

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Vybrané partie z elektrických strojů
(KEV/VPS)

Diagnostika elektrických strojů –
MCSCA, vibrodiagnostika

Jan Šobra

2021/2022

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

- Názvosloví
- Diagnostika elektrických strojů obecně
- Analýza proudových spekter (MCSA)
- Vibrodiagnostika

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ **Názvosloví** dle ČSN ISO 13372: *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Slovník*

- **Závada** (*fault*) = stav stroje, který nastane, když se jedna z jeho komponent nebo sestav zhoršuje nebo vykazuje abnormální chování, které může vést k poruše stroje
 - Závada může být výsledkem poruchy, ale může existovat bez poruchy
 - Plánované akce nebo nedostatek externích zdrojů nejsou závadou
- **Porucha** (*failure*) = ukončení schopnosti položky provádět požadovanou funkci
 - Porucha je událost na rozdíl od závady, která je stavem
 - Porucha je projevem závady
- **Monitorování stavu** (*condition monitoring*) = sběr a zpracování informací a dat, které ukazují stav stroje za určitou dobu
 - stav stroje se zhoršuje, když se objeví závady nebo poruchy

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ **Názvosloví** dle ČSN ISO 13372: *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Slovník*

- **Diagnostika** (*diagnostics*) = ověřování symptomů a syndromů pro určení podstaty závad nebo poruch (druh, situace, rozsah)
- **Symptom** (*symptom*) = vjem získaný pomocí lidských pozorování a měření, který může s jistou pravděpodobností naznačovat přítomnost jedné nebo více závad
- **Syndrom** (*syndrome*) = skupina znaků nebo symptomů, které dohromady označují nebo charakterizují abnormální stav
- **Znak** (*sign*) = charakteristický parametr signálu ukazující informace o stavu

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

- Elektrické stroje jsou zásadní součástí v:
 - Průmyslové výrobě
 - Energetice
 - Dopravě
- Životnost el. strojů závisí, kromě kvalitního návrhu a výroby, na vhodných provozních podmínkách a údržbě
- Včasná diagnostika závad předchází poruchám

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Hlavní důvody pro diagnostiku elektrických strojů

➤ Bezpečnost

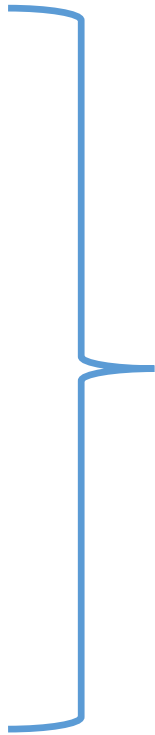
- Ohrožení zdraví, majetku a životního prostředí

➤ Spolehlivost provozu

- Omezení nečekaných odstávek
- Optimální provozování stroje

➤ Prediktivní údržba

- Menší počet náhradních dílů skladem
- Prodloužení intervalů pro údržbu



Ekonomické ztráty

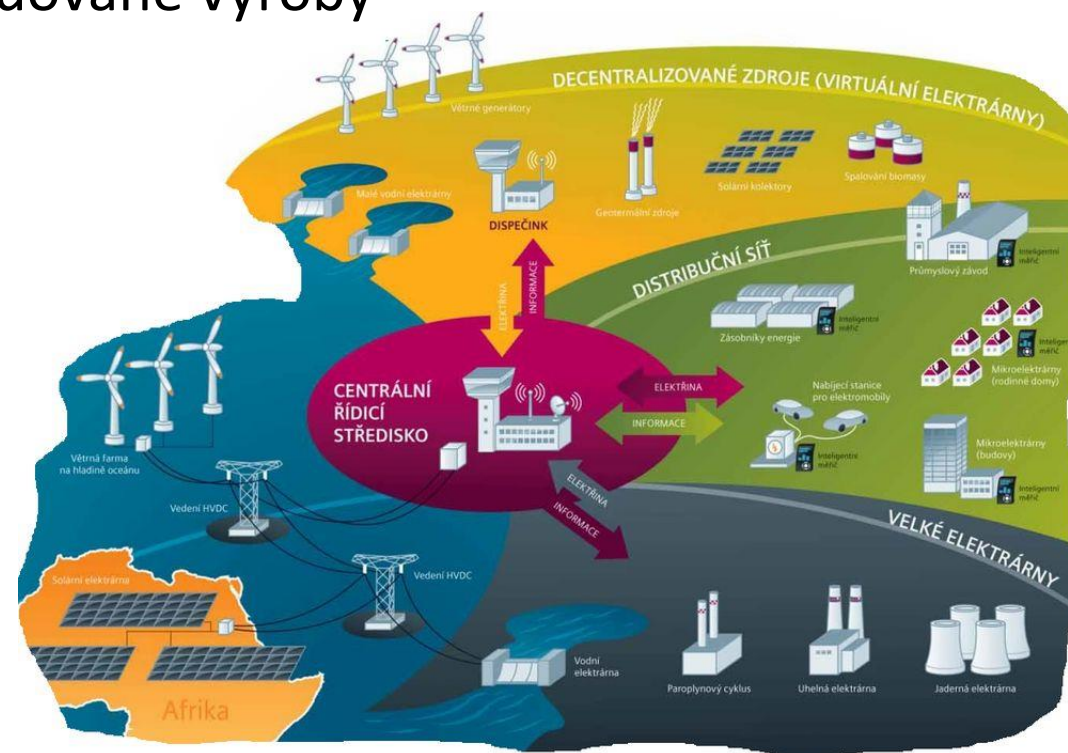
Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

- Tendence k zavádění smart grids a distribuované výroby

- Veliké množství malých generátorů
- Diagnostika důležitá k zajištění kvality a spolehlivosti dodávek

- Rozvoj elektromobility

- Diagnostika závad
- Plánování údržby motorů



Co je Smart Grid? - TZB-info, <https://elektro.tzb-info.cz/12544-co-je-smart-grid>

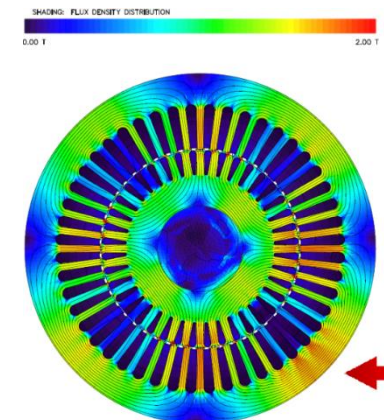
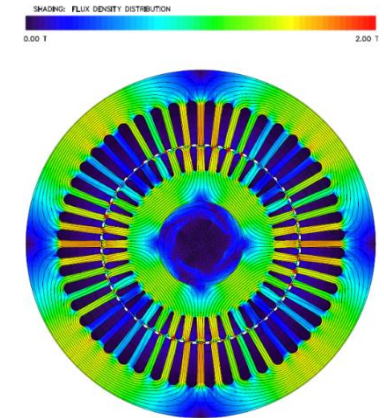
Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

- Většina strojů napájena z frekvenčního měniče
 - Vyšší obsah harmonických ve spektru
 - => šum ve spektru „snižuje“ amplitudy postranních pásem využívaných k diagnostice

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Lokální a globální parametry

- Závada se projeví jako zkreslení lokálních veličin
 - Rozložení magnetického pole a magnetické síly
- Zkreslení lokálních veličin je průměrováno za celý stroj a může se projevit v globálních veličinách
 - Proud, moment, vibrace a hluk
- Lokální veličiny jsou velmi obtížně měřitelné neinvazivními metodami a tedy nemohou být použity k diagnostice a monitorování stavu



Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

- **Lokální a globální parametry**
- Globální parametry ovšem obsahují filtrovanou a průměrovanou informaci o závadě a dávají tedy malou šanci k odhalení závady
 - Důraz na zpracování signálu s ohledem na získání užitečných dat
- Použití metod časově – frekvenční analýzy signálu proudu, vibrací a hluku
 - Krátká (short-time) Fourierova transformace
 - Vlnková (wavelet) transformace
 - Empirická modální dekompozice (Empirical mode decomposition)
 - Hilbert-Huangova transformace
 - Wigner-Villeova transformace

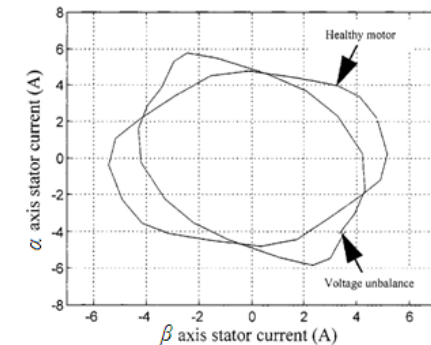
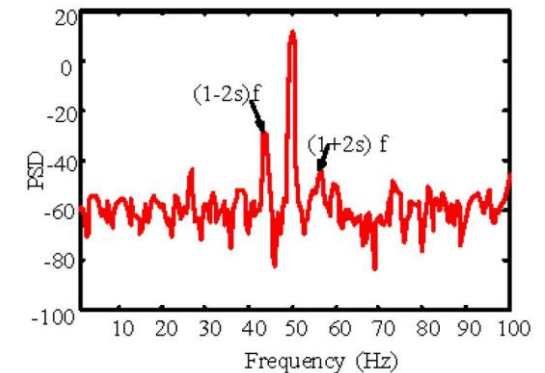
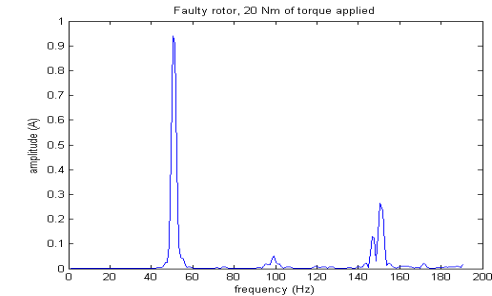
Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Analýza proudových spekter (MCSA)

➤ *MCSA = Motor Current Signature (/Signal) Analysis*

➤ Metody zpracování signálu

- Fourierova transformace (FFT, STFT, DFT, wavelets atd.)
- Spektrální analýza s vysokým rozlišením
- Parkova transformace (dq) / transformace Clarkeové ($\alpha\beta$)



Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Analýza proudových spekter (MCSA) – měřící vybavení

➤ Snímač proudu

- LEM čidlo
- Klešťový ampermetr

➤ Měřicí ústředna / analyzátor

- Vysokorychlostní sběr dat
- Komunikace s PC přes LAN / FireWire apod.



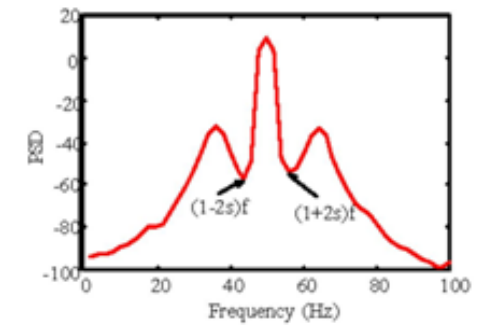
Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Analýza proudových spekter (MCSA) - Přerušené tyče rotoru

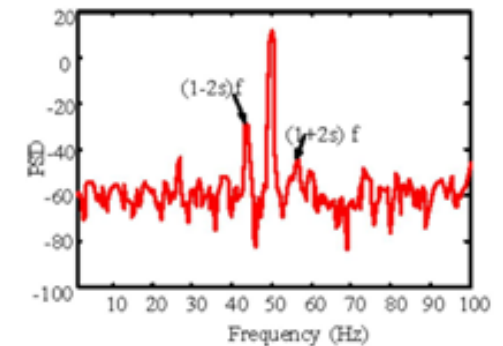
➤ Postranní pásma vedle základní harmonické proudu

➤ Dolní postranní pásmo způsobeno elektrickou a magnetickou asymetrií rotorového vinutí

➤ Horní postranní pásmo způsobeno pulzacemi momentu v důsledku proměnné rychlosti stroje



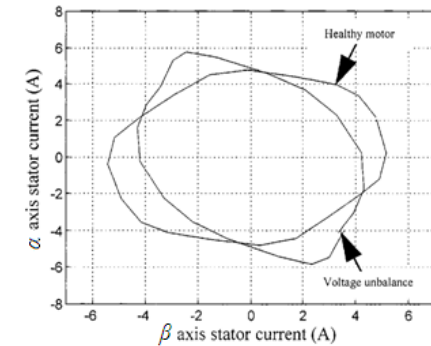
$$f_{sb} = (1 \pm 2s)f$$



Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Analýza proudových spekter (MCSA) – Park / Clarke transformace

- Patří mezi nejjednodušší a nejrychlejší transformace používané v diagnostice
 - Není potřeba velkého výpočetního výkonu



- Problém je malé množství informací a někdy špatně čitelné grafy

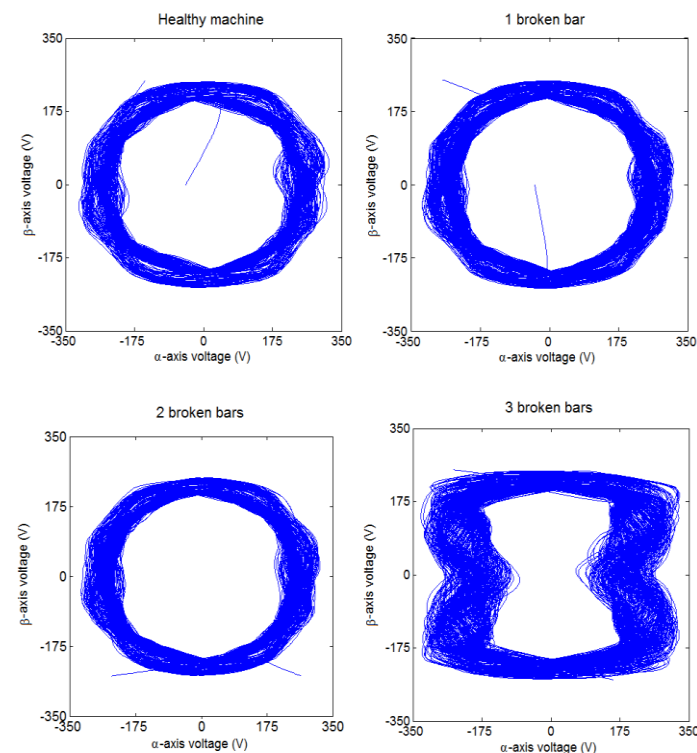
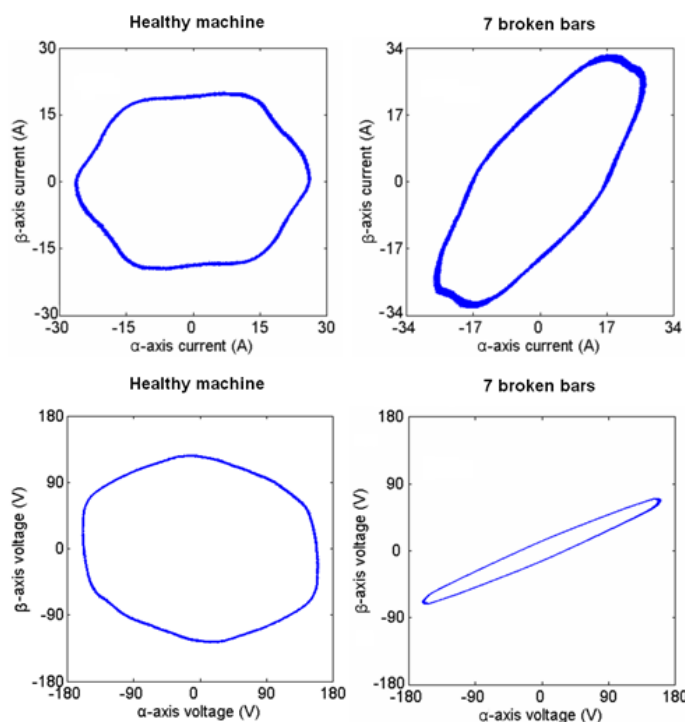
$$\begin{cases} u_d = u_a \\ u_q = \frac{1}{\sqrt{3}}(2u_b + u_c) \end{cases} \quad \begin{cases} u_\alpha = u_a \\ u_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(2u_b + u_c) \end{cases}$$

- Obvykle lze adekvátně použít k určení stavu stroje

$$\begin{cases} i_d = i_a \\ i_q = \frac{1}{\sqrt{3}}(2i_b + i_c) \end{cases} \quad \begin{cases} i_\alpha = i_a \\ i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(2i_b + i_c) \end{cases}$$

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Analýza proudových spekter (MCSA) – Park / Clarke transformace



Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Vibrodiagnostika

➤ Normy – elektrické stroje obecně

- **ČSN ISO 20816-1** Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 1: Obecné pokyny
- **ČSN EN IEC 60034-14 ed. 3** Točivé elektrické stroje - Část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm - Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací
- **ČSN ISO 10816-3** Vibrace - Hodnocení vibrací 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 15000 1/min při měření *in situ*

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ **Vibrodiagnostika**

➤ Měřené veličiny

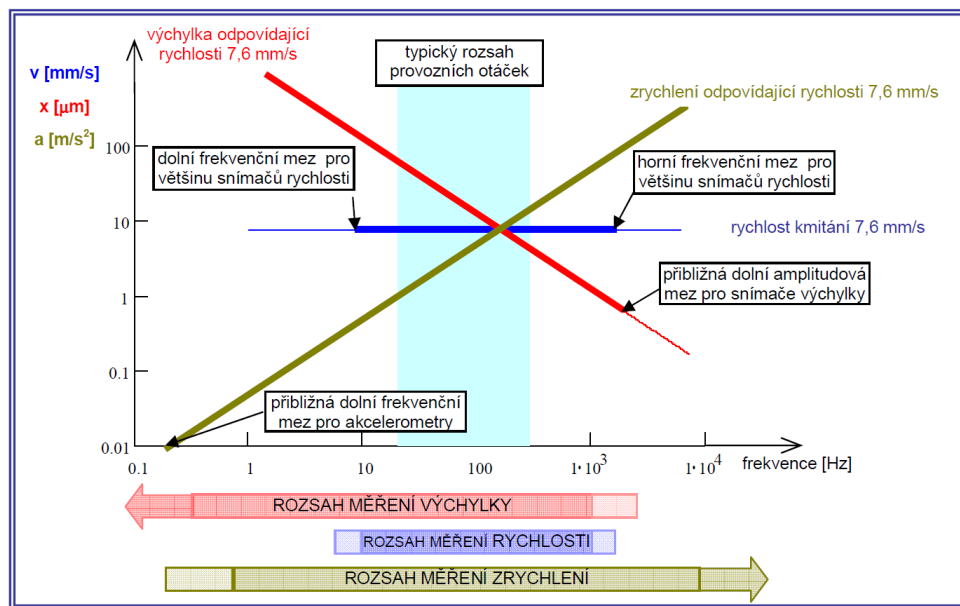
- Výchylka vibrací (μm)
- Rychlost vibrací (mm/s)
- **Zrychlení** vibrací (m/s^2)

➤ Sledovaná hodnota

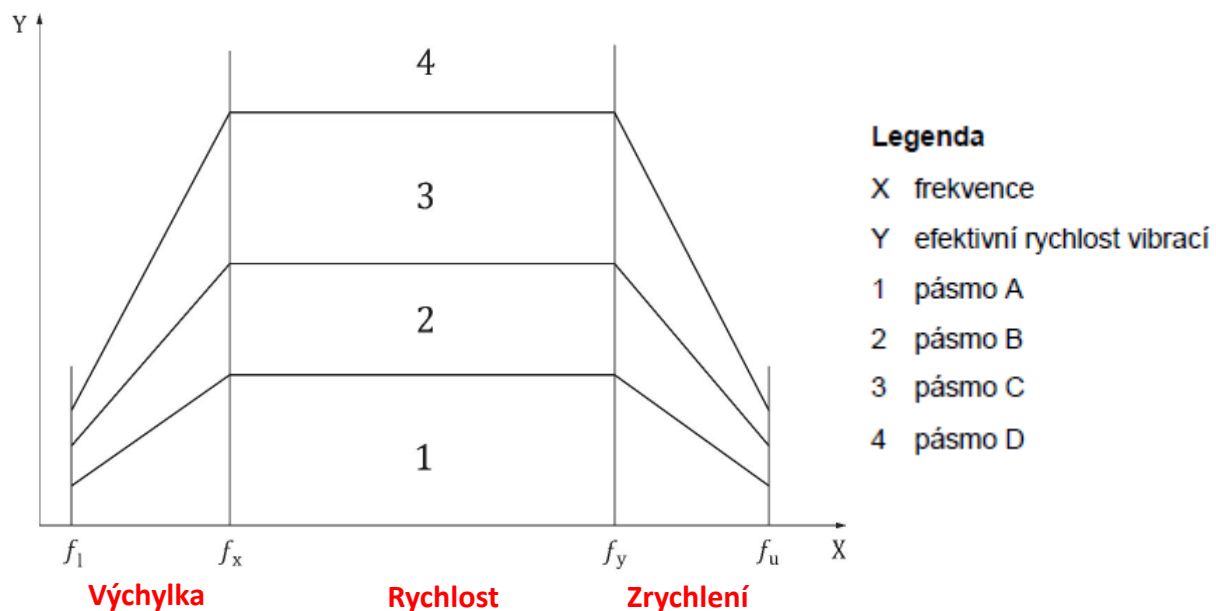
- **Efektivní hodnota** (rms)
- Špičková hodnota (0-p)
- Rozkmit (p-p)

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Vibrodiagnostika – volba měřené veličiny



Zdroj: J. Biloš and A. Bilošová, Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika, 1. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012, ISBN978-80-248-2755-1.



Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

- **Vibrodiagnostika – volba měřené veličiny**
- **Harmonické** kmitání – vztahy mezi veličinami
- Výchylka $x = A \sin(\omega t + \varphi)$
- Rychlost $v = \frac{dx}{dt} = A \omega \cos(\omega t + \varphi)$
- Zrychlení $a = \frac{dv}{dt} = -A \omega^2 \sin(\omega t + \varphi)$

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

- **Vibrodiagnostika – volba měřené veličiny**
- Měřené veličiny
 - Výchylka, rychlost, **zrychlení** na ložiskách stroje (širokopásmová efektivní hodnota)
- Frekvenční rozsah minimálně 10 Hz až 1 kHz

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Vibrodiagnostika – měřící vybavení

➤ Snímače vibrací

- Akcelerometry piezoelektrické IEPE (ICP) nebo nábojové
- Vhodné elektricky izolované pouzdro nebo základna (rušení od vf signálů – PWM apod.)
- Jednoosé / tříosé – pro běžnou vibrodiagnostiku postačují jednoosé

➤ Měřící ústředna / analyzátor

- Ruční analyzátory
- Vícekanálové měřící ústředny



Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Vibrodiagnostika – měřící vybavení

➤ Akcelerometry piezoelektrické typu IEPE (ICP)

- Integrated Electronics Piezo-Electric (IEPE), resp. Integrated Circuit Piezoelectric (ICP)
=> snímače s integrovanou elektronikou (nábojovým zesilovačem) => napěťový výstup
- Napájené konstantním proudem 2 mA až 20 mA, typicky 4 mA

➤ Akcelerometry piezoelektrické nábojové

- Výstupem elektrický náboj – nevhodné pro přenos signálu na větší vzdálenost
=> potřeba nábojového zesilovače pro převod na napětí

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

- **Vibrodiagnostika – měřící vybavení**
- Ruční (pochůzkové) analyzátory vibrací
 - Omezený počet kanálů – 1, 2 nebo 4
 - Měření většího počtu strojů v terénu – pouze záznam dat nebo rychlé porovnání trendu nárůstu vibrací
 - Možnost dalšího zpracování dat v PC
 - Moduly pro běžnou „steady-state“ analýzu, rozběhy / doběhy, vyvažování rotorů, diagnostiku závad, mazání ložisek apod.



Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Vibrodiagnostika – měřící vybavení

➤ Vícekanálové měřící ústředny

- Modulární systém – možnost přidávat měřící karty dle potřeby
- Možnost měření více veličin najednou – elektrické i neelektrické
- Horší přenositelnost, nutno zajistit napájení
- Nutnost vizualizace a zpracování dat v PC – specializovaný SW
- Komunikace s PC přes LAN / FireWire apod.



Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ **Vibrodiagnostika – měřící místa**

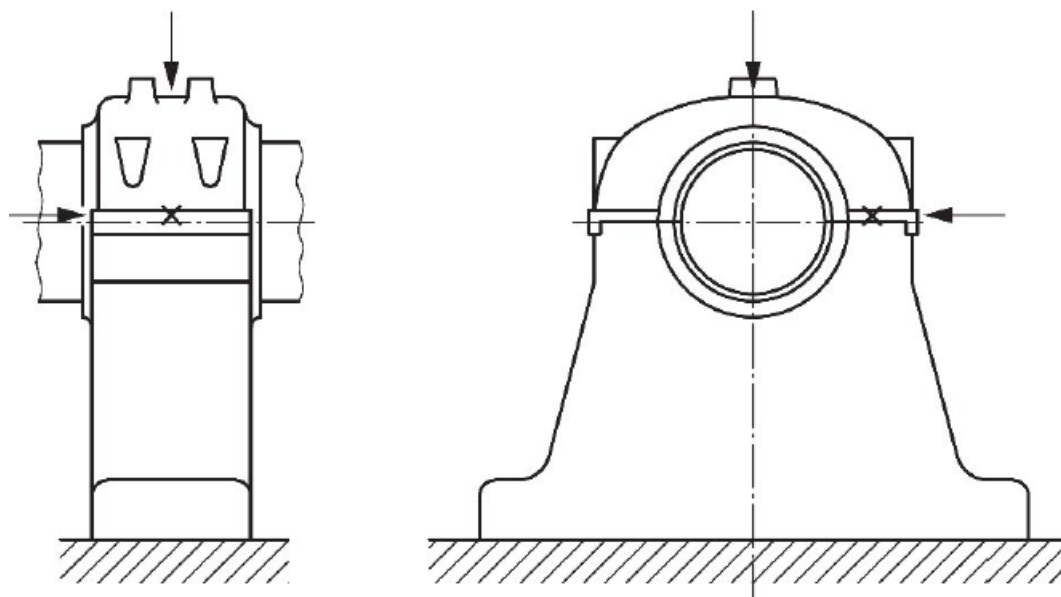
➤ Měřící místa na nerotujících částech

- Ložiska
- Nosné ložiskové skříně
- Jiné konstrukční části, významně reagující na dynamické síly přenášené z rotujících elementů v místech ložisek
- V každém místě měření ve třech vzájemně kolmých směrech nebo alespoň radiální vibrace v horizontálním a vertikálním směru

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

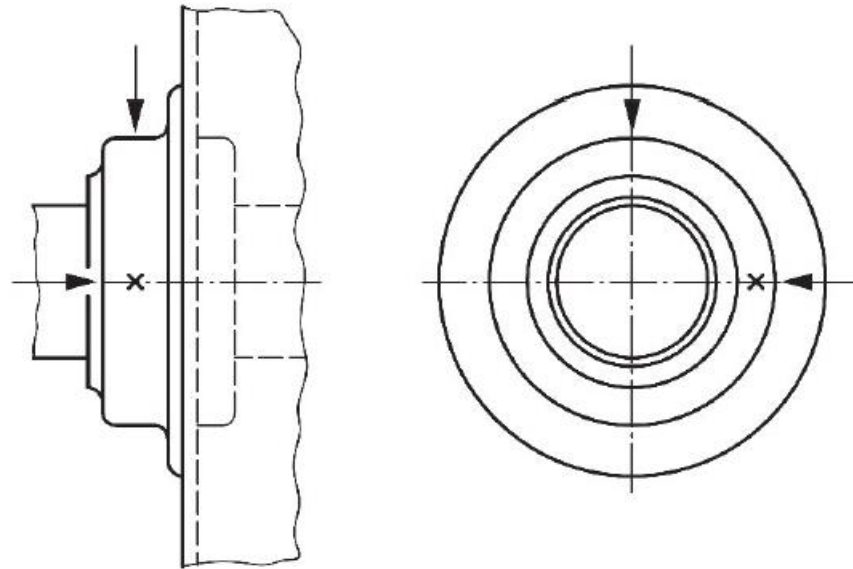
➤ Vibrodiagnostika – měřící místa

➤ Měřící body na ložiskových stojanech



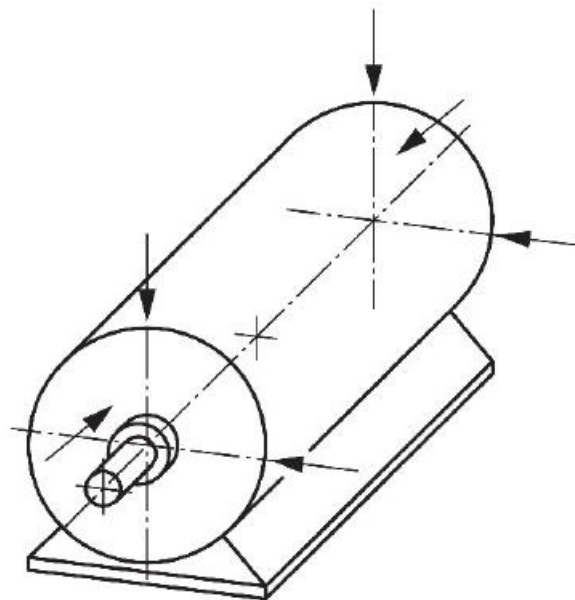
Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

- **Vibrodiagnostika – měřící místa**
- Měřící body u ložisek v ložiskových skříních



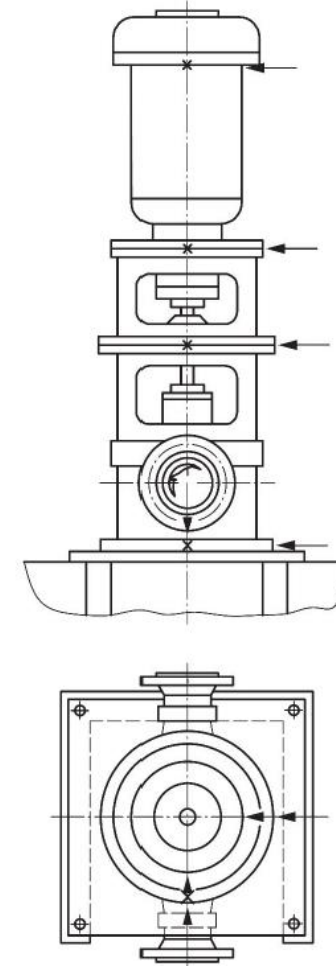
Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

- **Vibrodiagnostika – měřící místa**
- Měřící body na malých elektrických strojích



Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

- **Vibrodiagnostika – měřící místa**
- Měřící body na vertikálních soustrojích



Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

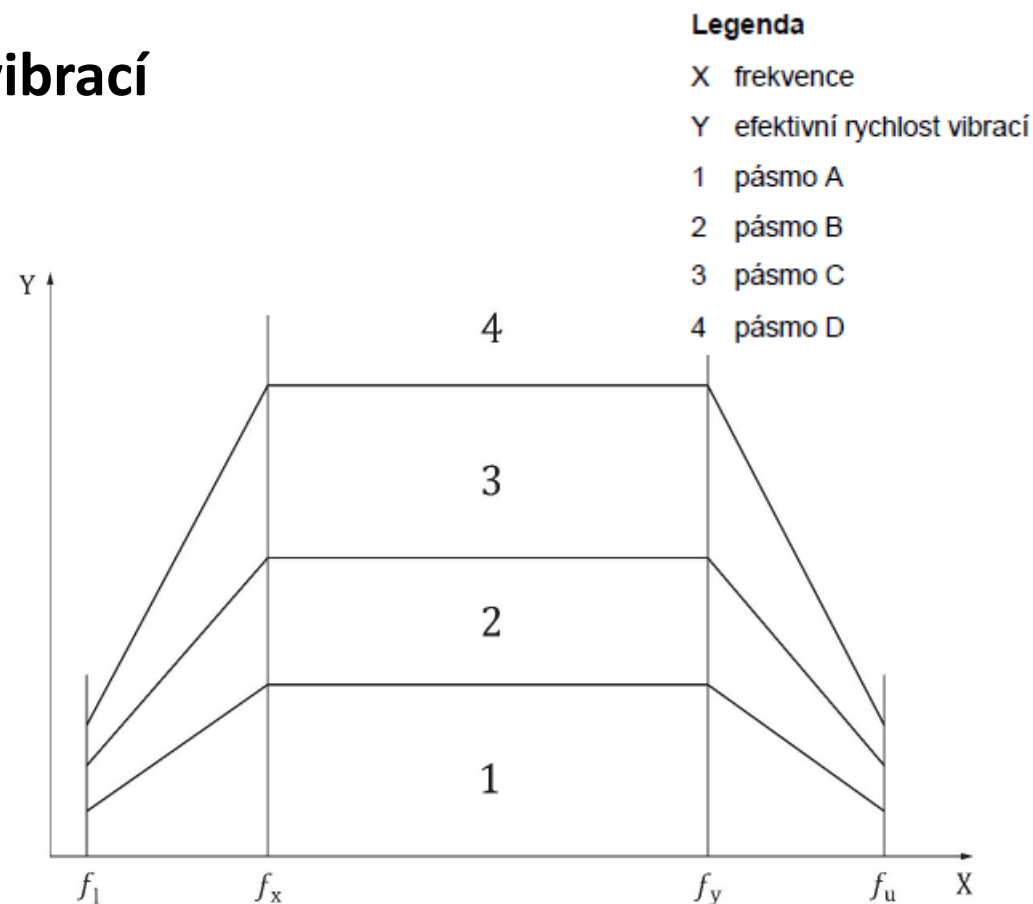
- **Vibrodiagnostika – hodnocení mohutnosti vibrací**
- Kritéria pro hodnocení
 - Tabulka s mezními hodnotami pro hranice pásem A/B, B/C a C/D (výchylka, rychlost)
 - Pružné / pevné uložení
- Montáž stroje
 - Pevné uložení (max. rychlost vibrací na patkách nebo základu $\leq 25\%$ max. rychlosti na nejbližším tělese ložiska)
 - Pružné uložení (zavěšení na pružinu nebo uložení na pružnou podložku – pružiny, pryž)

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Vibrodiagnostika – hodnocení mohutnosti vibrací

➤ Pásma hodnocení

- Pásmo A: vibrace nově přejímaných strojů
- Pásmo B: provoz umožněn zpravidla po neomezeně dlouhou dobu
- Pásmo C: nevyhovující pro dlouhodobý trvalý provoz (nejbližší možný termín opravy)
- Pásmo D: hrozí poškození stroje



Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

- **Vibrodiagnostika – diagnostika závad**
- Vyhodnocení frekvenčního spektra
- Hlavní sledované frekvence:
 - Otáčková frekvence **$1X$** (mechanická) a její harmonické, příp. subharmonické
 - Dvojnásobek napájecí frekvence **$2L$** a její harmonické

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Vibrodiagnostika – diagnostika závad – tabulka pro asynchronní stroje

příčina vibrací	frekvence symptomu	dominantní rovina	poznámka
mechanické závady			
nevyvážený rotor	1X	radiální	Typ nevyváženosti podle fázových poměrů.
ohnutý hřídel nebo úhlová nesouosost	1X, 2X	axiální	
rovnoběžná nesouosost	1X, 2X	radiální	
mechanické uvolnění	1X, 2X, 3X,... také 0,5X, 1,5X...	radiální	Vysoký počet harmonických a interharmonických charakterizuje ořezání.
poškozené valivé ložisko	indukovaná rezonance ložiskového domku nebo stroje, 1 až 20 kHz	-	Rezonance jsou buzeny rázy při valení přes vadu. Vyskytují se také frekvence závad, které jsou obecně ztraceny v šumu.
nestabilita kluzného ložiska (víření)	0,43-0,48 X	radiální	

Zdroj: J. Biloš and A. Bilošová, Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika, 1. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012, ISBN978-80-248-2755-1.

Diagnostika elektrických strojů – MCSA, vibrodiagnostika

➤ Vibrodiagnostika – diagnostika závad – tabulka pro asynchronní stroje

elektrické závady			
statická excentricita	2 x síťová frekvence a komponenty na $\omega \times [nR_s(1-s)/p \pm k_1]$	radiální	Může být důsledkem špatného vnitřního ustavení, opotřebení ložiska nebo lokálního ohřevu statoru ¹ (vibrace se zhoršují při ohřátí motoru).
uvolnění uchycení statoru, nevyvážený odpor fází nebo cívek, zkratované plechy, závit	2 x síťová frekvence	radiální	Uvádí se jako "volné železo" Je obtížné odlišit tuto skupinu jen na základě analýzy vibrací, ale fr. budou přítomny při chodu bez zatížení i se zatížením.
uvolněné statorové plechy	2 x síťová frekvence a komponenty s odstupem 2 x síťová frekvence asi okolo 1 kHz ¹	radiální	Může být vysoká amplituda, ale obvykle není destruktivní. Vysoké frekvenční složky mohou být podobné těm při statické excentricitě ¹ .
dynamická excentricita	1X s postranními pásmy 2 x skluz a komponenty na $\omega \times [(nR_s \pm k_e) \times (1-s)/p \pm k_1]$	radiální	Může být důsledkem ohnutí rotoru, házivosti rotoru nebo v důsledku místního ohřevu rotoru ² (vibrace se zhoršují při ohřátí motoru).
prasklá rotorová tyč, uvolněná tyč rotoru, zkratované plechy rotoru, špatný spoj na koncovém kruhu	1X s postranními pásmy 2 x skluz a komponenty podobné těm pro dynamickou excentricitu ³	radiální	Postranní pásma mohou mít nízkou úroveň, což vyžaduje velký dynamický rozsah a frekvenční rozlišení měřicího přístroje.

Zdroj: J. Biloš and A. Bilošová, Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika, 1. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012, ISBN978-80-248-2755-1.

Děkuji za pozornost

Jan Šobra

jsobra@fel.zcu.cz