

Ing. Antonín N o v á k - VÚHU

Ing. Vladimír P a t e r a - VÚHU

Stanovení mezních hodnot mechanického kmitání pohonu DPD, mě-  
řených prostředky vibrační diagnostiky

Při hledání cest, jak dosáhnout zvýšení výroby bez dalších investic a zvyšování stavu pracovníků, se ukázalo, že je možné využít rezerv, které existují v údržbě strojního parku. Tyto rezervy odhalí postupný přechod na údržbu strojů, založený především na podrobných znalostech jejich technického stavu a jen částečně na zkušenostech.

Metoda získávání informací o objektivním technickém stavu strojního zařízení a souhrn všech nutných opatření, umožňující bez demontáže zjistit charakter a stupeň opotřebení resp. poškození stroje se nazývá bezdemontážní diagnostika strojů. U pohonů DPD je používána vibrační diagnostika strojů, která je založena na snímání (měření) záznamu, analýze a diagnostické interpretaci časového průběhu mechanických vibrací. Vibrační diagnostika využívá skutečnosti, že rotující části strojů jsou budiči mechanického kmitání. S rostoucí dobou provozu se toto kmitání zvětšuje, až na úroveň dosažení nebezpečných hodnot. Jestliže dosáhne u sledovaného zařízení mechanické kmitání nepřípustných hodnot, dochází s vysokou pravděpodobností k destrukci strojních částí a tím i k neplánovanému odstavení. Nemá-li dojít k tomuto případu, je nutné určit mezní hodnoty mechanického kmitání pro sledované strojní zařízení. Stanovení technicky oprávněné mezní hodnoty mechanického kmitání sledovaného strojního zařízení je důležité k posouzení stavu poškození jednotlivých součástí a skupin stroje v průběhu provozu.

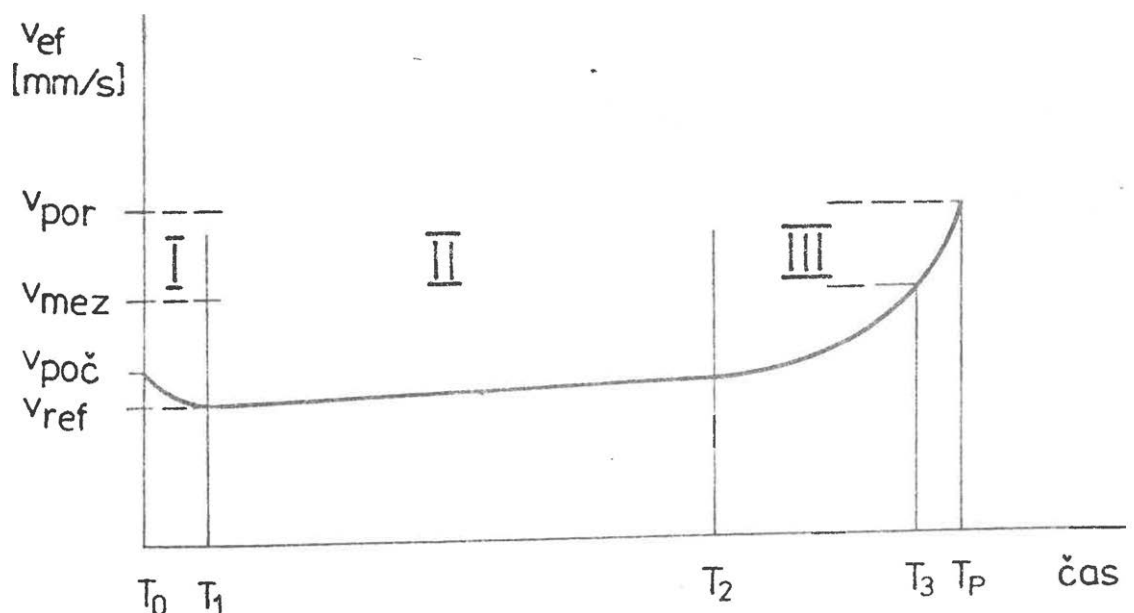
V dostupné odborné literatuře jsou uvedeny mezní velikosti efektivních hodnot rychlosti kmitání v souladu s normami ISO, DIN, ČSN atd. Přímá aplikace těchto mezí pro lomová zařízení není možná z následujících důvodů:

- mnohé stroje pracují v podmínkách nestacionárního kmitání
- stroje jsou uloženy na pružných konstrukcích
- značné ovlivnění kmitání sledovaného stroje sousedními zařízeními a kmitáním nosné konstrukce.

Proto byly ve VÚHU prováděny práce, které by určily technicky oprávněné mezní hodnoty mechanického kmitání pohonů DPD. Předkládaný článek ukazuje postup, jak se k těmto mezním hodnotám došlo.

#### Význam růstu signálu

Úroveň signálu kmitání se v průběhu životnosti pohonu mění, a to přibližně podle tzv. "vanové křivky" - viz obr. 1.



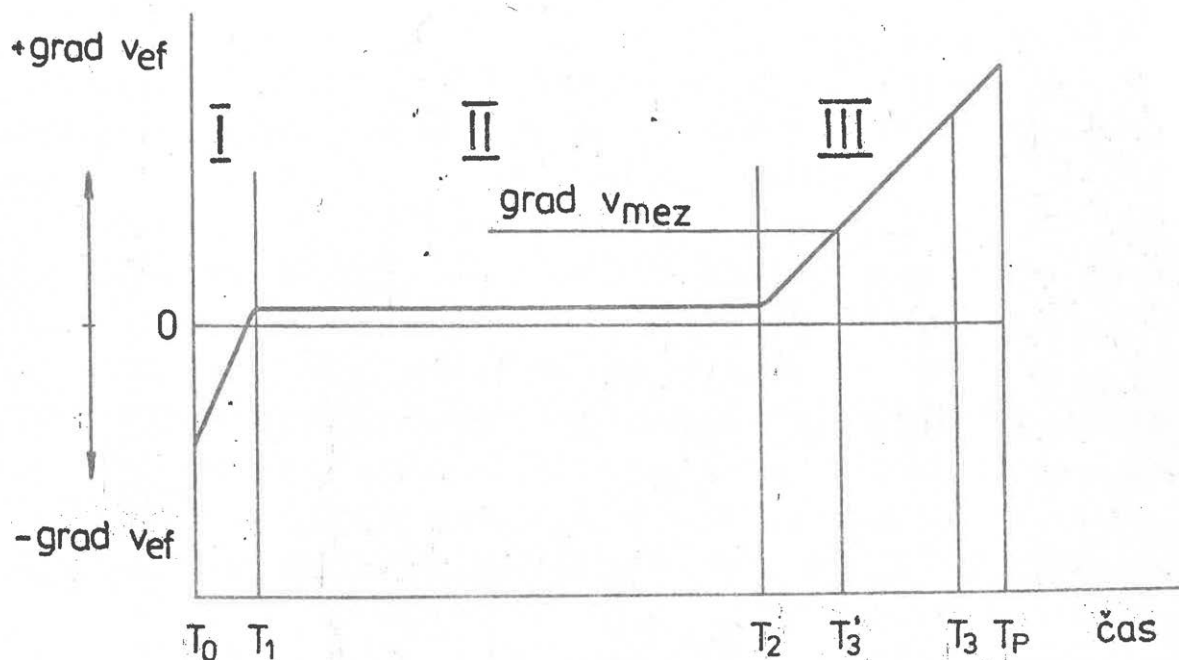
Na této křivce jsou patrné 3 základní oblasti:

- I - záběh
- II - oblast bezpečného provozu
- III - oblast rychlého zvyšování úrovně kmitání, vedoucí k havárii pohonu

V oblasti I dochází k záběhu pohonu a tím i ke snížení úrovně kmitání na hodnotu  $V_{ref}$  (referenční - výchozí). V obr. 1 je této úrovni dosaženo v čase  $T_1$ . V provozní praxi je však obtížné tuto dobu přesně stanovit, protože záběh je poměrně rychlý. Lze stanovit tuto úmluvu: hodnotu kmitání pohonu v čase  $T_0 = 0$  (uvádění pohonu do provozu) brát jako údaj počáteční  $V_{poč}$  a hodnotu kmitání při následujícím měření ( $T_1 = 4 - 6$  týdnů) brát jako údaj referenční  $V_{ref}$ . Oblast II je charakterizována přímkovým průběhem, kde přírůstek  $V_{ef}$  je konstantní (poměrně malý). Tato oblast je z hlediska životnosti pohonů nejdelší a končí časem  $T_2$ .

Po dosažení času  $T_2$  dochází k rychlejšímu nárůstu  $V_{ef}$  a k růstu celkové hodnoty  $V_{ef}$ , která v čase  $T_3$  dosáhne hodnoty  $V_{mez}$  (mezní). To je hodnota kmitání, nad jejíž úrovní provoz pohonů DPD směřuje k havárii. K havárii dojde při dosažení hodnoty  $V_{por}$ , která je fiktivní (po havárii již nelze pohon měřit).

Problémem a úkolem diagnostiky je stanovit mezní hodnotu  $V_{mez}$ , která musí být tak vysoká, aby i využitelná životnost pohonu byla co nejvyšší a zároveň tak nízká, aby zabránila vzniku havárie pohonu. Když překreslíme "vanovou křivku" na graf "gradientů" dostaneme tvar křivky (viz obr. 2).



V obr. 2 jsou patrné stejné oblasti jako v obr. 1, které lze charakterizovat:

- oblast I - gradient  $V_{ef}$  je záporný
- oblast II - gradient  $V_{ef}$  je velmi malý (kladný)
- oblast III - gradient  $V_{ef}$  neustále roste

Úkolem je stanovit  $\text{grad } V_{mez}$  (mezní), při jehož překročení je pravděpodobná blíží se porucha.

#### Stanovení mezních hodnot

Mezní hodnoty lze stanovit dvěma základními způsoby. Sledováním celkových hodnot kmitání (součtové hodnoty) a sledováním frekvenčních spekter a jejich vyhodnocováním. Dokonalejší je druhý způsob, protože v sobě obsahuje i způsob první. Je však vázán technickou vybaveností - přenos naměřených hodnot (spekter) do počítače musí být automatický. Požadavek technického vybavení se sběračem dat není podmínkou nutnou, neboť lze

vizuálně dva záznamy mezi sebou porovnávat a naměřené údaje pak mechanicky zadávat do počítače pro statistické sledování. Tento požadavek však vyplývá ze skutečnosti, že tento "ruční" postup je příliš pracný, časově náročný a dochází při něm ke vzniku chyb při měření a ukládání dat. Pokud bude pohon sledován od uvedení do provozu, pak lze využít pro stanovení mezní hodnoty známého údaje - nárůstu úrovně na určité frekvenci o 10 dB, tj. zvýšení úrovně signálu přibližně 3x od referenčního signálu. Tímto způsobem lze stanovit obě požadované hodnoty, referenční i mezní. Tyto údaje budou rozdílné nejen pro různé pohony, (které mají i stejný typ převodovky a elektromotoru), ale i pro jednotlivá měřicí místa. Pro pohon se volí 6 měřicích míst - 3 na převodovce (11 V, 11 H, 5 A) a 3 na motoru (1 V, 1 H, 2 A).

V současné době však nejsou všechna diagnostická pracoviště vybavena touto špičkovou technikou, proto je nutné volit pro vyhodnocení životnosti pohonů metody jednodušší, pokud možno však i stejně spolehlivé.

K tomu se využívá sledování celkových součtových hodnot rychlosti kmitání, označovaných jako  $V_{ef}$ . Jedná se o vektorový součet všech úrovní rychlosti kmitání na jednotlivých frekvencích v předem zvoleném frekvenčním pásmu.

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum V_i^2}, \text{ kde } V_i \text{ (mm/s) je špičková hodnota rychlosti kmitání na dané frekvenci.}$$

Podle norem ČSN 011412, ISO 3945, VDI 2056 je voleno frekvenční pásmo v rozsahu 10 - 1000 Hz.

Pro vlastní stanovení mezních hodnot lze pak vzít jako výchozí údaje z ČSN 011412, kde pro strojní zařízení, která mají otáčkovou frekvenci vyšší než 10 Hz a výkon vyšší než 300 kW je mezní hodnota  $V_{ef} = 18 \text{ mm/s}$ . Tyto základní údaje rozpracovávají práce /1/, které konkretizují i hodnoty kmitání na důležitých pracovních frekvencích.

Porovnáním obou způsobů vyhodnocování je na první pohled patrný rozpor. U způsobu vyhodnocování frekvenčních spekter je pro každý pohon, pro každé měřicí místo i frekvenci jiná mezní hodnota, při vyhodnocování celkových hodnot kmitání (mohutnost kmitání) je však jedna mezní hodnota, nezávisající na typu převodovky, ani na měřicím místě. Z tohoto důvodu připadá tato mezní hodnota jako málo objektivní a tedy i málo citlivá k posouzení možnosti vzniku havárie pohonu. Abychom tuto metodu objektivizovali, je nutné stanovit mezní hodnoty, závislé na typech převodovek (alespoň pro skupiny převodovek, které si jsou blízké - stejné otáčky, výkony, převody ap.) a pro jednotlivá měřicí místa.

Jako vhodný vzorek pro stanovení mezních hodnot byl vzat soubor pohonů, umístěných na jednom technologickém celku. Tento soubor splňuje přibližně kladené podmínky. Např. TC 2 na SHD - DVIL, na DJŠ je tvořen převodovkami typu OK 001415/a a OK 001224, které mají stejné výkony  $P = 630 \text{ kW}$ , otáčky  $n = 990 \text{ min}^{-1}$  a převodový poměr. Při stanovení mezních hodnot je nutné využít matematicko-statistických metod.

V práci /2/ jsou mezní hodnoty stanovovány dle vzorce:

$$V_{\text{mez}} = V_{\text{stř}} + 1,5 S_x \quad /1/$$

$V_{\text{stř}}$  (mm/s) ..... střední hodnota naměřených úrovní na  
všech pohonech v daném měřicím místě

$S_x$  (mm/s) ..... směrodatná odchylka vzorku

Předpokladem je zde normální rozdělení (Gaussovo) naměřených hodnot. V jiných pracech /3/ jsou tyto mezní hodnoty stanoveny jako  $V_{\text{mez}} = V_{\text{stř}} + 3 S_x$ , i když zvolené frekvenční pásmo je zde jiné (100 - 3500 Hz).

Abychom mohli volit způsoby vyhodnocování, musíme určit typ statistiky, ve které se naměřené údaje pohybují.

Ze zvoleného souboru měření pro TC 2, na SHD - DVIL, na DJŠ byla sestavena tabulka č. 1.

Tabulka č. 1

Hodnoty efektivní rychlosti kmitání (mm/s)

| Měřicí místo | Střední hodnota $V_{(stř)}$ | Odchylka vzorku $S_x$ | Počet měření N |
|--------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|
| 11V          | 7,6                         | 2,9                   | 57             |
| 11H          | 6,6                         | 2,8                   | 57             |
| 41V          | 3,7                         | 1,3                   | 57             |
| 21H          | 5,6                         | 2,6                   | 57             |
| 41H          | 5                           | 2,6                   | 57             |
| 5A           | 10,4                        | 4,6                   | 57             |
| 1V           | 5,1                         | 2                     | 57             |
| 1H           | 2,9                         | 1,1                   | 57             |
| 2A           | 3,3                         | 1                     | 57             |

Tabulka č. 2

Počty naměřených hodnot v intervalech  $V = \frac{V_{(stř)} + S_x \cdot I}{I}$

|      | -1 | -0,5 | 0  | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
|------|----|------|----|-----|---|-----|---|-----|
| 11 V | 5  | 17   | 11 | 9   | 8 | 3   | 2 | 1   |
| 11 H | 8  | 10   | 14 | 11  | 6 | 5   | 2 | 0   |
| 41 V | 8  | 11   | 14 | 11  | 5 | 3   | 2 | 0   |
| 21 H | 12 | 11   | 12 | 7   | 4 | 3   | 7 | 0   |
| 41 H | 5  | 13   | 21 | 8   | 3 | 1   | 0 | 4   |
| 5 A  | 10 | 7    | 16 | 10  | 8 | 0   | 3 | 1   |
| 1 V  | 6  | 15   | 14 | 9   | 6 | 2   | 1 | 1   |
| 1 H  | 6  | 14   | 16 | 9   | 5 | 2   | 1 | 2   |
| 2 A  | 9  | 10   | 10 | 15  | 4 | 3   | 4 | 0   |

Z uvedené tabulky je zřejmé, že nejvíce naměřených hodnot neleží okolo  $I = 0$  ( $V = V_{stř}$ ), jak se předpokládá dle Gaussova rozdělení, nýbrž nejvíce naměřených hodnot leží přibližně okolo  $I = -0,5$  ( $V = V_{stř} - 0,5 S_x$ ). Tomuto rozdělení lépe vyhovuje modifikovaná BOSE-EINSTEINOVA statistika, jejíž rozdělovací funkci (hustotu pravděpodobnosti) lze psát ve tvaru

$$p(x) = \frac{n(x)}{N} = \frac{K}{N} \frac{x^5}{\exp \frac{x}{F} - 1} \quad /2/,$$

kde  $n(x)$  ..... počet naměřených hodnot na hladině  $x$   
 $N$  ..... počet měření  
 $K, F$  ..... koeficienty  
 $x$  .....  $V_{ef}$  (mm/s).

Musí platit, že střední hodnota  $V_{stř}$ , která je dána souborem naměřených hodnot, je i střední hodnotou rozdělovací funkce  $\bar{X}$

$$V_{stř} = \frac{\sum_{x=0}^{\infty} n(x) \cdot x}{\sum_{x=0}^{\infty} n(x)} = \bar{X}.$$

Protože rozdělovací funkce je funkce normovaná, musí platit pro počty naměřených hodnot

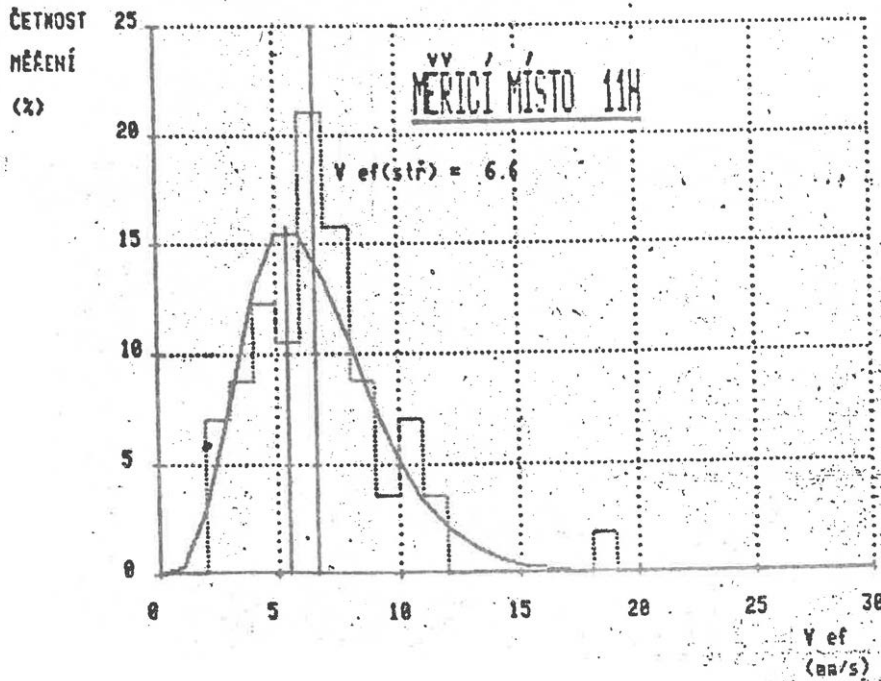
$$\sum_{x=0}^{\infty} n(x) = N$$

respektive pro hustotu pravděpodobnosti

$$\sum_{x=0}^{\infty} p(x) = 1 \text{ nebo } 100 \text{ \%}.$$

Vzhledem k tomu, že hodnoty  $\bar{X}$  a  $N$  jsou dány souborem naměřených hodnot, lze vypočítat pro daný soubor hodnoty koeficientů  $K$  a  $F$ . Např. pro zvolený soubor TC 2, SHD-DVIJ, na DJŠ pro měřicí

místo 11 H je rozdělovací funkce na obr. 3.



Tento typ statistiky má proti Gaussovu rozdělení uvedené přednosti:

- max. rozdělovací funkce (max. počet naměřených hodnot na dané úrovni) je vlevo od střední hodnoty, což lépe popisuje skutečnost;
- se 100 % jistotou vylučuje naměření záporných hodnot, což Gaussovo rozdělení nevylučuje a skutečnost popírá;
- pravděpodobnost naměření hodnot blízkých nule je též blízká nule, u Gaussova rozdělení však může být libovolná.

Stanovení mezních hodnot podle této statistiky lze provést následujícím způsobem. Stanovme pravděpodobnost, že při měření najdeme pohon s blížící se poruchou. Vyjděme z této úvahy: počet převodovek, umístěných na TC je přibližně 20,

počet měření realizovaných za 1 rok je v průměru 10x na jednom pohonu (průměrný interval 5 týdnů), 4 převodové skříně vyměněny ročně pro blížící se poruchu. Z toho vyplývá, že na 200 provedených měření jsou 4 překročení mezní hodnoty, tj. 2 %. Pak pro pravděpodobnost výskytu poruchy v naměřených hodnotách 2 % musí platit

$$2 \% = \sum_{x_k} p(x) - \sum_{x_k} p(x) = \sum_{x_k} p(x).$$

Řešením této rovnice je výraz  $x_k = 2 \bar{x}$ .

Pro každé měřicí místo lze stanovit mezní hodnotu, která je dána jako

$$V_{mez} = 2 V_{stř} \quad /3/.$$

Chceme-li posoudit shodu se vzorcem /1/, vypočítáme pro výše uvedený soubor převodovek poměr  $\frac{V_{stř}}{S_x}$  pro jednotlivá měřicí místa.

|            |      |            |      |
|------------|------|------------|------|
| 11 V ..... | 2,62 | 41 V ..... | 2,85 |
| 11 H ..... | 2,32 | 31 H ..... | 2,15 |
| 5 A .....  | 2,24 | 41 H ..... | 1,92 |
| 1 V .....  | 2,55 | 2 A .....  | 3,3  |
| 1 H .....  | 2,64 |            |      |

Vidíme, že poměr je v rozmezí 1,92 ÷ 3,3.

Dosazením do vzorce /1/ dostaneme

$$V_{mez} = V_{stř} + 1,5 \frac{V_{stř}}{1,92 + 3,3} = (1,78 \div 1,45) \cdot V_{stř}.$$

Tato vypočtená mezní hodnota je v průměru o 20 % nižší než při výpočtu podle vzorce /3/.

Pokud je tato metoda měření celkových úrovní rychlostí kmitání pro hodnocení jediná (nelze provést frekvenční analýzu), je výhodné zvýšit počet měřicích míst o místa 21 V, 21 H, 41 V

41 H na převodovce a 2 V, 2 H na motoru. Kritériem pro hodnocení blížící se poruchy pak považujeme překročení mezních hodnot ve 2 měřicích místech.

Protože intervaly měření jsou v rozmezí 4-6 týdnů, může dojít k tak rychlému rozvoji poruchy, že havárie pohonu se objeví rychleji než interval měření předpokládal, ačkoliv při posledním měření nevykazoval hodnoty kmitání vyšší než jsou mezní hodnoty.

Abychom dokázali čelit i tomuto možnému jevu, všimněme si vlastnosti "vanové křivky" (obr. 1) a křivky gradientů (obr. 2) v intervalu mezi časy  $T_2$  -  $T_3$ . Vanová křivka se v čase  $T_2$  plynule mění a její křivost se zvětšuje tím více, jak se blíží k  $T_3$ . V oblasti těsně za  $T_2$  však nelze rozeznat, zda malé zvýšení  $V_{ef}$  je způsobeno zakřivováním vanové křivky, které je charakteristické pro III. oblast, nebo pouze rozptylem hodnot. Teprve v blízkosti  $T_3$  lze vyloučit rozptyl, takže teprve nyní víme, že se pohon blíží ke konci své životnosti. Křivka gradientů hned po dosažení času  $T_2$  vykazuje podstatný nárůst hodnoty a je tedy pro stanovení rychle se rozvíjející poruchy citlivější. Abychom mohli určit způsob vyhodnocování, určíme nejprve typ statistiky. Ze zvoleného souboru TC 2 SHD-DVIL, na DJŠ vypočteme hodnoty, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Hodnoty gradientů

Tabulka č. 3

| Měřicí místo | Střední hodnota<br>grad $V_{(stř)}$ | Odchylka vzorku<br>$S_x$ | Počet měření<br>N |
|--------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------|
| 11 V         | 0,11                                | 1,99                     | 40                |
| 11 H         | 0,31                                | 1,59                     | 40                |
| 41 V         | 0,22                                | 1,11                     | 40                |
| 21 H         | 0,2                                 | 1,59                     | 40                |
| 41 H         | 0,41                                | 1,68                     | 40                |

Pokračování tabulky č.3

| Měřicí místo | Střední hodnota<br>grad $V_{(stř)}$ | Odchylka vzorku<br>$S_x$ | Počet měření<br>N |
|--------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------|
| 5 A          | 0                                   | 3,05                     | 40                |
| 1 V          | - 0,32                              | 1,45                     | 40                |
| 1 H          | - 0,05                              | 0,97                     | 40                |
| 2 A          | 0,13                                | 0,82                     | 40                |

Tabulka č. 4

Počty naměřených hodnot v intervalech

grad  $V := \text{grad } V \text{ (stř)} + S_x \cdot I$

I

|      |   | -1 | -0,5 | 0  | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
|------|---|----|------|----|-----|---|-----|---|-----|
| 11 V | 2 | 5  | 19   | 5  | 4   | 1 | 3   | 0 | 1   |
| 11 H | 7 | 4  | 12   | 8  | 4   | 2 | 1   | 1 | 1   |
| 41 V | 4 | 6  | 14   | 6  | 5   | 2 | 0   | 2 | 1   |
| 21 H | 5 | 3  | 17   | 6  | 4   | 2 | 0   | 1 | 2   |
| 41 H | 4 | 8  | 13   | 7  | 2   | 4 | 0   | 1 | 1   |
| 5 A  | 3 | 5  | 19   | 7  | 2   | 1 | 1   | 0 | 2   |
| 1 V  | 4 | 6  | 8    | 10 | 9   | 1 | 0   | 2 | 0   |
| 1 H  | 4 | 1  | 10   | 16 | 4   | 5 | 0   | 0 | 0   |
| 2 A  | 4 | 6  | 10   | 12 | 4   | 1 | 1   | 0 | 2   |

Pokud přihlédneme k rozdělení naměřených hodnot (je přibližně symetrické), můžeme konstatovat, že gradienty se řídí normálním (Gaussovým) rozdělením. Pro ně platí, že jednostranně omezená pravděpodobnost  $p(2S_x) = 97,5 \%$ , což znamená, že 97,5 % vypočtených gradientů leží v oblasti ohraničené mezní hodnotou

$$\text{grad } V_{\text{mez}} = \text{grad } V_{\text{stř}} + 2 S_x \quad /4/.$$

Z uvedeného příkladu je patrné, že střední hodnotu  $\text{grad } V_{\text{stř}} \approx 0$  a pak mezní hodnotu lze vypočítat jako

$$\text{grad } V_{\text{mez}} = 2 S_x.$$

Při vyhodnocování opět posuzujeme, zda došlo k překročení mezních hodnot alespoň ve 2 měřicích místech a z toho usuzujeme na blízkost se havárií pohonu. Pokud se hodnoty blíží k mezním hodnotám  $V_{\text{mez}}$ , je nutné provést následující měření za 7 - 10 dnů. Pokud je  $V_{\text{ef}}$  ještě hluboko pod úrovní  $V_{\text{mez}}$ , stačí zkrátit interval měření na polovinu (2 - 3 týdny). Pokud jsou hodnoty  $V_{\text{mez}}$  překročeny, je nejlépe pohon odstavit.

### Stanovení referenčního signálu

Tento výchozí signál je nejlépe zjišťovat měřením po záběhu podle již zmíněné konvence. To si však vyžádá mnoho měření porovnatelnými přístroji (nejlépe stejnými). Získání objektivního posouzení je záležitostí dlouhodobou.

Pro přibližné stanovení referenčního signálu můžeme využít opět matematicko statistických metod. Vraťme se k vanové křivce (obr. 1). Bylo konstatováno, že oblast I (záběh) je poměrně krátká (1 měsíc). Stejně lze klasifikovat i oblast III, kterou lze odhadnout nejdéle na 3 - 6 měsíců. Při již uvažované obměně převodovek asi 20 % ročně, vychází průměrná životnost pohonů 5 let. Z toho lze odhadnout délku oblasti II -- přibližně 4,5 ro-

ku. Oblast II tvoří tedy více než 90 % životnosti pohonu.

Jak již bylo podotknuto, v oblasti III je registrován nárůst hodnoty teprve až v druhé polovině tohoto intervalu. Protože gradient rychlosti kmitání vychází přibližně nula (viz příklad), lze konstatovat, že referenční hodnotu můžeme přibližně vypočítat jako

$$V_{\text{ref}} = \frac{V_{\text{stř}}}{k}$$
, kde  $k = 1,2 \dots\dots$  koeficient, který v sobě zahrnuje vliv oblastí I a III a vliv gradientu.

Tato hodnota je prakticky identická s maximální hodnotou hustoty pravděpodobnosti  $p(x)$ , která odpovídá hodnotě  $0,83 V_{\text{stř}}$ .

#### Stanovení mezních hodnot pro přejímku

Úroveň tohoto signálu musí umožňovat provozování pohonu po předpokládanou dobu životnosti. V normě ČSN 011411 jsou jednotlivé třídy mohutnosti kmitání odstupňovány kvocientem 0,63.

Pásmo "uspokojivé", do kterého se musíme dostat, má horní limitu  $0,63 V_{\text{mez}} = 1,26 V_{\text{stř}}$ , dolní limitu  $0,63^2 V_{\text{mez}} = 0,8 V_{\text{stř}}$ . Rozumným je volit mezní hodnotu přejímací  $V_{\text{mez } p} = V_{\text{stř}}$ , neboť splňuje podmínku, že nové zařízení musí vykazovat hodnoty kmitání minimálně o kvalitativní stupeň nižší než jsou mezní a pro výrobce je to hodnota ještě dostupná, neboť 56 % všech měření ze souboru naměřených hodnot tuto mez splňovalo.

#### Porovnání mezních hodnot

Na obr. 4 jsou vyznačena pásma jednotlivých tříd mohutnosti kmitání. Do pásma "DOBŘE", shora ohraničené hodnotou  $0,8 V_{\text{stř}}$ , se vejde 37 % všech naměřených hodnot. Do pásma "USPOKOJIVÉ" a lepší shora ohraničené hodnotou  $1,26 V_{\text{stř}}$ , se vejde 77 % všech měření a do pásma "NEUSPOKOJIVÉ" a lepší omezené hodnotou  $2 V_{\text{stř}}$ , se vejde 98 % všech měření.

Jako příklad byly stanoveny všechny mezní hodnoty pro zvolený soubor TC 2 SHD-DVIL na DJŠ viz tabulka č. 5.

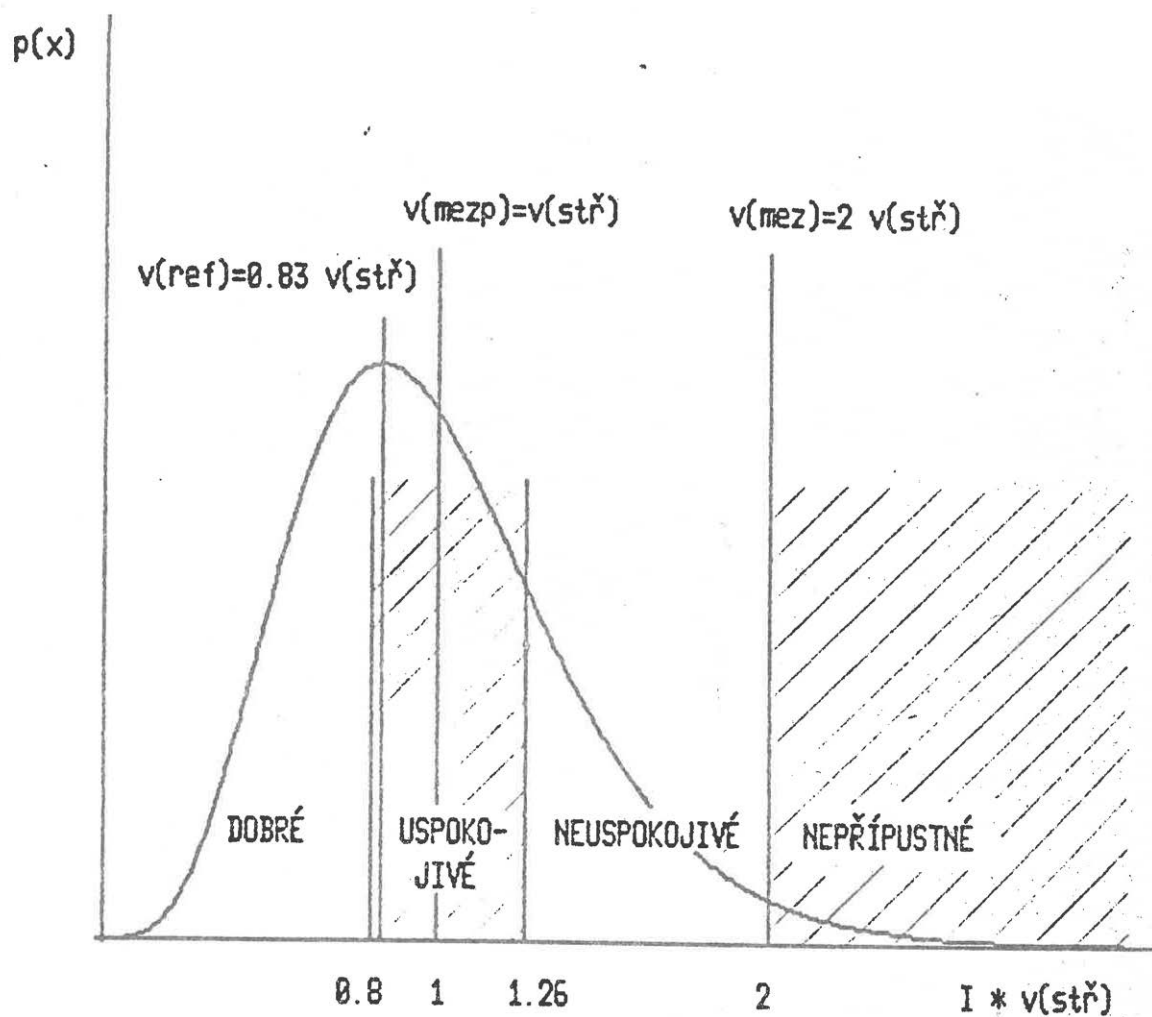
Tabulka č. 5

|                          | Měřicí místo |      |      |      |      |      |      |     |     |
|--------------------------|--------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
|                          | 11 V         | 11 H | 41 V | 21 H | 41 H | 5 A  | 1 V  | 1 H | 2 A |
| $V_{ref} = 0,83 V_{stř}$ | 6,3          | 5,5  | 3,1  | 4,7  | 4,2  | 8,7  | 4,3  | 2,4 | 2,8 |
| $V_{mez} = V_{stř}$      | 7,6          | 6,6  | 3,7  | 5,6  | 5,0  | 10,4 | 5,1  | 2,9 | 3,3 |
| $V_{mez} = 2 V_{stř}$    | 15,2         | 13,2 | 7,4  | 11,2 | 10,0 | 20,8 | 10,2 | 5,8 | 6,6 |
| $V_{mez}$                | 4,1          | 3,5  | 2,4  | 3,4  | 3,8  | 6,1  | 2,6  | 1,9 | 1,8 |

Použití pásem jednotlivých tříd mohutnosti kmitání, uvedených na obr. 4, však v praxi ne dost citlivě rozlišovalo stavy pohonů, protože při vyšším počtu měřených míst dochází k rozptylu hodnot. Proto byla navržena kategorizace stavu pohonů i jednotlivě stavu převodovek (PVD) a elektromotorů (ELM) podle následující tabulky:

Tabulka č. 6

| Označení | Stav        | Úroveň mohutnosti kmitání                                                               |
|----------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| D        | dobrý       | Může překračovat $V_{stř}$ pouze v jednom měřicím místě, a to méně než o 20 %           |
| U        | uspokojivý  | Může překračovat $V_{stř}$ o 60 % pouze v jednom měřicím místě, a to méně než $V_{mez}$ |
| Z        | zhoršený    | Může překračovat $V_{mez}$ pouze v jednom měřicím místě                                 |
| N        | nepřípustný | Překračuje $V_{mez}$ ve 2 měřicích místech                                              |



Obr. 4

## Závěr

Měření stavu převodovek DPD na povrchových lomech SHD je prováděno dvěma způsoby vibrační diagnostiky.

1. způsob spočívá v měření součtové hodnoty efektivní rychlosti kmitání  $V_{ef}$  (mm/s) v pásmu 10 - 1000 Hz. Maximální hodnota efektivní rychlosti kmitání, měřená na důležitých místech soustavy, se označuje jako mohutnost kmitání. Pro celkové posouzení vibračního chování zařízení je to mezinárodně doporučená veličina.

2. způsob spočívá v měření spektra kmitání-frekvenční analýze. Při tomto způsobu se celkové smíšené kmitání, snímané vhodným snímačem a měřicím zařízením, rozloží na jednotlivé složky. Výsledkem jsou všechny vyskytující se frekvence s příslušnými amplitudami kmitání.

Důležitým krokem je posouzení naměřených hodnot, jejich analýza a vyhodnocení. Na základě vyhodnocení naměřených hodnot pak můžeme posoudit i stav příslušného strojního zařízení, v našem případě převodové skříně DPD. Důležitou a často diskutovanou hodnotou je hodnota mezní. Z hlediska využitelnosti životnosti strojního zařízení by měla být co nejvyšší, avšak z hlediska zabránění vzniku havárie nízká.

Norma ČSN 011412 udává mezní hodnoty pro velké rotační stroje o výkonu vyšším než 300 kW s provozními otáčkami od 10 do 200  $s^{-1}$  na pružném základu a hodnotí mohutnosti kmitání těchto strojů v provozních podmínkách a v kmitočtovém rozsahu od 10 do 1000 Hz. Podle této normy se mohutnosti kmitání hodnotí podle níže uvedené zásady:

- $V_{ef \max} \leq 2,8 \text{ mm/s}$  - stav dobrý
- $V_{ef \max} \leq 7,1 \text{ mm/s}$  - stav uspokojivý
- $V_{ef \max} \leq 18 \text{ mm/s}$  - stav neuspokojivý
- $V_{ef \max} > 18 \text{ mm/s}$  - stav nepřípustný

Z uvedeného hodnocení vyplývá, že pro vyhodnocení mohutnosti kmitání je pouze jedna mezní hodnota, která nezávisí na typu převodovky, ani na měřicím místě. Z tohoto důvodu nám připadala tato mezní hodnota jako málo objektivní a tedy i málo citlivá k posouzení možnosti vzniku havárie.

Uvedený článek se snaží stanovit a zdůvodnit mezní hodnoty závislé na typech převodovek (stejně otáčky, výkony, převody) a v jednotlivých měřicích místech.

Postup při vyhodnocování převodovek z uvedeného článku je následující:

- a) určí se střední hodnota rychlosti kmitání pro konkrétní měřicí místo (např. pro 11 V)

$$V_{\text{stř 11 V}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{i \text{ 11 V}}}{n}$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n V_{i \text{ 11 V}}}{n} \dots\dots\dots \text{součet naměřených hodnot rychlosti kmitání v místě 11 V}$$

n ..... počet měření

- b) určí se mezní hodnota rychlosti kmitání pro konkrétní měřicí místo

$$V_{\text{mez 11 V}} = 2 \cdot V_{\text{stř 11 V}}$$

- c) poslední naměřená hodnota rychlosti kmitání se porovná s  $V_{\text{stř 11 V}}$  a  $V_{\text{mez 11 V}}$  a určí se stav převodovky dle tabulky uvedené před závěrem článku.

Využívání vibračních diagnostických metod k inspekci pohonů DPD nejen snižuje nebo i odstraňuje riziko nenadálých poruch či havárií, ale podstatně ovlivňuje charakter práce údržbářských útvarů, produktivitu jejich práce.

Přináší s sebou současně výrazný ekonomický efekt, který plyne:

- z využití vnitřních rezerv, zkvalitnění péče o stroje;
- ze snížení prostojů a ztrát z titulu znalosti skutečného technického stavu stroje a tím ve většině případů možnosti převedení opravy zařízení z poruchového času do času plánovaných prostojů nebo PPD;
- z prodloužení životnosti a pracovní schopnosti pohonů DPD.

Sem patří také úspory, plynoucí z reálné možnosti prodloužení opravárenských cyklů a generálních oprav.

### S h r n u t í

V článku se autoři zabývají možnostmi stanovení mezních hodnot pro hodnocení stavu pohonů DPD metodou vibrační diagnostiky. Podle konkrétních údajů naměřených při provozních měřeních v koncernu SHD na technologickém celku DVIL-DJŠ jsou pomocí matematických a statistických metod určovány rozdělovací funkce, dle nichž jsou stanoveny mezní hodnoty. Dále je v článku navržena klasifikace pohonů podle úrovně mechanického kmitání, která slouží k posouzení stavu provozuschopnosti pohonů.