkrétně se budeme zabývat normou ČSN ISO 14839-2 [8], především hlavně hodnocením vibrací.

1.10 ČSN ISO 14839-2

Tato norma se vztahuje na vibrace točivých strojů vybavených aktivními magnetickými ložisky.



1 – AML 2 - snímač výchylky 3 - dosedací ložisko 4 - vůle

Obr. 4: Systém rotoru vybaveného aktivním magnetickým ložiskem [8]

1.10.1 Metody hodnocení vibrací

K posouzení výchylky čepu v AML (aktivním magnetickými ložisky) se používají kritéria vibrací. Norma uvádí dvě kritéria, jedno kritérium uvažuje amplitudu pozorované výchylky, druhé uvažuje změnu amplitudy, jak při zmenšování, tak zvětšování.

Kritérium I

Pokud by se jednalo pouze o stroje s AML, toto kritérium by se týkalo nastavení hranic výchylky čepu. Je to z důvodu, aby se dodržela hranice vůle za chodu. Další záležitosti (např. dynamické zatížení ložisek) bohužel nejsou součástí této normy, jelikož se jedná o měkké bezkontaktní uložení AML ve srovnání s kluznými ložisky (s olejovým filtrem)[8]. Tyto kluzná ložiska jsou součástí normy ISO 7919-1 a jsou pro ně stanoveny pásma hodnocení, která odpovídají normě [2].

Kritérium II

Toto kritérium odpovídá kritériu uvedené v normě ČSN ISO 10816-3 [2].

1.10.2 Maximální přípustné hodnoty vibrací

- **Maximální výchylka rotoru ze středu vůle radiálního AML:**

$$D_{max} = \max[\sqrt{x^2(t) + y^2(t)}] - \text{přesná rovnice}$$

nebo přibližně: $D_{max} = \sqrt{x_{max}^2 + y_{max}^2}$ – sledování pohybové křivky vibrací
kde

$$x_{max} = \varepsilon_x + a_x$$

$$y_{max} = \varepsilon_y + a_y$$

ε_x, a_x – Výstřednosti od středu vůle AML ve směrech x a y

ε_y, a_y – Amplitudy trajektorie vibrací ve směrech x a y

Tato výchylka by byla s maximální chybou přibližně 40 %, proto se používá jako rovnice k odhadu.

1.11 ČSN ISO 20816 – obecně

Tato norma souvisí s normami ČSN ISO 10816. V minulosti byla zrušena norma 10816-1 a byla nahrazena normou ČSN ISO 20816-1. Nicméně normy 10816 se týkají pouze měření na nerotujících částech, naopak normy 20816 se týkají jak měření na nerotujících částech, tak i na rotujících hřídelích.

1.12 ČSN ISO 20816 – 1

Tato norma se vztahuje na měření a hodnocení vibrací a strojů, ve které jsou uvedeny obecné pokyny.

1.12.1 Metody hodnocení vibrací

Tato norma uvádí dvě kritéria hodnocení mohutnosti vibrací u různých tříd strojů. První kritérium se zabývá velikostí zjištěných širokopásmových vibrací a druhé kritérium posuzuje změny velikosti nehledě na to, zda se naměřené vibrace zmenšily nebo zvětšily. Tyto kritéria budou podrobněji popsána v následujících podkapitolách.

Kritérium I – Velikost vibrací

Mohutností vibrací se nazývá nejvyšší hodnota z měření na různých místech stroje. Norma definuje mezní hodnoty mohutnosti vibrací, dle kterých lze zařadit stroj do jednoho ze 4 pásem [9], které jsou rozebrány v kapitole 1.3, ČSN ISO 10816-3 [2].

Pomocí tohoto zařazení lze následně rozhodnout o dalším provozu stroje nebo navržení nezbytných opatření, jako je např. odstávka a oprava stroje. Numerické hodnoty, jež jsou přiřazeny k jednotlivým hraničním pásem, nejsou pevně dány a mohou se odlišovat podle doporučení výrobce stroje nebo na základě zkušeností.

Tato část normy ČSN ISO 20816 hodnotí stroje na základě měření od 10 Hz až do 1 000 Hz. Dle zkušeností se v tomto pásmu nachází převážná část informací o strojích. Ovšem je nutné podotknout, že použití tohoto pásma u strojů s nízkými otáčkami (pod 600 ot·min⁻¹) by bylo chybné. V těchto případech je zapotřebí změnit dolní mez měřeného pásma.

Kritérium II – Změna velikosti vibrací

Toto druhé kritérium poskytuje hodnocení změny velikosti vibrací oproti dříve určené referenční hodnotě, která se stanovuje za ustálených provozních podmínek při dobrém provozním stavu stroje. Pokud se objeví významné zvětšení nebo zmenšení velikosti vibrací, je zapotřebí reagovat. Tyto změny mohou být postupné anebo okamžité a mohou signalizovat, že se objevilo poškození, nebo mohou být upozorněním před hroící poruchou.

Při hodnocení tímto kritériem musí být naměřené vibrace sejmuty snímačem ve stejném směru, místě a za přibližně stejných provozních podmínek stroje. [9]

1.12.2 Faktory, ovlivňující kritéria hodnocení

Podle ČSN ISO 20816-1 existuje velký rozsah různých faktorů, na které je třeba brát zřetel. Jsou to například účel, pro který je měření prováděno, typ prováděného měření, místo měření, otáčky hřídele, typ ložiska, jeho vůle a průměr atd. [9]

1.13 ČSN 01 1411

Tato norma se vztahuje na mechanické kmitání strojů s provozními otáčkami od 10 do 200 s⁻¹, konkrétně se jedná o základní směrnici pro ohodnocení mohutnosti kmitání. Podle této normy se stanovují třídy a jediné kritérium mohutnosti kmitání na nerotujících částech stroje (např. stator, základ). Dále se tato norma vztahuje také na metody měření mohutnosti kmitání.[10]

Norma se ale netýká speciálních strojů, které jsou vyráběny v malých sériích a taky strojů, které by potřebovaly nějaké speciální vyšetřování kmitání pomocí speciálních přístrojů.

1.13.1 Mohutnost kmitání

Mohutnosti kmitání se v této normě uvádějí tabulkově, ve kterých jsou uvedeny jednotlivé třídy mohutnosti kmitání. Tato tabulka byla schválena Stálou komisí pro normalizaci Berlín, prosinec 1978.

Stanovení hodnoty mohutnosti kmitání

Třída mohutnosti vibrací se volí podle velikosti a hmotnosti vibrujících těles, dále rozhoduje i místo uložení stroje a jeho použití. Nesmí se také zapomenout na pracovní parametry stroje.[10]

Mohutnost kmitání se posuzuje na základě velikosti efektivní hodnoty rychlosti v kmitání, které se naměřilo v rozsahu od 10 do 1000 Hz.[10]. Rozhodující hodnota mohutnosti kmitání se stává největší hodnota z naměřených efektivních hodnot rychlosti

kmitání na kontrolních místech.

$$\tilde{v} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

$v(t)$ - okamžitá hodnota rychlosti kmitání v periodě T

2 Metody monitorování stavu a diagnostiky strojů

Monitorování stavu

Důvod monitorování stavu vibrací je takový, aby se získávaly informace o provozním stavu stroje jak pro zabezpečení, tak pro jejich údržbu. Při takovémto monitorování se pomocí časových intervalů sesbírá určitý počet dat, které se poté porovnávají. Tím se zjišťuje dynamické chování stroje. O metody monitorování stavu vibrací se zajímá norma ČSN ISO 13373-1. [11]

Diagnostika strojů

Diagnostika je v překladu nějaký soubor detekčních metod pro určení stupně poškození materiálu nebo zařízení. V tomto případě se diagnostice bude věnovat norma ČSN ISO 13373-3, ve které se uvádí pokyny, které by se měly uvažovat při provádění vibrační diagnostiky strojů. [12]

2.1 ČSN ISO 13373-1

Tato norma se vztahuje na měření a funkci sbírání dat vibrací strojů, které jsou určeny pro monitorování stavu. Týká se pouze rotačních strojů.

Tato část normy je základním dokumentem, která dle [11] zahrnuje:

- metody, parametry měření;
- volbu, umístění a připevnění snímačů;
- sběr dat;
- provozní podmínky strojů;
- systémy monitorování vibrací;
- systémy pro úpravu signálů;
- rozhraní pro systémy na zpracování dat;
- nepřetržité a periodické monitorování.

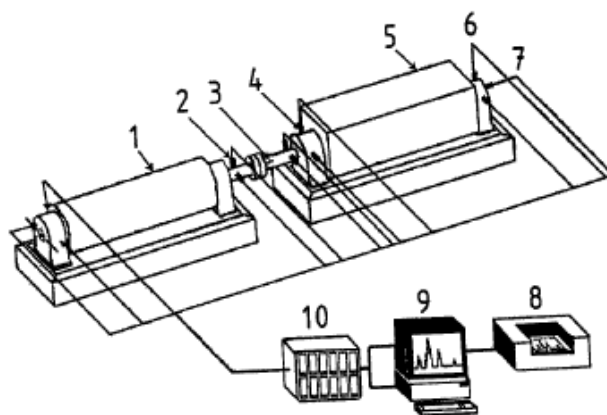
2.1.1 Monitorování stavu vibrací

Typy systémů pro monitorování stavu vibrací

Podle normy ČSN ISO 13373-1 [11] máme 3 různé typy systémů. Při volbě tohoto systému se musíme zaměřit na několik faktorů, které byly vhodné pro daný měřicí systém. Tyto faktory mohou být např. důležitost provozu stroje, cena stroje, kvalita měřicího a diagnostického systému, cena monitorovacího systému, bezpečnost a vlivy prostředí.

Trvale instalované systémy

Už z názvu systému vyplývá, že se bude jednat o systém, kde jsou trvale nainstalovány snímače, zesilovače a zařízení, které bude zpracovávat a ukládat data. Tyto data se mohou sbírat nepřetržitě (kontinuálně), nebo v pravidelných časových intervalech (periodicky). Omezení těchto systémů je hlavně z hlediska nákladných a kritických strojů, nebo se stroji, které nemají jednoduché monitorovací úlohy.



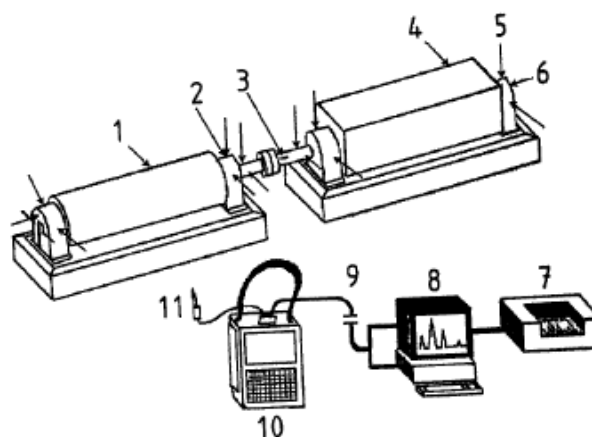
Legenda

1 – hnací stroj (pohon), 2 – sondy na výchylku hřídele (typické), 3 – fázová reference, 4 – snímače na stacionární konstrukci ložisek (typické), 5 – poháněný výrobní stroj, 6 – radiální, 7 – axiální, 8 – tiskárna, 9 – počítač s datovou pamětí, 10 – zesilovač pro úpravu signálu

Obr. 5: Příklad trvale instalovaného on-line systému monitorování vibrací [11]

Mobilní monitorovací systémy

V tomto případě se jedná o systém, který je méně nákladný a není až tolik propracovaný. Data se zde sbírají pouze periodicky pomocí přenosného datového kolektoru (ten může být nastaven automaticky, nebo manuálně).



Legenda

1 – hnací stroj (pohon), 2 – datové body (typické), 3 – fázová reference, 4 – poháněný výrobní stroj, 5 – radiální, 6 – axiální, 7 – tiskárna, 8 – počítač s datovou pamětí, 9 – připojení počítače, 10 – přenosný sběrač dat, 11 – snímač

Obr. 6: Příklad mobilního monitorovacího systému [11]

Semipermanentní systémy

Tyto systémy jsou kombinací trvalého a mobilního systému. Ve většině případů to bývá tak, že snímače jsou trvale nainstalovány, ale prvky pro sběr dat jsou připevněny občasně.

Sběr dat

Jak již bylo zmíněno výše, sbírání dat může být nepřetržité nebo periodické. O nepřetržitý a periodický sběr dat se stará trvale instalovaný systém, který je znázorněn na obrázku 5. O takovýto systém může být doplněn i automatický systém s multiplexními připojeními. Nicméně musíme být splněna podmínka, že rychlost multiplexování (přepínání) je natolik velká, aby nebyla ztracena žádná důležitá data. Výhodou tohoto systému je to, že je schopný pracovat on-line, což znamená, že se dá použít v jakémkoliv reálném čase. Takovýto systém se může instalovat přímo na místě stroje, nebo na vzdálenějších místech (jeho data jsou pak přenesena do centrálního střediska).

Mobilní systémy se používají u strojů, u kterých nelze nějakým způsobem obhájit trvale instalovaný systém. Pro mobilní systémy je vhodné používat periodické monitorování

Pro sběr dat se doporučuje, aby provozní podmínky téměř kopírovaly normální provozní podmínky stroje. Je to z takového důvodu, aby byla zajištěna platnost dat. Pokud

to z nějakého důvodu není možné kopírovat, musí se dobře znát charakteristiky stroje.

Program pro monitorování stavu

Pokud už jsme si zvolili zařízení a vhodný monitorovací systém, doporučuje se se sestavit vývojový diagram. Vzhledem k tomu, že je každý závod a každý systém jedinečný, vývojový diagram se upravuje takovým způsobem, aby byl co nejvíce prospěšný.

Dále se podle [11] doporučuje, aby každá sesbíraná data měla u sebe zapsána konkrétní provozní podmínky, jako jsou otáčky (1/min), zatížení, nebo teplota a další provozní parametry, které by mohly ovlivnit měřené vibrace.

2.2 ČSN ISO 13373-3

Předmětem této normy jsou obecné postupy, při kterých musí brát zřetel při provádění vibrační diagnostiky strojů.[12] Dále se z této normy můžeme dozvědět, jak přistupovat k diagnostice závad.

2.2.1 Diagnostický přístup

Pro vytvoření strukturovaného diagnostického přístupu se používají 3 základní nástroje:

- **Vývojový diagram** – Jedná se o tzv. sled otázek a odpovědí, které nás vedou celým procesem. Význam vývojového diagramu je vysvětlen u normy ČSN ISO 13373-1 [11]. Tento diagram je použit pro výsledný přehled vibračních událostí. Z těchto událostí pak můžeme charakterizovat jejich vlastnosti.
- **Tabulky s postupem** – Tyto tabulky slouží pro podrobnější analýzu
- **Tabulky závad** – slouží jako ilustrace častých událostí u strojů.

Ke stanovení systematického přístupu k analýze vibrací strojů jsou vytvořeny tabulky, které se týkají počátečních otázek, dále diagnostických otázek a na závěr jsou zde uvedeny úvahy při doporučování akcí.

Tab. 1: Příklad počáteční otázky [12]

| Krok | Popis | Podrobnosti | Další krok |
|------|--------------------|--|------------|
| 1 | Jaký je typ stroje | Zjistit prvky stroje (hnací, hnaný, typ spojky, ložiska, pevné nebo proměnné otáčky atd.). Zná technik tento typ stroje? Existují provozní zkušenosti s touto nebo podobnou konstrukcí stroje/zařízení? Kde je zařízení a jaké je číslo jednotky? | 2 |

Tab. 2: Příklad Diagnostické otázky [12]

| Krok | Popis | Podrobnosti | Další krok |
|------|--|--|------------|
| 17 | Může být proveden trend vibrací a provozních parametrů zpět k předchozímu výskytu podobných provozních podmínek? | Kontrolovat celkové hodnoty, 1x amplitudu/fázi, 2x amplitudu/fázi, nesynchronní frekvenci, frekvenci průchodu lopatek, rotorových tyčí atd. podle typu stroje. | 18 |

Úvahy při doporučení akcí

Tyto úvahy spočívají v tom, že se ptají na otázky ještě před tím, než byly zjištěny závady.

Podle [12] se rozdělují úvahy na 3 části (ke každé bude udán příklad otázky):

- a) **Závady přístroje** – Může přístroj být opraven nebo vyměněn, když je stroj v provozu?
- b) **Méně závažné nebo nediodagnostikované závady stroje** – Může být přijato podrobnější schéma monitorování stavu pro určení budoucího zhoršení stavu v době, kdy budou prováděna další zkoumání?
- c) **Závažnější nebo diagnostikované závady stroje** – Jaký je provoz stroje z hlediska bezpečnosti?

2.3 ČSN ISO 10816-3

Ačkoliv se tato norma zajímá hlavně o hodnocení vibrací, vyskytují se zde informace o monitorování jak malých, tak i velkých strojů. V běžné praxi se k velkým strojům instalují měřicí vybavení pro trvalé přímé monitorování hodnot vibrací. U strojů, které mají menší rozměry/výkon se trvalé monitorování nepoužívá. Proto se používá mobilní monitorování, ve kterých se používá periodické měření.

2.4 ČSN ISO 10816-7

Tato norma popisuje v podstatě to samé, co se týká monitorování, jako norma ČSN ISO 10816-3 [2]. Jediné v čem je rozdíl, je to, že se v této normě nejedná přímo o stroje, ale o odstředivá čerpadla. Nicméně u čerpadel je problém při mobilním monitorování hodnot vibrací a to ten, že není vhodné periodické měření. Při tomto měření se neidentifikují náhle se objevující závady, proto se musí brát velký zřetel na čerpadla, která jsou významná z hlediska bezpečnosti a je lepší u nich použít trvalé on-line monitorování.

2.5 ČSN ISO 10816-21

Vzhledem k tomu, že se v této části normy zabýváme větrnými turbínami, jsou potřeba pokročilejší analýzy pro monitorování stavu vibrací, jelikož je nutná potřeba zajistit rychlejší odhalení závad.

3 Způsoby měření vibrací

3.1 ČSN ISO 10816 a ČSN ISO 20816-1

Na základě toho, že norma ČSN ISO 10816-1 byla zrušena, byla nahrazena normou ČSN ISO 20816-1 [9], ve které se podrobně uvádějí měření vibrací jak na nerotujících částech (ČSN ISO 10816), tak na rotujících částech (ČSN ISO 20816).

3.1.1 Měření vibrací

Tyto normy stanovují, že měření je zásadně širokopásmové, a to takové aby byl pokryt celý frekvenční rozsah konkrétního měřeného stroje. Měřené veličiny potom podle normy jsou výchylka vibrací, rychlost vibrací a zrychlení vibrací. V praxi se pro vyhodnocování vibrací používá zejména efektivní hodnota rychlosti vibrací díky svému vztahu s energií těchto vibrací. Nicméně lze použít i ostatní dvě veličiny (špičková hodnota výchylky nebo zrychlení), avšak za cenu složitějších vztahů k hodnotícím kritériím, která jsou založena na efektivních hodnotách.

Velikost a mohutnost vibrací

Velikost vibrací je naměřená hodnota na daném měřicím místě a daném směru. Protože se měření provádějí na více místech a ve více směrech, výsledkem je souhrn naměřených hodnot. Nejvyšší naměřenou hodnotu z tohoto souboru potom nazýváme mohutnost vibrací. Mohutnost ve většině případů popisuje situaci stroje po stránce vibrací.

Typy měření

Podle [9] jsou typy měření následující:

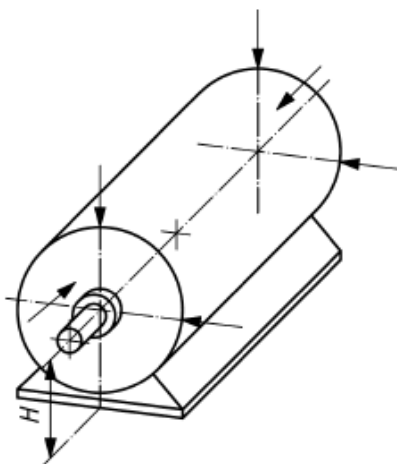
- **Měření vibrací na nerotujících částech** – tyto měření jsou prováděna pomocí seismického snímače. Pomocí toho snímače se snímá absolutní rychlost nebo zrychlení konstrukčních částí. Tento snímač je např. připojen na ložiskové skříně.
- **Měření relativních hřídelových vibrací** – tyto měření se většinou provádí pomocí bezdotykového snímače. Pomocí toho snímače se snímá vibrační výchylka mezi hřídelem a konstrukčním členem. Tento snímač je např. připojen na ložiskové skříně.
- **Měření absolutních hřídelových vibrací** – pro toto měření jsou dány 2 metody,

pomocí nichž se dají zjistit absolutní hřídelové vibrace.

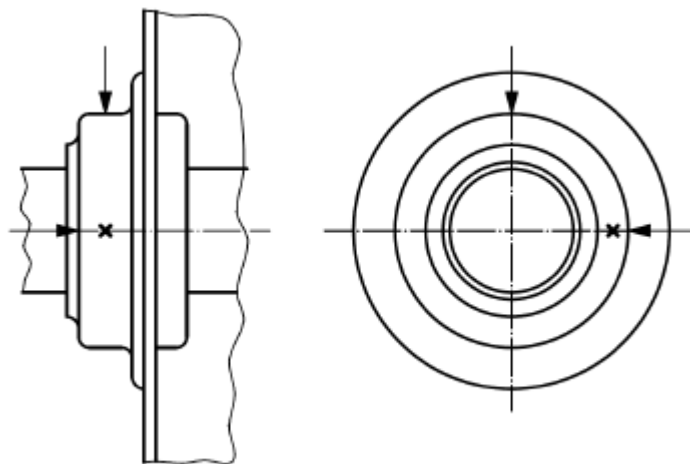
- a) Tato metoda spočívá v tom, že se použije kluzátko, na kterém je připevněn seismický snímač (akcelerometr). Pomocí této metody se absolutní vibrace měří přímo.
- b) Tato metoda spočítá v tom, že se použije bezdotykový snímač v kombinaci se seismickým snímačem. U bezdotykového snímače víme, že nám měří relativní hřídelové vibrace, seismický snímač se zde používá pro měření vibrační podpory. Oba dva snímače by měly být umístěny co nejbliž k sobě, aby měli stejný pohyb ve směru měření. Výsledné hodnoty obou snímačů se sečtou a tím poskytnou měření absolutního pohybu hřídele.

3.1.2 Měřicí místa na nerotujících částech

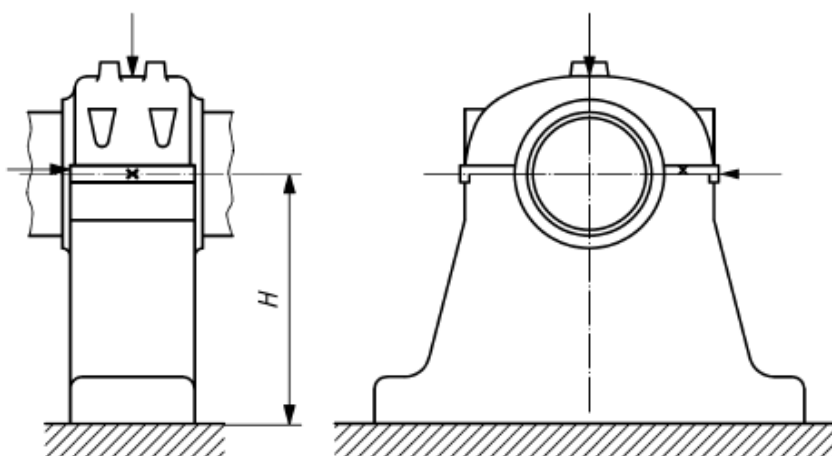
Jako měřicí místa se doporučuje používat samotná ložiska, konstrukce uložení ložisek nebo taková místa, kde naměřené hodnoty budou odpovídat skutečným vibracím stroje. Pro přejímací zkoušky stroje je nutné provádět měření ve třech navzájem kolmých směrech, při běžném provádění provozního monitorování vibrací pak postačuje provedení jednoho nebo lépe dvou měření v radiálním směru. Pokud jsou však měřeny vibrace u axiálních ložisek, je vhodnější měřit ve směru axiálním. Pro představu jsou zde uvedeny obrázky, které se týkají vodorovně připevněného stroje. Pokud by se jednalo o stroj svisle upevněný, příkladem může být obrázek 2.



Obr. 7: Měřicí body malých elektrických strojů [9]



Obr. 8: Měřicí body těles ložisek [9]



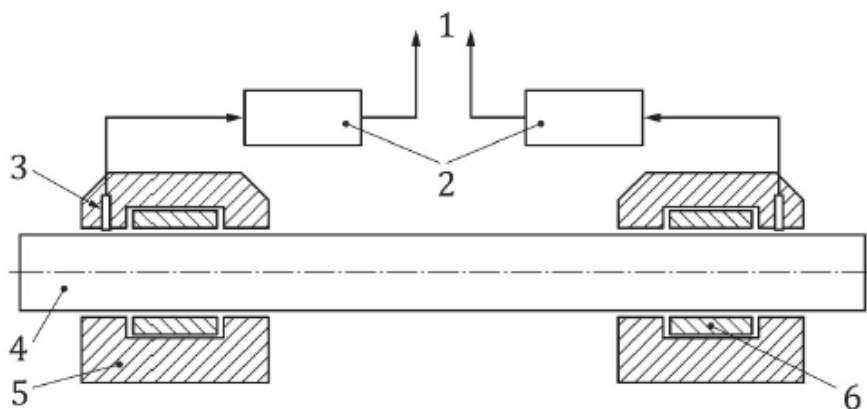
Obr. 9: Měřicí body těles ložiskových stojanů [9]

3.1.3 Měřicí místa na rotujících hřídelích

Při měření na rotujících hřídelích je důležité vložit snímače na taková místa, aby mohlo být umožněno ohodnotit příčný pohyb hřídele. Dle [9] se doporučuje, aby při měření jak při relativních, tak absolutních měřeních byly dva snímače umístěny buď v ložiskách, nebo vedle ložisek, přičemž oba dva snímače by měly být připevněny co nejbližší k ose hřídele.

Provozní podmínky stroje

Měření na rotujících hřídelích se musí provádět zejména při základních provozních podmínkách (otáčky, tlak, teplota atd.).



Obr. 10: Měřicí body pro měření na rotujících hřídelích [9]

3.1.4 Měřicí přístroje

Měřicí přístroje a snímače musejí být voleny s ohledem na vlastnosti prostředí aplikace (teplota, vlhkost, chemická agresivita) a instalovány tak, aby neovlivňovaly samotné měření. Podle normy jsou dovolené dva druhy měřících zařízení: taková, která měří a udávají efektivní hodnoty a zařízení detekující efektivní hodnoty, zobrazující však rozkmit nebo špičkové hodnoty. Když je měřena více než jedna veličina, musí měřící soustava umět zpracovávat všechny tyto veličiny.

3.2 ČSN ISO 20816-2

V této normě se udávají měřící postupy, které jsme si již uvedli v rámci kapitoly 3.1.1 jako typy měření dle [9]. Jedná se tedy o měření vibrací na nerotujících částech a rotujících hřídelů. Ačkoliv jsme se o těchto měřeních již zmínili, v této normě jsou další informace, které se týkají konkrétnějších strojů, jako jsou: plynové turbíny, parní turbíny a generátory nad 40 MW s kluznými ložisky.

3.2.1 Měřící postupy

Dle [9] víme, že se měření provádí na nerotujících částech a na rotujících hřídelů. Nicméně to neznamená, že se tato měření musí provádět na všech strojích. Kdysi se používala měření pouze na nerotujících částech, nebo na rotujících částech, nebo se dalo kombinovat. V dnešní době je více preferováno kombinované měření, ale není to podmínkou. To, jakou volbu/kombinaci vezmeme, záleží na tom, k čemu stroj bude aplikován, nebo jak se domluví dodavatel stroje se zákazníkem.

Měření vibrací na nerotujících částech

Z hlediska monitorování by měl měřicí systém měřit širokopásmové vibrace ve frekvenčním rozsahu podle [13] od 10 Hz do minimálně 500 Hz. Pokud by se toto vybavení mělo používat i pro diagnostiku, je možné, že bude potřeba větší frekvenční rozsah. Pokud by se měření provádělo pomocí snímače rychlosti vibrací, při kterém jsou považovány frekvence menší než 10 Hz, je potřeba linearizovat signál rychlosti. Toto je obzvlášť důležité pro stroje, které jsou provozovány při nízkých otáčkách.

Měření vibrací rotujících hřídelů

V minulosti se na základě zkušeností upřednostňovalo měření absolutních hřídelových vibrací s použitím kluzátek. Nicméně docházelo ke značnému omezení těchto snímačů, že už se nadále nedoporučují. V dnešní době se používají ve starších závodech, které mají ještě staré instalace.

V dnešní době jsou upřednostňována měření relativních vibrací z důvodu vyvinutí bezdotykových snímačů.

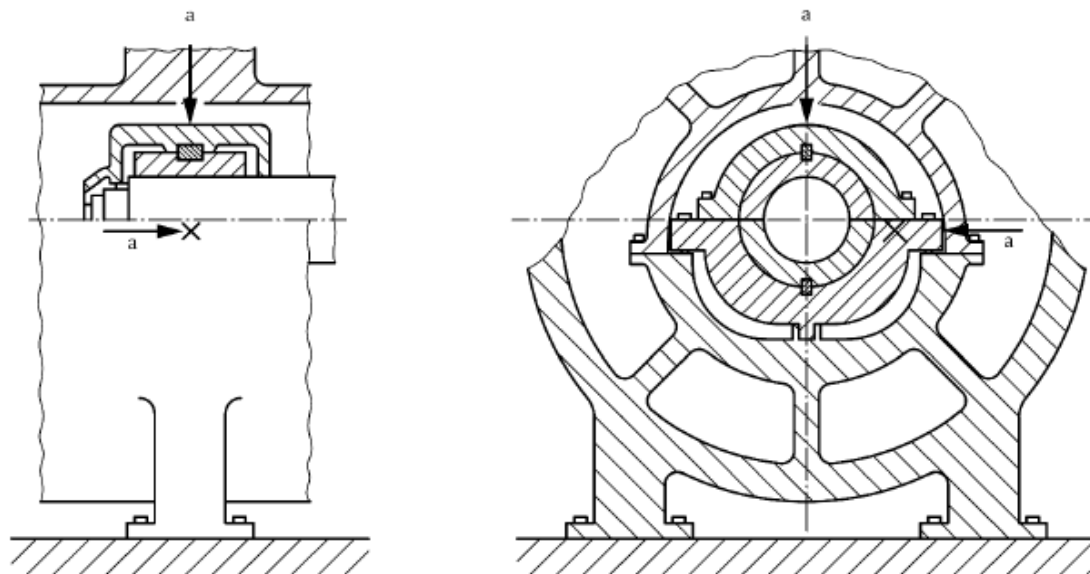
Z hlediska monitorování by měl měřicí systém měřit širokopásmové vibrace ve frekvenčním rozsahu od 1 Hz do 125 Hz [13]. Pokud by se toto vybavení mělo používat i pro diagnostiku, je možné, že bude potřeba větší frekvenční rozsah.

3.3 ČSN ISO 20816-4

V této normě se udávají měřicí postupy, které jsme si již uvedli v kapitole 3.1.1 jako typy měření dle [9]. Jedná se tedy o měření vibrací na nerotujících částech a rotujících hřídelů. Ačkoliv jsme se o těchto měřeních již zmínili, v této normě jsou další informace, které se týkají konkrétnějších strojů, jako jsou: Plynové turbíny nad 3 MW s kluznými ložisky.

3.3.1 Měřicí postupy

Tyto měřicí postupy jsou obdobné jako u předchozí normy ČSN ISO 20816-2 [13]. Jediný rozdíl se týká měření vibrací rotujících hřídelů, kde frekvenční rozsah je od 1 Hz do 500 Hz.[14]



Obr. 11: Typické měřicí body a směry na ložisku plynové turbíny [14]

3.4 ČSN EN 60034-14 ed. 2

Tato norma stanoví určité postupy pro měření vibrací při výrobní přejímací zkoušce (tato zkouška může být typová nebo výrobní kusová). [1]

3.4.1 Měřené veličiny

Měřicími veličinami se rozumí v této normě výchylka, rychlost a zrychlení vibrací na ložiskách stroje. Další veličinou je relativní výchylka vibrací hřídele.

3.4.2 Velikost vibrací

Velikost vibrací je určena vztahem

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{x_{max}^2 + x_{min}^2}{2}}$$

kde

x_{rms} je způsob označení efektivní hodnoty velikosti vibrací (z anglického výrazu „root mean square“);

x_{max} je maximální efektivní hodnota rychlosti, výchylky nebo zrychlení;

x_{min} je minimální efektivní hodnota rychlosti, výchylky nebo zrychlení.

Tento vztah se týká zejména dvoupólových asynchronních motorů, které mívají z hlediska kmitočtu odpovídající dvojnásobku skluzového kmitočtu vibrační záznamy.[1]

3.4.3 Měřicí zařízení

Tyto zařízení musí splňovat takové podmínky, jako jsou:

- Schopnost měřit efektivní hodnotu širokopásmových vibrací
- Kmitočtový rozsah od 10 Hz do 1000 Hz
- U strojů s nízkými otáčkami (pod 600 ot·min⁻¹) je zapotřebí změnit dolní mez (mezní hodnota poklesu nesmí být větší než 2 Hz)

3.4.4 Měřicí místa

Měřicí místa jsou znázorněna na obrázku 8 a 9. Obrázek 2 platí pro stroje ve svislé poloze. Obrázek 7 pak platí pro stroje, které je nutné demontovat.

4 Zpracování a analýza signálu

4.1 ČSN ISO 18431-1

Tato norma se vztahuje na zpracování signálu a je takovým obecným úvodem pro ostatní části normy ČSN ISO 18431.

Už z minulosti se skoro všechny analýzy dat provádějí pomocí matematických operací. Bylo to způsobeno z důvodu používání digitálních systémů pro sběr signálů a také zdokonalení počítačů pro zpracování dat.

Předmětem této normy je stanovit matematické transformace, které přeměňují nějaký určitý počet dat vibrací a rázů na formu, které se dají dále kvantitativně porovnávat s nějakými experimenty, nebo specifikacemi.

Velká pozornost se musí dbát na správné zjištění analyzovaného systému, aby byla použita správná transformace a fyzikální jednotky.[15]

4.1.1 Úprava signálu

Digitalizace se většinou provádí analogovým digitálním převodníkem (ADC). Aby tomu bylo tak, musí být elektrický signál ze snímače řádně upraven. Při úpravě takového signálu se musí určit několik parametrů, které souvisí se zesílením, filtrováním a digitalizací. Tyto parametry jsou pak velmi důležité, aby sběr dat byl odpovídající pro zpracování signálu.[15]

Filtrování

Ještě předtím, než se signál digitalizuje v ADC, musí se zabránit aliasingu. To dosáhneme tím, že signál přefiltrujeme přes dolní propust. Aliasing se vytvoří tak, že se v signálu objeví složky, které mají příliš vysokou frekvenci. Z toho důvodu se zavádí vzorkovací frekvence, která omezuje nejvyšší frekvence v signálu. Nejvyšší frekvenční složka signálu nesmí být zásadně větší než polovina vzorkovací frekvence. Tato frekvence se nazývá Nyquistova. Kromě dolní propusti se může požadovat i horní propust. Z důvodu

zanedbání stejnosměrné složky by totiž mohlo dojít ke snížení užitečného rozsahu ADC. Horní propust se používá pouze tehdy, kdy není stejnosměrná složka důležitá.

Vzorkování

Při této úpravě signálu se převádí analogový signál z ADC na řadu celých čísel. Posloupnost těchto čísel je vzorkovaná rychlostí, která nese název vzorkovací frekvence. Dále se zde uvádí další parametr, kterým je počet vzorků (t. délka záznamu). Tento záznam musí být dostatečně dlouhý, aby se mohl zachytit celý signál.

4.1.2 Určení typu signálu

Klasifikace těchto signálů je dána tabulkově. Z hlediska této normy se signály rozdělují na:

- **Deterministické signály**
 - a) Periodické signály
 - I. Sinusové signály
 - II. Harmonické signály
 - b) Neperiodické signály
 - I. Neharmonické sinusové signály
 - II. Přejchodové signály
- **Náhodné signály**
 - a) Stacionární signály
 - I. Ergodické signály
 - II. Neergodické signály
 - b) Nestacionární signály
 - I. Spojité signály
 - II. Přejchodové signály

4.1.3 Analýza signálů

Předběžné zpracování signálů

Účelem analýzy signálu u náhodných nebo deterministických signálů je určit, jaké je chování nebo příčina mechanického procesu, který se měří.[15]

Ještě předtím, než dojde ke zpracování signálu pro získání výsledků v časové oblasti, je digitalizovaný signál obvykle zpracován pomocí lineárních filtrů, aby došlo k odstranění nežádoucích šumů. K tomuto předběžnému zpracování se např. používá Fourierova transformace, která se vyskytuje v normě ČSN ISO 18431-2 [16].

Filtrování signálu

Provádí se pomocí horní/dolní propusti, pásmové propusti nebo zádrže.[15]

Analýza v časové oblasti

Tato analýza se provádí z toho důvodu, aby se zlepšil odstup signálu od šumu. Norma uvádí tyto analýzy:

- **Analýza velikosti** – úkolem této analýzy je určení změny velikosti vibrací v závislosti na čase
- **Statická analýza** – určení statistiky různých funkcí signálů jako funkce času
 - I. Analýza distribuční sítě
 - II. Analýza momentů
- **Analýza kovariance**
- **Analýza korelace**
 - I. Analýza autokorelace
 - II. Analýza vzájemné korelace
- **Konvoluční součin**
- **Spektrum odezvy na ráz**
- **Funkce impulsní odezvy**

Analýza signálů ve frekvenční oblasti

Tato analýza se provádí z toho důvodu, aby se určily charakteristiky jako funkce frekvence. Metody spektrální analýzy dle [15]:

- **Okna**
- **Efektivní spektrum**
- **Spektrální hustota energie**
- **Výkonová spektrální hustota**

- **Vzájemná spektrální hustota**
- **Koherence**
- **Funkce frekvenční odezvy**

Časově-frekvenční rozdělení

- **Krátkodobá Fourierova transformace**
- **Wignerovo rozdělení**
- **Spojitě waveletové rozdělení**

Průměry náhodných, stacionárních ergodických signálů

- **Odhady a chyby**
- **Náhodná chyba výpočtu výkonové spektrální hustoty**

4.2 ČSN ISO 18431-2

Tato část normy se zaměřuje na algebraické funkce. Tyto algebraické funkce popisují nějakou vybranou množinu časových oken, které se používají pro předběžné zpracování digitálně vzorkovaných dat vibrací a rázů. Dále tyto funkce předchází spektrální analýzu pomocí diskrétní Fourierovy transformace.

Tato norma tvoří jakou si množinu, ve které se nachází Hanningovo okno, okna s plochým vrtem a obdélníková okna.[16]

4.2.1 Vztah pro diskrétní Fourierovu transformaci

$$X(m) = \frac{1}{f_s} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-i2\pi nm/N}$$

kde

f_s – vzorkovací frekvence

n – časový vzorek

N – velikost bloku vzorkovaných dat

$x(n)$ – vzorkovaná fyzikální veličina v časové oblasti

i – index pro konstanty okna s plochým vrtem

m – frekvenční vzorek

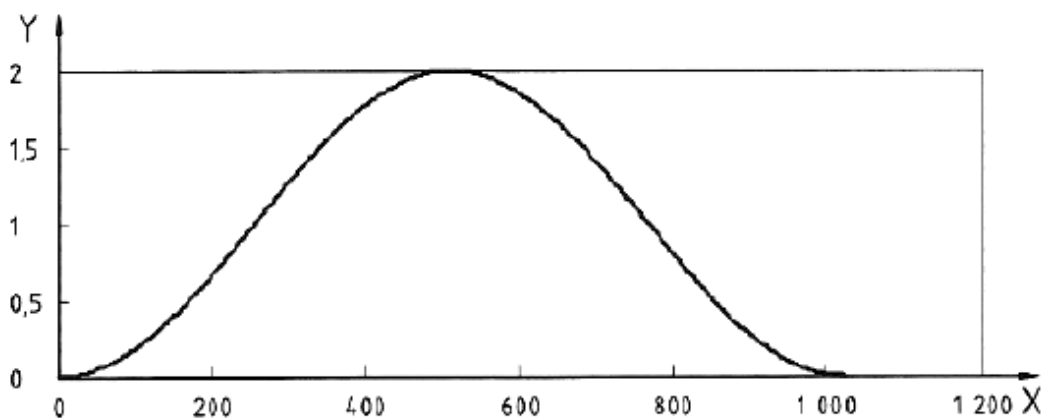
4.2.2 Obvyklá časová okna

Pro Fourierovu analýzu se obvykle používají tři typy časových oken. Jedná se o Hanningovo okno, okno s plochým vrchem a obdélníkové okno. [16]

Hanningovo okno

$$\omega(v) = 1 - \cos\left(\frac{2\pi v}{N}\right)$$

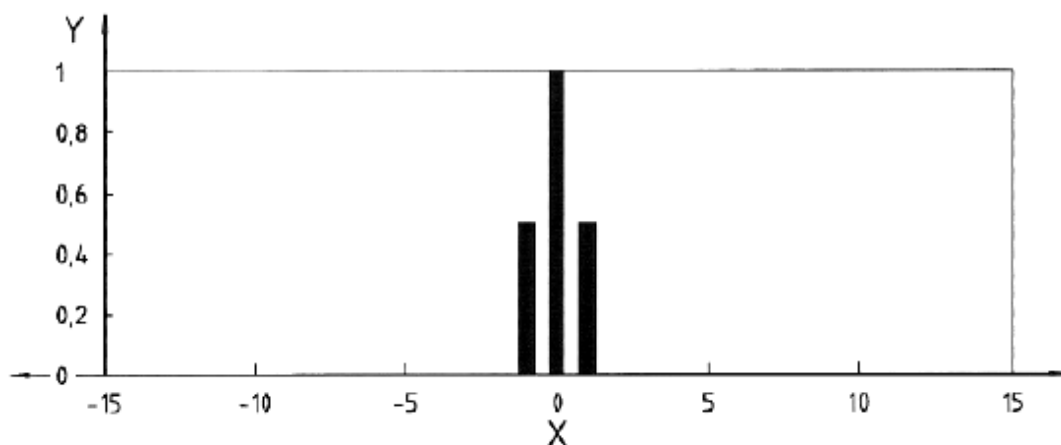
kde $v = 0, 1, \dots, N - 1$, N je počet vzorků v časovém záznamu



a)

Legenda

X vzorek
Y amplituda, $w(n)$



b)

Legenda

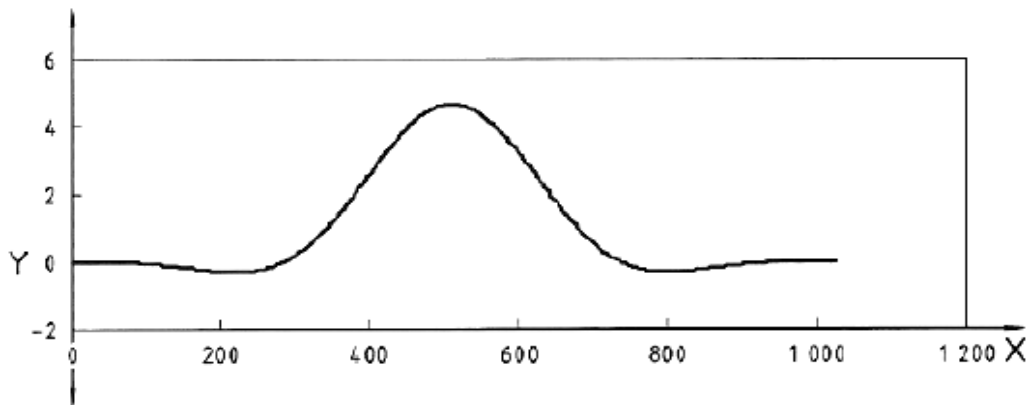
X frekvence, v Hz
Y amplituda, $W(m)$

Obr. 12: Hanningovo okno pro 1 024 vzorků [16]

Okno s plochým vrchem (Flat Top)

$$w(n) = 1 + a(1) \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + a(2) \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right) + a(3) \cos\left(\frac{6\pi n}{N}\right) + a(4) \cos\left(\frac{8\pi n}{N}\right)$$

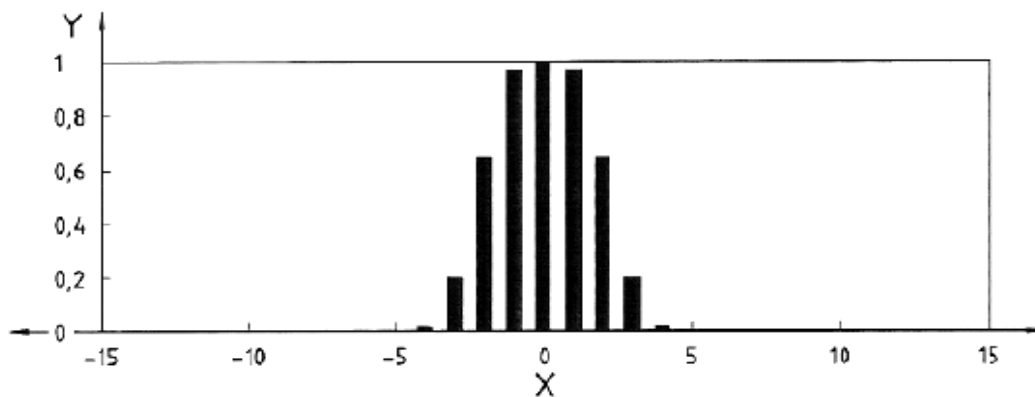
kde $n = 0, 1, \dots, N-1$, $a(1) = -1,933$; $a(2) = +1,286$; $a(3) = -0,388$; $a(4) = +0,0322$, N je počet vzorků v časovém záznamu, $w(n)$ – Funkce časového okna



a)

Legenda

X vzorek
Y amplituda, $w(n)$



b)

Legenda

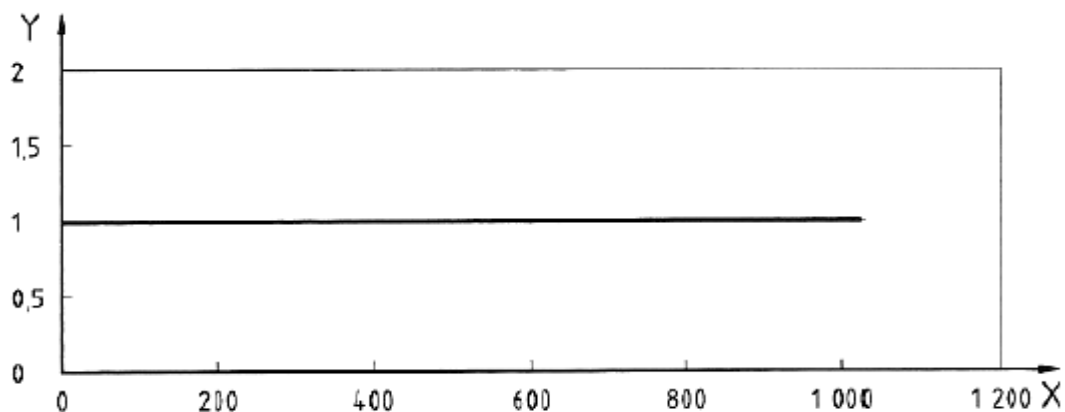
X frekvence, v Hz
Y amplituda, $W(m)$

Obr. 13: Okno s plochým vrchem (Flat Top) pro 1 024 vzorků [16]

Obdélníkové okno (Ectangular)

$$w(n) = 1$$

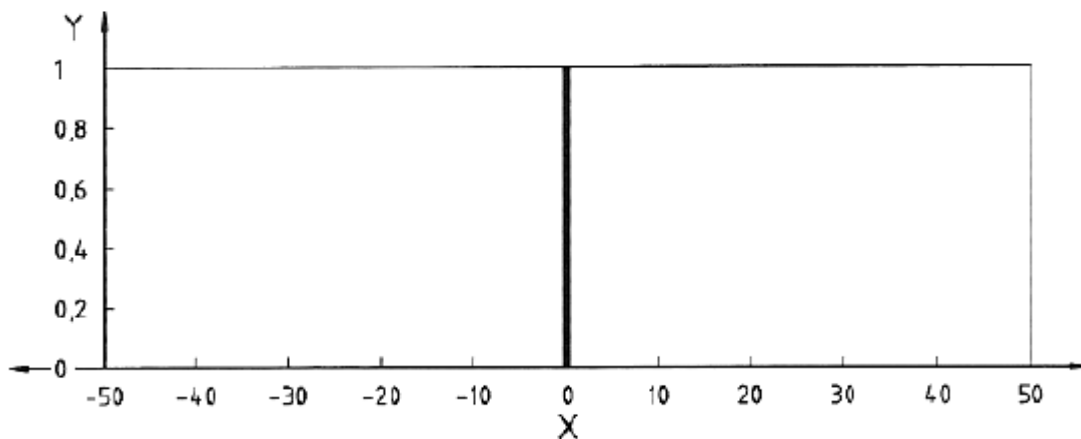
kde $n = 0, 1, \dots, N-1$, N je počet vzorků v časovém záznamu, $w(n)$ – Funkce časového okna



a)

Legenda

X vzorek
Y amplituda, $w(n)$



b)

Legenda

X frekvence, v Hz
Y amplituda, $W(m)$

Obr. 14: Obdélníkové okno (Rectangular) pro 1 024 vzorků [16]

4.3 ČSN ISO 18431-3

Tato norma se týká zpracování signálů, konkrétně metod časově-frekvenční analýzy. Tato analýza se používá pro zobrazení vibrací či rázů pomocí času a frekvence. Je to velice užitečné pro analýzu vibrací při proměnných otáčkách (u automobilů). Nicméně pro nás se tato analýza používá pro zobrazení impulzních odezvy strojů, jako je např. odezva na ráz. Pro tuto analýzu jsou zde uvedeny 4 metody. Pokud jsou tyto metody použity se správnými parametry, jsou kvantitativně zobrazeny časové a frekvenční složky rázů a vibrací.

4.3.1 Časově-frekvenční transformace

- **Krátká Fourierova transformace** – Fourierova transformace, která je použita k určení časové závislosti obsahu sinusových složek s různou frekvencí a fází v časově proměnných vibracích.[17]
- **Obecná Wigner-Villeova transformace** – časově-frekvenční popis vibrací, založený na filtrované autokorelaci signálu.[17]
 1. **Wigner-Villeova transformace** – kvadratický časově-frekvenční popis vibrací, založený na autokorelaci signálu.[17]
 2. **Choi-Williasova transformace** – použití specifického řídicího programu
- **Waveletová transformace** – vlnková transformace – časově-frekvenční popis vibrací, založený na frekvenční transformaci signálu, opatřený měřítkem.[17]

4.4 ČSN ISO 18431-4

Tato norma se týká metod, které používají pro digitální výpočet spektra rázové odezvy (SRS) ze vstupního zrychlení pomocí digitálních filtrů.[18]

4.5 ČSN ISO 13373-2

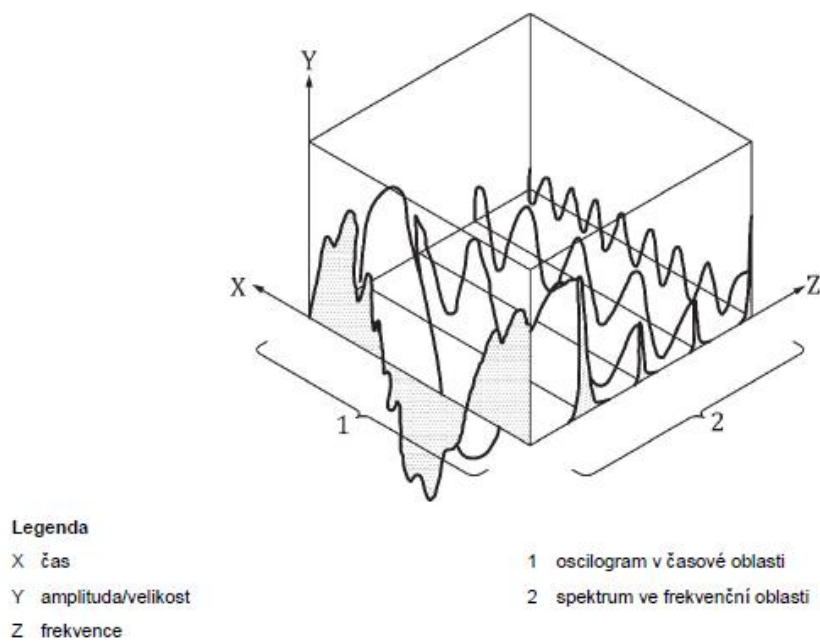
Tato část normy se zabývá jednotlivými postupy pro zpracování a prezentaci vibračních dat a také jsou zde uvedeny postupy pro analýzu vibračních charakteristik za účelem monitorování stavu vibrací. Jedná se o rotační stroje. Je zde zahrnuto několik metod, které lze aplikovat i na jiné typy strojů.

Tato část normy se rozděluje podle dvou základních přístupů při analýze vibračních signálů: na časovou oblast a na frekvenční oblast.[19]

4.5.1 Úprava signálů

Téměř na všechna měření vibrací se používají snímače, které dávají analogový elektrický signál. Tento signál je pak úměrný okamžité hodnotě vibrací zrychlení, rychlosti a výchylky. Tento výsledný signál pak může být zobrazen např. na osciloskopu.

Jaká je spojitost mezi vibračním signálem časové a frekvenční oblasti si ukážeme na obrázku 15, ve kterém jsou 4 vzájemně se překrývající signály. Tyto signály se pak skládají do výsledného složitějšího průběhu, který se zobrazuje na obrazovce analyzátoru. Tento složitý signál se pomocí Fourierovy transformace převede na čtyři rozdílné frekvenční složky, které můžeme na obrázku 15 vidět.



Obrázek 15: Časová a frekvenční oblast [19]

4.5.2 Analýza ve frekvenční oblasti

Mnohem používanější a efektivnější je analýza naměřeného signálu ve frekvenční oblasti, kde se analyzují jednotlivá frekvenční spektra. Tyto frekvence se z časového signálu získají pomocí nástroje zvaného Fourierova transformace (FFT). Pomocí ní lze získat celkové kmitání rozložené na jednotlivé složky dané jejich amplitudami, frekvencemi a počáteční fází. Díky grafickému vyjádření je pak možné přehledně vidět, jaké frekvence nejvíce přispívají k celkovému kmitání a určit tak původ budící síly, která je tvořena touto frekvencí.

4.5.3 Analýza vibrací v časové oblasti

Měřením se primárně získává signál kinematické veličiny v závislosti na čase. Analýzou tohoto signálu lze snadno získat pomocí příslušného softwaru okamžitou hodnotu, efektivní hodnotu, střední hodnotu, maximální špičku (peak), rozpětí špiček (peak-peak) a další ukazatele.

Závěr

V této bakalářské práci byla provedena literární rešerše technických norem, ve kterých se pojednává o problematikách vibrací a rázů.

Co se týče metod hodnocení a maximálních přípustných hodnot vibrací elektrických točivých strojů se kladl nejvyšší důraz na normy ČSN ISO 10816 a ČSN ISO 20816. Rozdíl mezi nimi je ten, že normy ČSN ISO 10816 se zajímají pouze o hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech, naopak normy ČSN ISO 20816 se týkají jak měření na nerotujících částech, tak i na rotujících částech. Nutno podotknout, že se tyto normy zajímají o stroje, které jsou namontované na pracovním místě. Norma, která se zaměřuje na stroje, které nejsou namontované na pracovním místě, je norma ČSN EN 60034-14 ed.2. Jako poslední norma v této část se uvádí ČSN ISO 14839-2, která se týká vibrací točivých strojů vybavenými aktivními magnetickými ložisky. Ve všech těchto normách se metody hodnocení vibrací vyhodnocují pomocí dvou kritérií, přičemž v jednom z těchto kritérií se hovoří o pásmech hodnocení, která jsou obdobná pro všechny vypsane normy.

O metody monitorování stavu a diagnostiky strojů se nejvíce zajímaly normy ČSN ISO 13373, přičemž jedna část normy se zajímá o monitorování stavu a druhá část o diagnostiku strojů. Pro monitorování stavu vibrací byly založeny určité typy systémů, u diagnostiky strojů se vytváří strukturovaný diagnostický přístup, ve kterém se objevuje určitý sled otázek a odpovědí. Pomocí těchto norem se uvádí metody monitorování i pro normy ČSN ISO 10816.

O způsobech měření vibrací se opět nejvíce zajímají normy ČSN ISO 10816 a ČSN ISO 20816, přičemž jejich způsoby měření jsou obdobné. Proto je tato problematika shrnuta pod jednu podkapitolu, kde jsou normy charakterizovány společně. V poslední části byli charakterizovány normy ČSN ISO 1843, které se zaměřují na zpracování a analýzy signálu, přičemž každá část této normy se vztahuje na jinou analýzu.

Závěrem lze říci, že vzhledem k tomu že se jedná o standardizované normy z oblasti vibrací a rázů, jejich charakter je podobný, avšak každá je přizpůsobená pro jiné podmínky. Některé normy na sebe navazují, jiné naopak mají svůj vlastní obsah.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČSN EN 60034-14. *Točivé elektrické stroje - Část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm - Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2004. 20 s.
- [2] ČSN ISO 10816-3. *Vibrace - Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 3: Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 1/min a 15 000 1/min při měření in situ*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 20 s.
- [3] ČSN ISO 10816-5. *Vibrace - Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 5: Soustrojí ve vodních elektrárnách a čerpacích stanicích*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 24 s.
- [4] ČSN ISO 10816-6. *Vibrace - Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 6: Stroje s vratným pohybem se jmenovitým výkonem nad 100 kW*. Praha: Český normalizační institut 1997. 16 s.
- [5] ČSN ISO 10816-7. *Vibrace - Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 7: Odštědivá čerpadla pro průmyslová použití včetně měření na rotujících hřídelích*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 24 s.
- [6] ČSN ISO 10816-8. *Vibrace - Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 8: Pístové kompresory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. 32 s.
- [7] ČSN ISO 10816-21. *Vibrace - Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 21: Větrné turbíny s vodorovnou osou rotoru s převodovkou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 20 s.
- [8] ČSN ISO 14839-2. *Vibrace - Vibrace točivých strojů vybavených aktivními magnetickými ložisky - Část 2: Hodnocení vibrací*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. 28 s.
- [9] ČSN ISO 20816-1. *Vibrace - Měření a hodnocení vibračních strojů - Část 1: Obecné pokyny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. 40 s.
- [10] ČSN 01 1411. *Mechanické kmitání strojů s provozními otáčkami od 10 do 200 s-1. Základní směrnice pro ohodnocení mohutnosti kmitání*. Praha: Federální úřad pro normalizaci měření, 1981. 12 s.
- [11] ČSN ISO 13373-1. *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací - Část 1: Obecné postupy*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 52 s.
- [12] ČSN ISO 13373-3. *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací - Část 3: Návod pro vibrační diagnostiku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. 36 s.
- [13] ČSN ISO 20816-2. *Vibrace - Měření a hodnocení vibračních strojů - Část 2: Plynové turbíny, parní turbíny a generátory nad 40 MW s kluznými ložisky, na pozemních základech a jmenovitými otáčkami 1 500 r/min, 1 800 r/min, 3 000 r/min a 3 600 r/min*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 28 s.
- [14] ČSN ISO 20816-4. *Vibrace - Měření a hodnocení vibračních strojů - Část 4: Plynové turbíny nad 3 MW s kluznými ložisky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019. 28 s.

- [15] ČSN ISO 18431-1 *Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 1: Obecný úvod*. Praha: Český normalizační institut, 2006. 24 s.
- [16] ČSN ISO 18431-2 *Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 2: Časová okna pro analýzu Fourierovou transformací*. Praha: Český normalizační institut, 2005. 16 s.
- [17] ČSN ISO 18431-3 *Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 3: Metody časově-frekvenční analýzy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. 12 s.
- [18] ČSN ISO 18431-4 *Vibrace a rázy - Zpracování signálů - Část 4: Analýza spektra rázové odezvy*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 20 s.
- [19] ČSN ISO 20816-2 *Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 2: Plynové turbíny, parní turbíny a generátory nad 40 MW s kluznými ložisky, na pozemních základech a jmenovitými otáčkami 1 500 r/min, 1 800 r/min, 3 000 r/min a 3 600 r/min*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 28 s.