

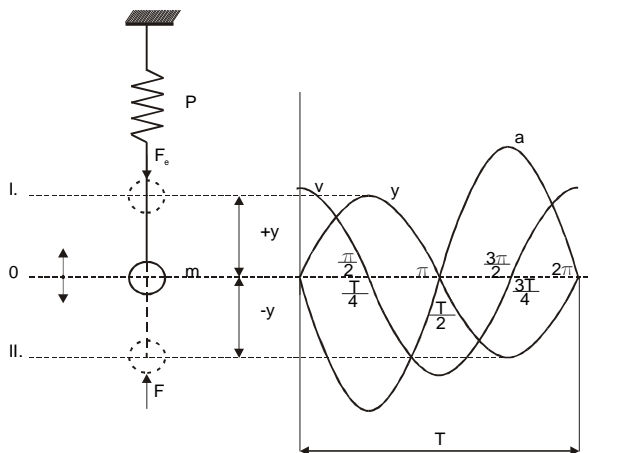
1 Úvod

2 Vznik vibrací u elektromotorů a poháněných strojů

V kapitole jsou uvedeny základní principy vzniku chvění, jeho analýzy a interpretace.

2.1 Základní principy vzniku vibrací

Vznik vibrací lze jednoduše vysvětlit na hmotném bodě P zavěšeném na pružině, která je na jednom konci pevně uchycena (obrázek č. 4.1). Pohyb takového hmotného bodu je způsoben pružnou silou; je to síla vznikající pružností nějakého prostředí (tělesa) při jeho deformaci. Tou se brání pružné těleso proti změně tvaru. Je to vlastně reakce na vnější sílu způsobující deformaci tělesa. Tato pružná síla se snaží uvést deformované těleso do původního stavu.



Obrázek č. 4.1: Kmitavý pohyb

Byla-li pružina vnější silou, stlačena snaží se jí pružná síla roztáhnout na původní délku. Hmotný bod upevněný na volném konci pružiny se nachází v klidu, v rovnovážné poloze 0 , pokud na něj nepůsobí žádná vnější síla. Jestliže považujeme pružinu (těleso) za dokonale pružnou, řídí se pružná síla F_e Hookovým zákonem a je přímo úměrná výchylce y volného konce pružiny a má opačný směr než výchylka. Je pak

$$F_e = -yK \quad (4.1)$$

K je tuhost pružiny

Často se setkáváme se silami, které nejsou způsobeny pružností tělesa, ale mají podobný charakter a odpovídají rovnici č. 4.1; chovají se jako pružná síla, jsou to kvasielastické síly a způsobují rovněž kmitavý pohyb.

Jestliže vychýlíme hmotný bod z rovnovážné polohy 0, bude se pohybovat směrem k ní zrychleným pohybem a setrvačností přejde na opačnou stranu klidové polohy a vzdaluje se od ní. Účinkem pružné síly je pohyb zpožděný, až se zastaví. Pak opět pružná síla vrátí hmotný bod k rovnovážné poloze z druhé strany, klidovou polohu opět setrvačností přejde až do místa původního vychýlení. Uvedený pohyb hmotného bodu okolo rovnovážné polohy se opakuje a je kmitavým nebo harmonickým pohybem. Jeho průběh závisí jednak na setrvačných vlastnostech hmotného bodu a jednak na vlastnostech pružiny. Vlivem pružné síly (direktivní síly) způsobený kmitavý pohyb lze popsat pohybovou rovnicí hmotného bodu.

$$F_e = ma \quad (4.2)$$

dosadíme-li za zrychlení druhou derivaci výchylky podle času a za sílu podle rovnice (4.1), získáme diferenciální rovnici pro netlumený harmonický pohyb

$$-yK = m \frac{d^2y}{dt^2} \Rightarrow \frac{d^2y}{dt^2} + \frac{K}{m}y = 0 \quad (4.3)$$

Jestliže budeme uvažovat ztráty energie v pružině a třením tělesa m , bude kmitání tlumené a v pohybové rovnici se objeví další členy.

Během pohybu v uvažovaném příkladu nepůsobí po celou dobu pohybu žádné síly, které by zakřivovaly dráhu pohybu. Lze tedy nazvat popsáný kmitavý pohyb pohybem přímočarým.

Počet kmitů, které vykoná hmotný bod za jednotku času, udává kmitočet f (frekvence)

$$f = \frac{1}{T}, \quad (4.4)$$

kde T je doba jednoho kmitu. Kmitočet f měříme v jednotkách Hz [s^{-1}].

Často bývá udáván kmitočet místo f veličinou ω , která je 2π násobkem kmitočtu.

$$\omega = 2\pi f, \quad (4.5)$$

úhlový kmitočet nebo kruhová frekvence.

Průběh jednoduchého kmitavého pohybu je určen amplitudou výchylky Y a kmitočtem f. Hmota jisté velikosti na jisté pružině tvoří kmitavý systém, který kmitá vždy stejným kmitočtem, nezávisle na amplitudě výchylky. Tento kmitočet nazýváme vlastním kmitočtem soustavy nebo kmitočtem rezonančním.

Jestliže v rovnici (4.4) položíme

$$\frac{K}{m} = \omega^2 \quad (4.6)$$

pak je

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega^2 y = 0 \quad (4.7)$$

Tato diferenciální rovnice druhého řádu, lineární, homogenní s konstantními koeficienty a bez členu s první derivací má řešení

$$y = Y \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.8)$$

Y a φ jsou integrační konstanty. Argument $(\omega t + \varphi)$ je fází harmonického pohybu.

Rychlost kmitavého pohybu stanovíme derivováním průběhu výchylky y (rovnice 4.8) podle času:

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega Y \cos(\omega t + \varphi). \quad (4.9)$$

Kmitavý pohyb popsany rovnicí (4.9) probíhá určitou rychlostí v , kterou označujeme obvykle jako rychlost kmitání. Amplituda rychlosti kmitavého pohybu je

$$V = \omega Y = 2\pi f Y. \quad (4.10)$$

Zrychlení kmitavého pohybu bude

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega^2 Y \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.11)$$

a jeho amplituda

$$A = \omega^2 Y \quad (4.12)$$

2.2 Analýza signálů buzených chvěním

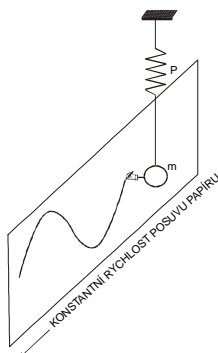
Analýzu signálů buzených chvěním můžeme provést ve třech oblastech a to:

- časové,
- frekvenční,
- modální.

2.2.1 Časová oblast

V této oblasti je již tradičně signál pozorován a popsán. Na základě měření nebo pozorování je možné zjišťovat stavy nebo změny v pozorovaném objektu, které probíhají v časové závislosti.

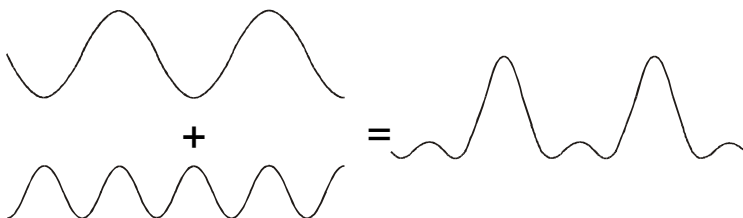
Na obrázku 4.2 je zobrazena jednoduchá mechanická soustava o jednom stupni volnosti, ve které chvějící se hmota m je vybavená prostým zapisovačem. Zapisovač může zaznamenávat okamžitou polohu hmoty na papírovém pásku, který se pohybuje se známou a konstantní rychlostí. Tento zápis je zápisem výchylky ve funkci času – časový záznam.



Obrázek č. 4.2: Přímý zápis výchylky v časové oblasti

2.2.2 Frekvenční oblast

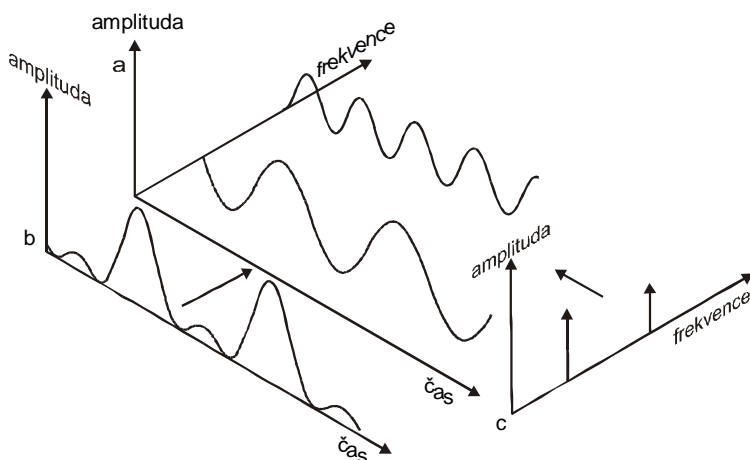
Fourier odvodil, že každý signál je složen z několika harmonických složek s různými kmitočty. Vhodným výběrem amplitud, frekvencí a fází těchto složek je možné získat znalost průběhu původního spektra viz obrázek č. 4.4., resp. zjištění zdrojů a příčin vibrací celého systému. Tento postup je nazýván FFT (Fast Fourier Transformation – rychlá Fourierova transformace).



Obrázek č. 4.4: Signál, který vznikl v důsledku součtu dvou harmonických signálů

Na obrázku č. 4.4 a je zobrazen trojrozměrný souřadnicový systém, který zobrazuje součet harmonických signálů. Dvě souřadnicové osy zobrazují čas a amplitudu signálů, který je znám z předchozího popisu signálu v oblasti času. Třetí souřadnice je souřadnicí frekvence, která umožňuje analýzu harmonických složek. Pokud se na obrázek č. 4.4 podíváme ve směru osy frekvence a obdržíme průběh zobrazený na obrázku č. 4.4 b tj. průběh

v časové oblasti. Při pohledu na obrázek č. 4.4 a ve směru časové souřadnice obdržíme průběh zobrazený na obrázku č. 4.4 c tj. průběh ve frekvenční oblasti, který je nazýván frekvenčním spektrem.



Obrázek č. 4.4: Závislosti mezi časovou a frekvenční oblastí

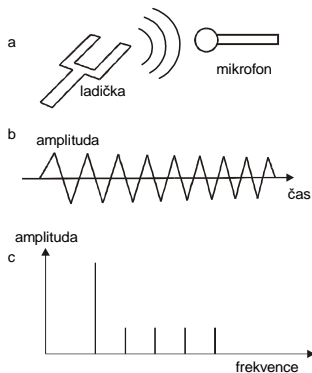
Při zobrazení signálů v časové nebo frekvenční oblasti nejsou ztraceny nebo změněny informace o signálech ale pouze tyto transformace umožňují náhled na signál z jiné strany.

2.2.3 Modální oblast

V předchozím byly popsány signály v oblasti časové a frekvenční. Vlastnosti oblasti, kterou je modální analýza budou popsány na jednoduchém mechanickém systému, kterým je ladička. Modální analýza je velmi vhodná pro analýzu složitých mechanických soustav.

Podstatu modální analýzy lze jednoduše vysvětlit na velmi prosté mechanické soustavě a to na ladičce. Rozezvučíme-li ladičku pouhým udeřením o pevný předmět vydává zvuk, který se v prvních okamžicích chvěje harmonicky s jednou určitou frekvencí. Časový průběh změn akustického tlaku generovaného ladičkou při opakujících se úderech má

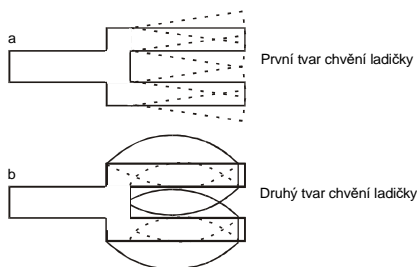
průběh slabě tlumeného harmonického signálu viz. obr. 4.5 b. Ve frekvenční oblasti obr. 4.5 c je možné zjistit, že frekvenční odezva ladičky má hlavní složku o velmi malém tlumení, přičemž střední frekvence této složky je rovná frekvenci zvuku, který vnímáme.



Obrázek č. 4.5: Chvění ladičky

Ne obrázku 4.5 c, je možno identifikovat i vyšší harmonické, které lidské ucho nevnímá. Každá ze složek frekvenčního spektra generovaných ladičkou změn akustického tlaku odpovídá jinému tvaru (módu) chvění ladičky. Pro potřeby tohoto příkladu uvažujeme, že hlavní tón je vytvářen chvěním zobrazeném na obrázku č. 4.6a. Druhá harmonická je vytvářena chvěním zobrazeném na obrázku č. 4.6 b.

Převedeno do technické problematiky, modální analýzou určíme tvar a po-lohu vlastních (modálních) kmitů ve frekvenčním spektru, čímž řešíme otázku rezonance daného strojního systému, resp. jeho naladění, tzn. jeho konstrukci.



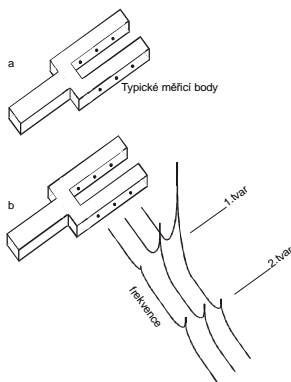
Obrázek č. 4.6: Příklady tvarů chvění ladičky

2.2.4 Závislosti mezi časovou, frekvenční a modální oblastí

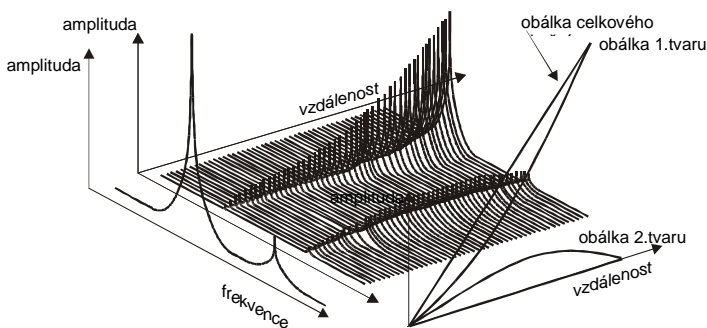
Za účelem zjištění tvaru chvění např. ladičky, nosný rám pod stroj či jiného systému je nutné provést měření chvění v předem určených měřících bodech. Na obrázku č. 4.7 a, jsou zobrazeny některé měřící body ladičky pro měření chvění. Kdyby byla provedená transformace s časové oblasti do oblasti frekvenční byl by výsledek podobný do výsledku na obrázku č. 4.7 b. Převedením signálů z oblasti časové do oblasti frekvenční je možno zjistit vlastností systému nezávisle na způsobu buzení. Pro identifikaci tvaru chvění je nutné znát fázi, která umožňuje určit směr deformací chvějícího se elementu.

Na základě obrázku č. 4.7 b, je možno zjistit, že existují charakteristické frekvence, kterým odpovídají ostrá rezonanční maxima, která jsou nezávisle na umístění měřícího bodu na prověřovaném objektu. Na základě změření šířky rezonačního maxima je možno zjistit, že hodnota tlumení v rezonačním maximu je nezávislá na poloze měřícího bodu. Se změnou polohy měřícího bodu dochází ke změně amplitudy chvění pro rezonanční maximum, tzn. řečeno velmi jednoduše, rezonance jako taková není zdrojem vibrací, pouze zdrojem jejich zvětšování (velikosti).

Na obrázku č. 4.8 je zobrazený výsledek modální analýza ladičky, který je proveden na základě měření v několika bodech. Pohled na obrázek ze strany osy vzdálenosti dává složitou obálku frekvence. Při pohledu ze strany osy frekvence vidíme tvary chvění měřeného objektu.



Obrázek č. 4.7: Modální analýza chvění ladičky



Obrázek č. 4.8.: Závislost mezi oblastí frekvenční a modální

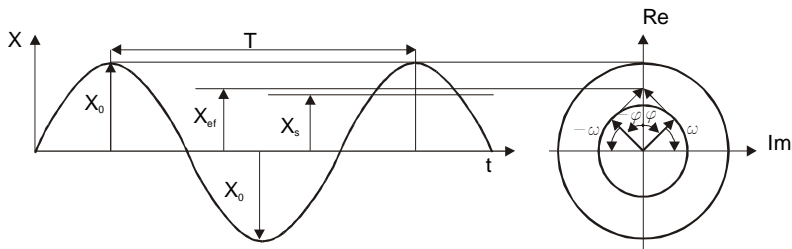
2.3 Klasifikace signálů

Kmitání je děj, při němž určující veličina (obvykle v závislosti na čase) nabývá hodnot střídavě větších i menších, než je určitá rovnovážná hodnota této veličiny.

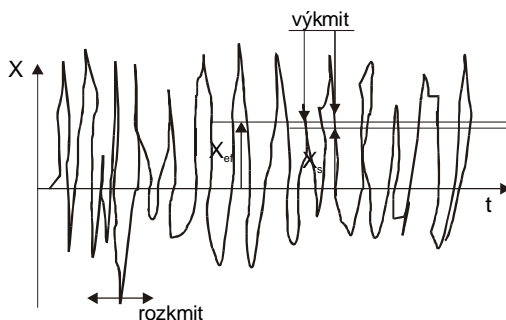
Kmitání může být periodické, neperiodické nebo náhodné. Periodické kmitání je charakterizováno identickým opakováním tvaru kmitu za nějaký časový interval, který označujeme jako periodu kmitání T . Kmitočet f kmitavého pohybu je počet úplných kmitů za jednotku času. Hlavní jednotkou je Hertz (Hz). Platí

$$T = \frac{1}{f}; \quad \omega = 2\pi f \quad (4.14)$$

ω je úhlový kmitočet (s^{-1}).



Obrázek č. 4.9: Popis harmonického kmitání pomocí dvojice rotujících vektorů



Obrázek č. 4.10: Neperiodické kmitání

Nejjednodušším tvarem periodického kmitání je harmonické kmitání, které je matematicky definováno sinusovkou, obrázku č. 4.9

$$x = X_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (4.14)$$

x je okamžitá hodnota určující veličiny,

X_0 amplituda určující veličiny,

t čas,

φ počáteční fáze

Polyharmonické kmitání je složeno z několika harmonických složek s různými kmitočty (obrázek č. 4.4).

Velikost určující veličiny kmitání můžeme udat výkmitem, rozkmitem, efektivní nebo střední hodnotou (obrázku č. 4.10).

Výkmit určující veličiny je její největší hodnota v daném časovém intervalu. U harmonického kmitání je výkmit roven amplitudě X_0 . Indikuje přítomnost maximální hodnoty kmitu (významně zvláště u mechanických rázů), ale neodráží časový průběh, ani kmitočtové složení hodnoceného kmitání.

Rozkmit určující veličiny je algebraický rozdíl extrémních hodnot v daném časovém intervalu. U harmonického kmitání je rozkmit roven dvojnásobné amplitudě. Použití rozkmitu jako charakteristické hodnoty kmitání je výhodné zejména tam, kde je z hlediska maximální přípustného mecha-nického namáhání a konstrukčních vůlí důležitá výchylka kmitání a ve vibrodiagnostice mluvíme o hodnotě špička – špička (peak – peak).

Efektivní hodnota určující veličiny periodického kmitání, které se opakuje za periodu T, je definována vztahem

$$X_{\text{ef}} = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T x^2(t) dt}, \quad (4.15)$$

Pro harmonické kmitání s amplitudou X_0 platí známý vztah

$$X_{\text{ef}} = \frac{1}{\sqrt{2}} X_0 = 0,707 X_0 \quad (4.16)$$

Efektivní hodnota určující veličiny kmitání je jednou z nejdůležitějších charakterických veličin kmitání. Zobrazuje jeho časový průběh a současně má přímý vztah k výkonu. Je tedy vhodným měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti kmitání.

Střední hodnota určující veličiny periodického kmitání je definována rovnicí:

$$X_S = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (4.17)$$

a pro harmonické kmitání platí

$$X_S = \frac{2}{\pi} X_0 = 0,637 X_0. \quad (4.18)$$

Střední hodnota sice zachycuje časový průběh hodnoceného mechanického kmitání, avšak její praktický význam je značně omezen tím, že nemá přímý vztah k žádné důležitější mechanické veličině. Ve vibrodiagnostice jako takové pak měříme dráhu, rychlost nebo zrychlení vibrací. Harmonická analýza je rozklad složeného kmitání na jednotlivé složky; patří k základním měřicím metodám v oboru kmitání a bezdemontážní technické diagnostiky. Výsledkem harmonické analýzy je zjištění frekvenčního spektra, tj. určení amplitud, popř. počátečních fází, jednotlivých harmonických složek. Grafickým záznamem závislosti amplitud harmonických složek na kmitočtu je spektrogram. Harmonická analýza obvykle odhalí řadu výrazných harmonických složek, které mají přímý vztah k funkci jednotlivých částí měřeného stroje, a tak usnadňuje identifikaci zdrojů nežádoucího kmitání.

3 Mechanický původ vibrací rotujících strojů a asynchronních elektromotorů

Z pohledu hodnocení vzniku vibrací, stroj je nutno kvalifikovat jako autogenerační systém. Tato skutečnost je patrná i z obrázku č.5.1., kde odezvou na napájení je celá řada zbytkových procesů a mezi nimi i procesy vibrační. V tomto případě je přivedená energie do vstupu stroje přeměněna na základní pohyb, který je technologicky nezbytný. Obecně to může být rotující pohyb (např. elektrické motory, hydrogenerátory, čerpadla, ventilátory, drtiče, kombajny atd.), přímočarý pohyb (pístové motory, lisy, atd.), včetně kombinace obou základních pohybů. Jak je vidět z příkladů oba základní pohyby včetně jejich kombinace se vyskytují v jednotlivých částech hnací a hnané jednotky stroje. Tyto základní pohyby hnacích agregátů a taktéž pracovních orgánů v nich budí celou stupnici doprovodných pohybů, které jsou zbytečné z hlediska provozování stroje. Doprovodné dynamické procesy jsou: vibrace, hluk, pulsace média, akustické emise. Nutno říci, že vznik vibrací, hluku a pulsace média není vždy informací o vadné funkci stroje nebo jeho špatném technickém stavu. Nedá se např. ideálně vyvážit pístový kompresor, proto je nutné vzít v úvahu určitou úroveň vibrací jako jmenovitou, která vznikla z konstrukční realizace posláni stroje. Stejně efekty dává médium, které je stlačováno pístovým kompresorem – jmenovité pulsace média, atd. Z příkladů je zřejmé, že ve většině případů chodu strojů nebudou podstatné generované vibrační procesy, nýbrž odchylky těchto efektů od úrovně a charakteru generování a standardu dobrého stroje. Základní zdroje vibračních procesů, které působí při chodu strojů jsou uvedeny dále.

3.1 Nevyváženost

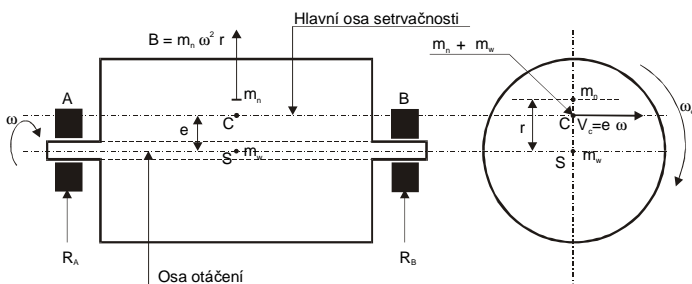
Nevyváženost je společná vlastnost veškerých rotujících elementů, tj. rotorů rotačních strojů a taktéž zalomených hřídelí pístových strojů. V prvním případě je nevyváženost postranním efektem nestejnorodosti materiálu, nedokonalé výroby a taktéž důsledkem provozního opotřebení.

V druhém případě nevyváženost klikové hřídele je charakteristikou stroje, kterou konstruktér provedl záměrně. Tato charakteristika se nemění
při

provozování stroje. Obecně, každá nevyváženost hmoty při rotujícím pohybu je zdrojem odstředivých sil nebo momentů setrvačnosti, které se prostřednictvím ložiska přenášejí na těleso stroje a jsou zdrojem vibrací celé soustavy. Změření amplitudy a fáze těchto vibrací umožňuje určit druh nevyváženosti, jak je uvedeno níže.

3.2 Statická nevyváženost

Uvažujeme o rotoru stroje na tuhém hřídeli, který je osazen ložisky a rotuje úhlovou rychlostí ω_0 . Ať hmota rotoru a hřídele je m_w . Od osy rotace na poloměru „ r “ v rovině „ S “ je přídatná hmota nevyvážky m_n tak, jak je uvedeno na obrázku č. 5.11.



Obrázek č. 5.11: Staticky nevyvážený rotor

Ze základů mechaniky strojů lze najít dvěma způsoby setrvačné síly rotoru. Budeme-li uvažovat pouze o nevyvážené hmotě $B = m_n r \omega_0^2$ a posunutí osy setrvačnosti a celou hmotu soustavy, kde $B = (m_n + m_w) e \omega_0^2$ a jejich řešením obdržíme vlastní nevyváženost:

$$e = \frac{m_n r}{m_n + m_w} \cong \frac{m_n r}{m_w}, \text{ kde } m_w \gg m_n \text{ v jednotkách délky } [\mu\text{m}].$$

Hodnotu e je možno obdržet se známe rychlosti kmitání středu hmoty C nevyváženého rotoru, kde $v_c' = e \omega$. Na určení hodnoty rychlosti v_c jsou založeny normy, které dovolují pro jednotlivé stroje určitou úroveň nevyváženosti e_d . Rotující setrvačná síla způsobená nevyvážeností, je zachycována ložisky, kde $C = R_A + R_B$.

Tuhost ložisek v konstrukci stroje je vždy konečná, proto reakce R_A a R_B budou budit v okolních elementech a uzlech stroje vibrace s otáčkovou

$$\text{frekvencí } f_O = \frac{\omega_O}{2\pi} = \frac{n}{60}, [\text{Hz}].$$

n – otáčky stroje [min^{-1}].

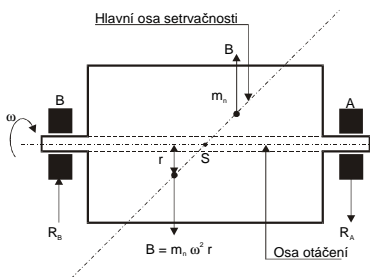
Měřením amplitudy vibrací na ložiscích, můžeme přímo zjistit velikost nevyváženosti. Dosti často se používá i slangové označení – těžký bod.

3.3 Momentová nevyváženost

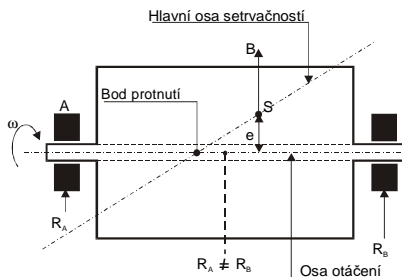
Momentová nevyváženost vzniká tehdy, když nevyvážené hmoty jsou symetricky a střídavě rozloženy vůči těžišti S (obrázek č. 5.12.). Tehdy hlavní osa setrvačnosti prochází osou rotace v těžišti a reakce ložisek jsou stejné, ale opačného znaménka. Jinými slovy. Rotující dvojice sil vyvolává reakce vzájemně pootočené o 180° . Fázový posun o 180° je základním charakteristickým rysem pro momentovou nevyváženost, která se dá jednoduše zjistit měřením vibrací na ložiskových stojanech.

3.4 Kvazistatická nevyváženost

Kvazistatická nevyváženost vzniká tehdy, když nevyvážené hmoty jsou rozloženy mimo těžiště. Tehdy hlavní osa setrvačnosti protíná osu rotace mimo těžiště S a vzniká vlastní nevyváženost e . Reakce na ložiskových stojanech ložisek A a B jsou amplitudově různé ale ve fázi (obrázek č. 5.13.).



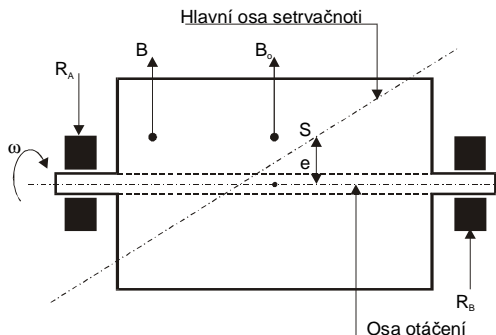
Obrázek 5.12.: Momentová nevyváženost



Obrázek 5.13: Kvazistatická nevyváženost

3.5 Dynamická nevyváženost

Dynamická nevyváženost je nejčastější nevyvážeností hmot rotoru, při které hlavní osa setrvačnosti je nestabilní vůči ose rotace ve vzdálenosti e (viz obrázek č. 5.14).



Obrázek č. 5.14: Dynamická nevyváženost

Z hlediska mechaniky soustavu setrvačných sil tohoto případu je možno redukovat na výslednici vektorů sil, proloženou těžištěm a rotující dvojicí sil, která je rovna součtu momentů odstředivých sil nevyváženosti. V tomto případě reakce (vibrace) ložisek A a B budou amplitudově proměnlivé a fá-zově posunuty o 180° , tzn. nutnost měření i fáze.

Závěrem nutno zdůraznit, že nevyváženost je jev dynamický, který se projevuje při pohybu. Zjištění druhu nevyváženosti umožňuje rychlé rozhodnutí o způsobu vyvažování: při statické a kvazistatické nevyváženosti bude vyvažování provedeno v jedné rovině, při momentové a dynamické nevyváženosti bude vyvažování provedeno ve dvou rovinách. Rozdělení nevyváženosti je velmi důležité pro stroje, které mají otáčky v oblasti vlastní, modální frekvence. Tato frekvence se jmenuje modální (u hřídelí kritická).

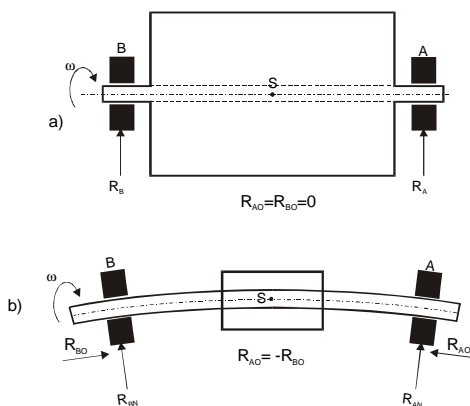
$$\omega_{kr} = 2\pi n_{kr} = \sqrt{\frac{k_z}{m_u}} \quad (5.19)$$

k_z – náhradní tuhost soustavy
 m_z – náhradní hmota soustavy

Dojde-li k tomu, že $\omega_0 \sim \omega_{kr}$ potom amplitudy průhybů a vibrací hřídele budou mít nebezpečně velké hodnoty a může dojít k havárii stroje z důvodu rezonance.

3.6 Ohnutá hřídel

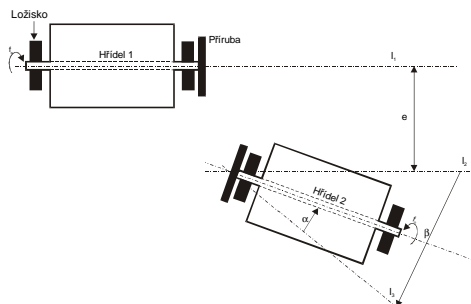
Hřídel ohnutá následkem zadření rotoru o stator a následné tepelné deformace se stejně projevuje jako statická nebo kvazistatická nevyváženost v závislosti na umístění středu prohnutí. V důsledku otáčení prohnutého hřídele se objevují axiální reakce na ložiska, které mají opačné směry (obrázek č. 5.15.). Změření fázového posunu vibrací ložisek a zjištění, že fázový posun je 180° , dává jistotu, že hřídel je ohnutá.



Obrázek č. 5.15: Rozdíl mezi nevyváhou (a) a ohnutou hřídelí (b)

3.7 Nesouosost hřídelí, spojky, vůle

Hnací soustava stroje a její pracovní orgán jsou vesměs konstrukčně rozdílné a spojené pomocí spojek. Spojení těchto dvou soustav je vesměs nesouosé a obecně je možno definovat dva druhy nesouososti: paralelní a úhlové (obrázek č. 5.16), které vznikly jako důsledek výrobních a montážních chyb.



Obrázek č. 5.16: Možné typy nesouososti a jejich míry:
 e = nesouosost, α = šikmé k rovině l_1 , l_2 , β = úhlové v rovině os l_1, l_2

Nesouosost hřídelí je zdrojem vibrací s dvojnásobnou otáčkovou frekvencí $2f_0$, $\left(f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \right)$

Amplituda těchto vibrací je přímo úměrná radiálnímu posunu a taktéž úhlovému posunu β , avšak při šikmosti závisí na $\cos \alpha$. Při paralelní nesouososti vibrace mají charakter radiální, kolmý na hřídele. Fázový posun, který je měřený na sousedních ložiskových stojanech je 180° . Nesouosost úhlová a šikmá je charakterizována mohutnou axiální složkou s fázovým posunem 180° . Amplituda axiální složky může převyšovat radiální složku až 1,5 krát.

3.8 Spojky

Spojky spojující výše analyzované hřídele hnacího a hnaného agregátu mají velký vliv na dynamický stav celého soustrojí. K nejvíce používaným spojkám patří: pevné, pružné a zubové. Poslední dva druhy spojek kromě přenášení výkonu mají za úkol vyrovnávat výrobní a montážní vady agregátů, včetně vibrací a rázů. Pevná spojka je složena ze dvou přírub, které jsou spojeny spojovacími šrouby. Správně nastavená souosost je zárukou, že nevzniknou přidavné vibrace. Pružná spojka je složena z pryžových elementů, pružinových atd. Tato spojka lépe tlumí vibrace. Při nesouososti agregátů jsou pozorovány vibrace, jak je výše uvedeno, ale jejich amplituda je tím menší, čím je spojka pružnější nebo ustavení

hnacího a hnaného agregátu je provedeno na maximální mez přesnosti možnou docílit pomoci moderní technologie ustavování. Zubové spojky dovolují větší radiální a úhlové posunutí hřídelí. Avšak ve většině případů, samotná spojka nerovnoměrně zatížená je zdrojem vibrací s otáčkovou frekvencí f_o a spojkovou harmonickou frekvencí $f_s = z \cdot f_o$

f_s - spojková frekvence

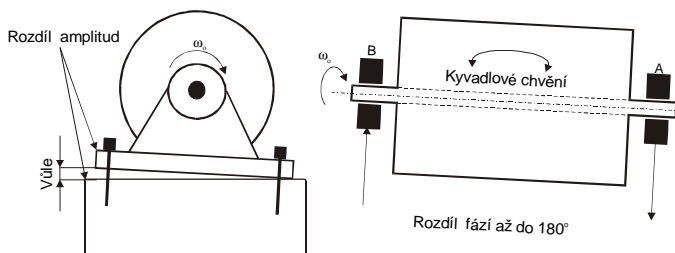
z - počet zubů spojky (kolíků)

f_o - základní otáčková frekvence

3.9 Vůle v uložení agregátu

Nesouosost hřídelí hnacího a hnaného agregátu budí pohyb v prostoru obou členů soustavy s největšími amplitudami v horizontální rovině. Tento druh vibrací je příčinou uvolnění kotvících šroubů k základům. Takovéto uvolnění kotvících šroubů v závislosti na horizontálním nebo radiálním resp. vertikálním směru je zdrojem vibrací s rázy, které vedou k utržení šroubu a havárii celého agregátu. Zjištění vůle je možné změřením rozdílů amplitud a fází vibrací kotvícího šroubu a patky stroje. Rozdíly je možné zjistit také změřením fáze mezi dvěma patkami stroje (viz obrázek č. 5.17.).

V závislosti na počtu rázů v průběhu periody, největší vibrace v důsledku vůlí se mohou objevit na základní otáčkové frekvenci f_o nebo dvojnásobné $2f_o$.



Obrázek č. 5.17: Montážní vůle

3.10 Valivá ložiska jako zdroj vibrací

Valivá ložiska jsou konstrukčním prvkem, který umožňuje vzájemný pohyb součástí ve strojích, přičemž současně přenáší působící síly.

Skládají se obvykle ze dvou kroužků, valivých těles a klece. Valivá tělesa se odvalují v oběžných drahách kroužků a klec je rozděluje rovnoměrně po obvodě. V některých případech se mohou valivá tělesa odvalovat přímo na hřídeli nebo v tělese. Ložiska mohou být dodávána i bez klece. Valivé ložisko je samo o sobě zdrojem vibrací a taktéž přenáší vibrace způsobené jinými procesy probíhajícími ve stroji. Pro provádění bezdemontážní technické diagnostiky je ložisko nejdůležitějším elementem ve stroji.

Vibrace vznikají v ložisku jeho vlastní činností a jsou generovány periodicky s měnícím se počtem točných elementů, které přenášení zatížení a taktéž pohybem valivých elementů po odvalovací dráze, jejichž dotyk může být bodový nebo přímkový. Vibrace tedy vznikají od periodicky se otáčejících se valivých elementů pod zatížením, způsobují změnu tuhosti ložiska, která je vyvolána změnami zatížení valivých elementů ložiska.

Dalšími příčinami vibrací valivých ložisek jsou výrobní tolerance a vady. Původ provozních vibrací ložisek je v opotřebením a to v důsledku tření a únavy materiálu. Poslední dvě opotřebením prohlubují výrobní nedostatky a dochází ke změnám tvaru a tolerancí. Nastíněná fakta by měla být respektována již ve stadiu konstrukce a projekce, což lze dokumentovat

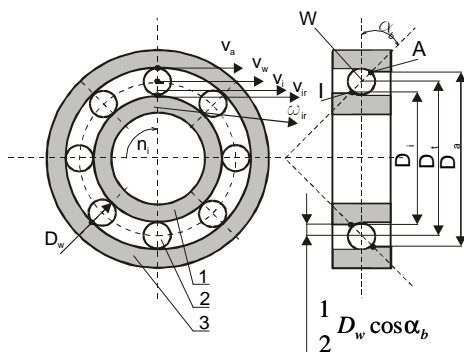
i na současných metodikách výpočtu trvanlivosti valivých ložisek. Za všechny upozorňují pouze na metodiku známého výrobce valivých ložisek firmy SKF.

3.10.1 Kinematika pohybu a otáčková frekvence

Stanovení obvodové rychlosti a rychlosti převalování kuliček na valivých drahách a z toho vznikající otáčkové frekvence, má velký význam pro technickou diagnostiku. Tyto jevy mohou být součástí spektra vibrace ložiska vibrace hřídele a jsou měřením zjistitelné. Stanovení otáčkových a kinematických poměrů umožňuje zjistit náhled o skutečném stavu a poškození valivých ložisek a to:

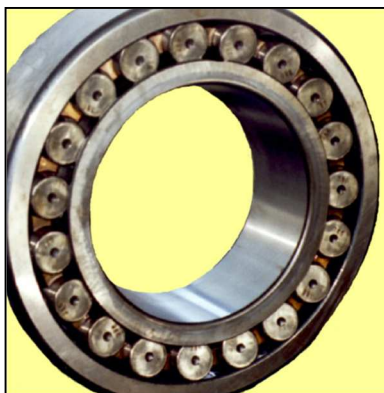
- cyklus namáhání a jeho časové vymezení,
- pohyb klece vztažený k valivým drahám,
- pohyb klece vztažený k valivým tělesům,
- druh a velikost třecích momentů.

Kinematické poměry jsou všeobecně uvedeny na příkladě radiálně-axiálního kuličkového ložiska s pevně usazeným vnějším kroužkem a s vnitřním kroužkem obíhajícím s otáčkami n (obrázku č. 5.18).



Obrázek č. 5.18: Kinematické poměry v radiálně-axiálním kuličkovém ložisku

Legenda: 1 - vnější kroužek, 2- kulička, 3 - vnitřní kroužek, v_a - obvodové rychlost bodu A, v_w - obvodová rychlost dotekového bodu I, v_l - obvodová rychlost styčné roviny vnitřního kroužku, ω_l - úhlová rychlost valivé plochy vnitřního kroužku, α_b - úhlová rychlost valivé plochy vnitřního kroužku, n - počet otáček



Obrázek č. 5.19.: Válcové ložisko

Geometrické a kinematické poměry jsou silně odvislé od vnějšího zatížení, které určuje procesy, jež nastávají na dotyku. Valivý pohyb je součtem valivého pohybu a pohybu vrtání na stycích. Čistý valivý pohyb nastává jen když prodloužená linie dotyku valivého tělesa a valivé dráhy prochází jedním bodem na ose ložiska, v mezním případě v nekonečnu. Jelikož dotykové tangenty u radiálně-axiálního ložiska probíhají navzájem, paralelně, neprocházejí jedním bodem ložiskové osy a nedochází k čistému valení.

3.10.2 Kinematika při čistém valení

Pro zjednodušené stanovení kinematických poměrů byla zvolena tato zjednodušení:

- v dotykovém bodě, resp. linii, je ideální valení bez prokluzu,
- vliv hmotnosti, resp. hmotnostních sil je zanedbatelný,
- úhel působení tlakových sil je stejný u vnitřního i vnějšího kroužku.

Vzhledem k ose otáčení ložiska má každý dotykový bod přímku valivého tělesa s oběma valivými drahami stejnou úhlovou rychlost ω , jako střed valivého tělesa.

$$\omega_{aO} = \omega_{wO} = \omega_{iO} \quad (5.21)$$

Obvodová rychlost dotykových bodů:

$$v_a = \frac{1}{2} \omega_{wO} \cdot (D_t + D_w \cdot \cos \alpha_b) \quad (5.22)$$

$$v_i = \frac{1}{2} \omega_{wO} \cdot (D_t - D_w \cdot \cos \alpha_b) \quad (5.23)$$

$$\omega_{wO} = v_w \left(\frac{1}{2} \cdot D_t \right) \quad (5.24)$$

úpravou dostáváme:

$$v_a = v_v \left(1 + \frac{D_w}{D_t} \cos \alpha_b \right) \quad (5.25)$$

$$v_i = v_w \left(1 - \frac{D_w}{D_t} \cos \alpha_b \right) \quad (5.26)$$

Bod A (obr. 5.18) je okamžitý pól valivého tělesa, kolem kterého se otáčí každý bod valivého tělesa s úhlovou rychlostí ω_a .

Potom následně platí:

$$v_w = \frac{1}{2} \omega_a D_w \quad (5.27)$$

Bod valivého tělesa, který se dotýká valivé dráhy vnitřního kroužku má okamžitou rychlost:

$$v_{wi} = \omega_a \cdot D_w \quad (5.28)$$

Tato se ale rovná obvodové rychlosti valivé dráhy vnitřního kroužku:

$$v_i = \pi \cdot n (D_t - D_w \cdot \cos \alpha_b) \quad (5.29)$$

Z rovnic (5.28) a (5.29) je určena ω_a . Dosazením ω_a do (5.27) obdržíme:

$$v_w = \frac{1}{2} \pi n D_t \left(1 - \frac{D_w}{D_t} \cos \alpha_b \right) \quad (5.30)$$

Obvodová rychlost v_{ka} klece je rovná obvodové rychlosti v_w středu kuličky. Dosazením (5.30) do (5.25) a (5.26) vycházejí obvodové rychlosti dote-kových bodů:

$$v_a = \frac{1}{2} \pi n D_t \left[1 - \left(\frac{D_w}{D_t} \cos \alpha_b \right)^2 \right] \quad (5.31)$$

$$v_i = \frac{1}{2} \pi n D_t \left[\left(1 - \frac{D_w}{D_t} \cos \alpha_b \right)^2 \right] \quad (5.32)$$

Přijme-li se, střed kuličky jako pevný bod, pohybující se dotykové body (přímky) kuličky, (válečky a soudečky), tzn. odpovídající skutečné plochy se otáčejí tak platí, že rychlost převalování na vnějším kroužku je rovna obvodové rychlosti dotekového bodu A ($\omega_a = 0$) potom platí:

$$V_{ua}'' = v_{ui}'' = v_a \quad (5.33)$$

to znamená, že pro radiálně-axiální kuličková ložiska jsou charakteristické následující frekvence f_i :

otáčková frekvence klece KA'':

$$f_{ka}'' = \frac{1}{2} f_n \left(1 - \frac{D_w}{D_t} \cos \alpha_b \right) \quad (5.34)$$

Převalovací frekvence vnějšího kroužku:

$$f_a = \frac{1}{2} f_{n.z} \left(1 - \frac{D_w}{D_t} \cos \alpha_b \right) \quad (5.35)$$

Převalovací frekvence vnitřního kroužku:

$$f_i = \frac{1}{2} f_{n.z} \left(1 + \frac{D_w}{D_t} \cos \alpha_b \right) \quad (5.36)$$

Otáčková frekvence valivého tělesa:

$$f_{wa} = \frac{1}{2} f_n \cdot \frac{D_t}{D_w} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_w}{D_t} \cos \alpha_b \right)^2 \right] \quad (5.37)$$

Převalovací frekvence nepravidelnosti kuličky na obou valivých drahách (vliv skluzu):

$$f_w = 2f_{wa} = f_n \cdot \frac{D_t}{D_w} \left[1 - \left(\frac{D_w}{D_t} \cos \alpha_b \right)^2 \right] \quad (5.38)$$

Rovnice (5.34) až (5.38) označují důležité informace pro diagnostickou techniku a vyhodnocování diagnostických měření.

3.11 Vibrace převodových skříní

Převodové skříně jsou nejvíce rozšířeným konstrukčním prvkem strojů. Jako část hnacího zařízení slouží pro přenos rotujícího pohybu a

momentu z jedné části stroje na druhou. Dobře konstrukčně řešená převodová skříň a taktéž kvalitně vyrobená má mnoho předností oproti jiným řešením. Patří k nim především:

- značná účinnost,
- velká spolehlivost,
- možnost transmise ve značném rozsahu výkonu a otáček,
- velmi přesný převodový poměr.

Na převodové skříně jsou kladeny speciální požadavky s ohledem na spolehlivost a velkou dobu provozování. Oprava převodové skříně je

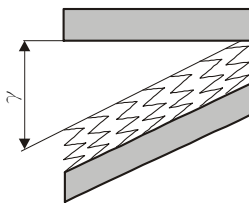
značně nákladná a navíc ztráty vzniklé z titulu zastavení provozu a taktéž nedodání výrobku na trh v pravý čas je značně nákladné. Z tohoto titulu je velmi důležité provádění technické kontroly stavu, tzn. opotřebení převodových skříní.

Dynamika ozubení na záběrové čáře

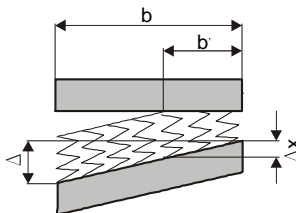
Nerovnoměrné rozložení zatížení na záběrové přímce ozubeného kola může budit chvění v určitém frekvenčním pásmu a je zapříčiněno třemi vadami :

- Špatnou výrobou, která způsobuje vady mající přímo vliv na stopu záběru jak: nerovnoběžnost os, chyba směru osy zubu atd. V důsledku těchto výrobních vad ozubení nemá dotyk na celé záběrové přímce zubu ale nejčastěji neúplný, tzn., jednostranný.
- Ozubení při chodu naprázdno se chovají jako dobrá a při zatížení vykazují vady. Je to zapříčiněno vlivem nerovnosti hřidel ozubených kol, které vzniká při zatížení.
- V jednoduchých ozubených kolech zub zapadá do ozubení na celé jeho záběrové přímce, ale tuhost se mění podél profilu zubu, což způsobuje nerovnoměrnost zatížení.

V důsledku působení různých výrobně-technologických vad u jednoduchého ozubení dochází mezi zuby k vytvoření určitého uhlu γ viz obr. č. 5.20. Úhel je menší než 1° a proto z tohoto důvodu je lépe určit polohu zubu rozdílem Δ anebo poměrem Δ/b , který je tangentou uhlu γ viz obrázek č. 5.21.



Obrázek č. 5.20: Schematická ukázka pružnosti ozubení

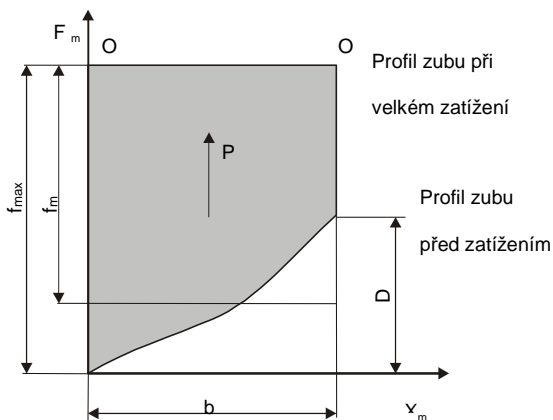


Obrázek č. 5.21: Rozložení zatížení na zubech při velkých vadách dosednutí

V důsledku zatížení, podléhají zuby deformaci. Je to zobrazeno na obrázku č. 5.20. což je jako stlačení pružin na délce označené b' . Při velkém zatížení všechny pružiny se spojí s plochou na celé výšce b , a takto ozubení pracuje na celé výšce ozubení. Délka záběru je závislá z jedné strany na rozsahu vad a z druhé strany na mohutnosti zatížení. V případě malých vad ve srovnání se změnou tvaru nastává situace zobrazena na obrázku č. 5.22., na kterém je vidět profilovou čáru před a po zatížení, čímž je určeno f_{max} a střední deformace f_m . Polohu přímky $O - O$ po zatížení je možné určit ze závislosti

$$f_m = \frac{P}{b \cdot k} = \frac{1}{b} \int_0^b f \cdot dx \quad (5.46)$$

kde P = celkové zatížení, k = tuhost ozubení.



Zdroje vibrací převodové skříně

Výrobní vady ozubených kol mají dominantní vliv na dynamiku převodových skříní a současně i rozložení zatížení na záběrové přímce ozubeného kola a taktéž jsou zdrojem vibrací při provozování. Výrobní vady je možno rozdělit:

- vady tvaru ozubeného kola,
- vady dělení,
- montážní vady.

Výroba převodových skříní je složena z desítek a možná i stovek výrobních operací. V důsledku toho dva stejné typy převodových skříní vyrobené v jedné továrně při dodržení stejných technologických postupů mohou mít jiné vlastnosti. Pokud do procesu výroby převodových skříní vniknou vady je velká pravděpodobnost, že převodové skříně budou zmetkové a při provozování dochází k rychlým haváriím těchto elementů.

Charakteristické frekvence chvění převodových skříní

Nevyváha ozubených kol, jejich nesouosost a taktéž kinematická odchylka záběru ozubení jsou zdrojem chvění o nízké frekvenci.

Nesouosé uložení ozubeného kola budí signál o frekvenci:

$$f_1 = \frac{n_1}{60} \text{ [Hz]} \quad (5.47)$$

n_1 jsou otáčky ozubeného kola, resp. hřídele.

Otáčková frekvence malých ozubení je v pásmu do 16 Hz. Frekvence dvojice zubů je

$$f_{z1,2} = \frac{n_1}{60} z_1 = f_1 z_1 = \frac{n_2}{60} z_2 = f_2 z_2 \text{ [Hz]} \quad (5.48)$$

Tato otáčková frekvence je pod akustickým pásmem a její vyšší harmonické mohou být na úrovni akustického pásma. Akustický výkon těchto frekvencí je malý ve srovnání s celkovým výkonem, který vytváří převodová skříň a proto tento typ chvění je důležitý v technické diagnostice převodových skříní. Analogicky lze určit frekvence buzení otáčením se druhého ozubeného kola

$$f_2 = \frac{n_2}{60} [\text{Hz}] \quad (5.49)$$

n_1 jsou otáčky ozubeného kola, resp. hřídele.

Otáčková frekvence malých ozubení je v pásmu do 16 Hz. Frekvence dvojice zubů je

$$f_{z1,2} = \frac{n_1}{60} z_1 = f_1 z_1 = \frac{n_2}{60} z_2 = f_2 z_2 [\text{Hz}] \quad (5.50)$$

Tato otáčková frekvence je pod akustickým pásmem a její vyšší harmonické mohou být na úrovni akustického pásma. Akustický výkon těchto frekvencí je malý ve srovnání s celkovým výkonem, který vytváří převodová skříň a proto tento typ chvění je důležitý v technické diagnostice převodových skříní. Analogicky lze určit frekvence buzení otáčením se druhého ozubeného kola

$$f_2 = \frac{n_2}{60} [\text{Hz}] \quad (5.51)$$

Důležitý význam procesu buzení vibroakustických signálů mají tedy frekvence spojené se zabíráním zubů

$$f_{z1,2} = \frac{z_1 n_1}{60} = \frac{z_2 n_2}{60} = f_1 z_1 = f_2 z_2 \quad (5.52)$$

Nezávisle od základních frekvencí výše uvedených vznikají také frekvence harmonické

$$f_k = k \cdot f_1, \quad f_k = k \cdot f_{1,2}, \quad f_{k,z} = k \cdot f_z \quad (5.53)$$

$k = 1, 2, 3, \dots$

Počet harmonických a jejich amplitudy jsou závislé na druhu ozubení a tak-též jsou závislé na nedokonalé výrobě převodových skříní a pružnosti jednotlivých ozubených kol a celého tělesa převodové skříně.

U planetových převodových skříní jednostupňových mohou vystupovat frekvence, které vznikají z otáček unášedce n_j a počtu oběžných satelitních kol.

$$f_j = k \cdot \frac{n_1}{60} \quad f_s = k \cdot s \cdot \frac{n_1}{60} \quad [\text{Hz}] \quad (5.54)$$

Navíc mohou vznikat frekvence způsobené zazubením jednotlivých zubů satelitní soustavy,

$$f_{zs} = k \cdot \frac{z_z}{z_s} \cdot n_j \quad f_z = k \cdot n_j \cdot z_z \quad (5.55)$$

zz - počet zubů ozubeného kola s vnějším ozubením

zs - počet zubů oběžného kola

V průběhu zabírání zubů se objevují několika násobné budící síly chvění, které odpovídají fázi zabírání zubů, co je zobrazeno schematicky na obrázku č. 5.23. Když kolo 2 pohání kolo 1 následné fáze zabírání zubů je možno zobrazit. V bodě K2 pata zubu hnacího kola vchází do záběru a naráží na hlavu zubu hnaného. V tomto momentu předchozí pár zubů zůstává v záběru. Záběr následné dvojice zubů budí určitý druh rázu, který je způsoben elastickými deformacemi předchozí zatížené dvojice zubů. Taktéž vady dělení způsobují rázy. V případě kdy popsáný zub zabírá, což vede k plnému zatížení, popisované dvojice zubů a zároveň podmiňuje opětovné buzení určitého sílového impulsu. Následný impuls vzniká v bodě C, ve kterém se mění směr působení třecí síly. Když zub se bude nacházet v bodě D tehda v bodě K2 dojde k zatížení následujícího zubu v bodě K1 zub je odlehčen a vychází ze záběru.

Hodnota rázového impulsu, která odpovídá styku zubů je určena vztahem:

$$q = 4 \frac{I_1 I_2}{\pi} \cdot \frac{z_1 \omega_1}{I_1 m^2 z_2^2 + I_2 m^2 z_1^2} \cdot \Delta t \quad (5.56)$$

I_1, I_2 setrvační momenty setrvačnosti hnacího a hnaného ozubeného kola
 m modul ozubeného kola
 z_1, z_2 počet zubů
 ω_1 uhlová rychlost
 Δt chyba dělení

Veškeré výše uvedené složky podstatně komplikují průběh mechanických vibrací. Také nutno říci, že určitá poškození mohou budít rezonanční frekvence a tyto rezonanční frekvence v určitých případech mohou dávat lepší informace než informace získané z otáček a ozubení. Taktéž usazením jednotlivých hřídelí ozubených kol v ložiscích může vykazovat frekvenční spektrum celé převodové skříně velmi komplikovaně a v důsledku toho ne vždy mohou být všechny harmonické a vlastní frekvence ozubení čitelné. Proto se při měřeních používají pásmové frekvenční analyzátory.

Na obrázku č. 5.25 je zobrazeno procesní ideové schéma převodové skříně z pohledu návrhu diagnostického systému vibrodiagnostiky. Převodová skříň má dvě části vstupních zátěžových spekter hodnot. První je vnějšího charakteru a určuje složky, které působí na převodovou skříň konáním

práce, pro kterou je určena. Je tu nutno zdůraznit dynamické vlastnosti hnacího motoru a samozřejmě také převodové skříně, tzn.:

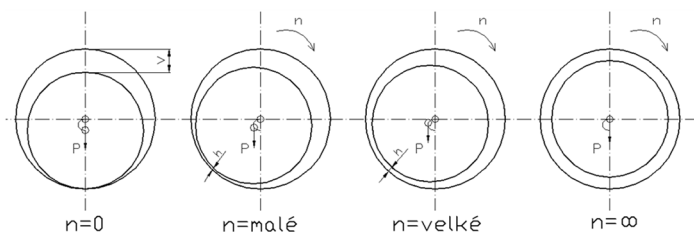
- druh otáčivého pohybu (rovnoměrný, zrychlený) motoru a převodové skříně,
- druh vibrací (periodické, hluk elektromotoru a převodové skříně),
- přenášený točivý moment (stabilní, pulsující),
- dynamické vlastnosti motoru a převodové skříně.

3.12 Kluzná ložiska jako zdroj vibrací

Kluzná ložiska jsou součástí strojů, které dovolují jiným součástem otáčivý pohyb kolem vlastní osy a přenášejí z nich zatížení kolmé k této ose v jiných případech taktéž v axiálním směru. Při tom se součást rotující a nehybná vzájemně stýkají svými válcovými plochami, po nichž ve směru otáčení klouzají.

První předpoklad k dosažení kapalinného tření a tím chodu bez otěru, je klínová mazací vrstva. U radiálních ložisek ji tvoří ložisková vůle. Za klidu spočívá čep v ložiskové pánvi (obrázek č. 5.26). Mezi čepem a pánvi vzniká vůle, která se zmenšuje směrem k místu zatížení, a tak tvoří klín potřebný pro vznik kapalinného tření. Čep strhuje při otáčení olej z prostoru vytvoře-

ného ložiskovou vůlí a tlačí jej ve směru otáčení. Tím se zvyšuje v mazací vrstvě tlak, který při určité rychlosti přemůže zatížení čepu a čep vyplave na mazací vrstvu. Nastane kapalinné tření. Průběh tlaku je znázorněn na (obrázek č. 5.27). Výslednice tlaku v olejové vrstvě je poněkud posunuta ve směru otáčení za místo výsledného zatížení ložiska. Čep se vlivem tohoto vztlaku vysune z osy ložiska. Výstřednost čepu je určena za jinak stejných okolností měrným tlakem a obvodovou rychlostí čepu. Čím větší je měrný tlak, tím větší je výstřednost, čím větší je obvodová rychlost, tím menší je výstřednost. Osa čepu se pohybuje přibližně po kružnici s průměrem rovným největší výstřednosti čepu v ložisku. Poloha čepu v ložisku je velmi důležitá, poněvadž určuje nejmenší tloušťku mazací vrstvy, která zase rozhoduje o tom, zdali čep v pánvi plave nebo jen běží v oblasti mazného tření a tedy malé provozní bezpečnosti.



Obrázek č. 5.26: Poloha čepu v ložisku při různém počtu otáček

Plavání čepu je možno dosáhnout i při sebenepatrnější tloušťce mazací vrstvy (např. 0,001 mm), ovšem za předpokladu příslušné hladkosti obrobených ploch, souososti a tuhosti hřídele a ložiska. Ložiska, u nichž je třeba pro přesnost práce dodržet soustřednost hřídele s ložiskem, dosahují této vlastnosti úpravou dvou nebo tří klínových vrstev a tím i dvou či tří vztlaků v mazací vrstvě, které stabilizují hřídel a tlumí kmity viz obrázek č. 5.28.

Nejmenší tloušťka mazací vrstvy určuje tedy provozní bezpečnost ložiska. Čím větší je tato tloušťka, tím větší je i bezpečnost. S rostoucí tloušťkou mazací vrstvy se však zároveň zvětšují ztráty třením a chvění hřídele. Z tohoto důvodu nemá být nejmenší tloušťka mazací vrstvy nikdy větší nežli $\frac{1}{4}$ (výjimečně $\frac{1}{3}$) ložiskové vůle. Směrem dolů je nejmenší tloušťka mazací vrstvy omezována drsností povrchů čepu a ložiskové pánve, jakož

i průhybem a nesouosostí čepu a ložiska. Ze zkušenosti víme, že pro provozní bezpečnost ložiska stačí, aby nejmenší tloušťka mazací vrstvy byla rovna alespoň součtu drsností obou povrchů, průhybu a nesouososti hřídele a ložiska.

Nejmenší tloušťku mazací vrstvy h_0 je: $h_0 = k \frac{v \cdot \eta}{\psi \cdot p}$

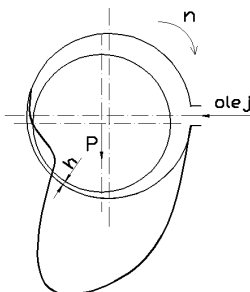
v je obvodová rychlost čepu

p – měrný tlak v ložisku

$\psi = \frac{D - d}{d}$ – poměrná ložisková vůle

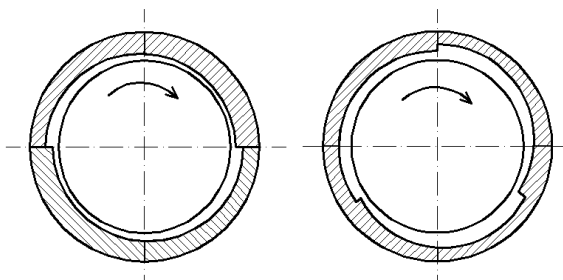
η – absolutní viskozita oleje

k – součinitel závislý na poměrné délce ložiska l/d



Obrázek č. 5.27: Průběhová křivka hydrodynamického tlaku

Z toho vztahu je patrné, že provozní bezpečnost ložiska závisí na mnoha činitelích. Jsou to: měrný tlak, obvodová rychlost, ložisková vůle, poměrná délka ložiska, obrobení čepu a pánve, jejich tuhost a souosost a viskozita oleje. K těmto činitelům přistupuje ještě uspořádání přívodu a rozvodu maziva, jakož i způsob mazání, které určují dokonalost pochodu při mazání. U ložisek pracujících v oblasti mezního tření, tj. při malých rychlostech, přerušovaném chodu s rázy nebo při nedostatečném mazání, zmenšují někteří z těchto činitelů svůj význam. Zvyšuje se zato význam jakosti obrobení a přistupuje ještě také vliv nouzových vlastností ložiskových materiálů. Všechny tyto činitele je třeba při návrhu a výrobě ložisek dobře uvážit.



Obrázek č. 5.28: Ložisko k dosažení soustřednosti čepu

3.12.1 Ložisková vůle

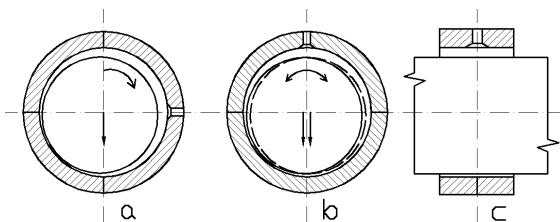
V praxi se věnuje málokdy dostatečná pozornost volbě správné ložiskové vůle. Volíme-li uložení podle norem, zjistíme, že i tu jsou tolerance někdy pro naši potřebu příliš hrubé. Např. pro точné uložení H7/f7 je poměr max. a min. dosažitelné vůle 3 : 1. K tomu si musíme uvědomit, že nosnost mazací vrstvy, na níž závisí zatížitelnost ložiska, klesá se čtvercem ložiskové vůle to znamená, že ložisko při minimální vůli je možno zatížit mnohem více než stejné ložisko s maximální vůli. Při tom je jistá ložisková vůle nutná, aby se dodržela nejmenší tloušťka mazací vrstvy.

Pro volbu poměrné ložiskové vůle při pracovní teplotě se doporučují tyto hodnoty

- velký počet otáček a mírné měrné tlaky (např. pro rotační stroje, jako elektromotory, generátory, odstředivá čerpadla, transmisní a předlo-hová ložiska) 2 – 3‰ d
- velký počet otáček a vysoké měrné tlaky (např. pro hlavní a ojnicní ložiska pístových strojů, několikrát uložené hřídele) 1,5 – 2,2 ‰ d
- střední počet otáček a střední měrné tlaky (např. pro hřídele v převodovkách, vřetena obráběcích strojů) 1 – 2 ‰ d
- malý počet otáček a mírné měrné tlaky (pro uložení řídicích a posuvných ústrojí pák, čepů smýkadel apod.) 0,7 – 1,2 ‰ d
- malý počet otáček a vysoké měrné tlaky (pro pístní a křížákové čepy apod.) 0,3 – 0,6 ‰ d

3.12.2 Přívod oleje do ložiska a mazací drážky

Přívod oleje bývá v nezatížené části ložiska, nejlépe na 90° (obrázek č. 5.29a) před místem největšího zatížení (proti směru otáčení), aby se olej dostal do zatížené části co nejdříve a bez přehřátí.



Obrázek č. 5.29: Přívod oleje do radiálního ložiska

Točí-li se čep oběma směry, musí být přívod oleje volen na 180° od místa největšího zatížení (obrázek č. 5.29b). Přívod oleje do zatížené části ložiska znemožňuje tvoření klínové vrstvy a znemožňuje nebo i zcela zamezuje přítok oleje. Mazivo přivedené do ložiska se musí rozvést po celé délce ložiskové plochy pánve. U zcela krátkých ložisek postačí k tomu mírný přechod z mazacího otvoru do povrchu pánve (obrázek č. 5.29c). V ostatních případech je třeba rozvést mazivo mazací drážkou. Pokud ložisko pracuje v oblasti kapalinného tření, nesmí být mazací drážka umístěna v zatížené části ložiska ani jí nesmí procházet. Mazací drážka musí končit asi 5 – 15 mm ($h + 0,05 d$) od okrajů pánve, aby olej po stranách příliš neutíkal. Hloubky mazacích drážek viz níže:

Průměr hřídele d [mm]	Hloubka mazací drážky h [mm]	
	pro olej	pro tuk
do 70	1,5	2
70 – 100	2	2,5
100 – 130	2,5	3
130 – 170	3	3,5
170 – 200	3,5	4
200 – 250	4	4,5
nad 250	4	5

3.12.3 Mazání

Dokonalé mazání je předpokladem pro uchování kluzných ploch. V podstatě znamená přivádění vhodného maziva v dostatečném množství na mazaná místa. Dokonalé mazání strojů musí však kromě ochrany strojních součástí splnit i požadavek, aby i potřeba maziva i obsluha strojů byly hospodárné. Z těchto tří hledisek, která se uplatňují u všech provozních podmínek ve stroji i u stroje, musíme řešit způsob jeho mazání.

3.12.4 Opotřebení kluzných ložisek

U nových strojních zařízení se stále důrazněji uplatňuje co nejlepší využití technickým materiálů, tj. dosažení co nejvyšších specifických výkonů, minimálních rozměrů a váhy, tedy zvyšování rychlostí, zatížení, provozní teploty hlavních součástí těchto strojů. Mezi nejdůležitější součásti vždy patří ložiska resp. kluzná uložení. Má-li kluzné uložení, které je velmi silně namáháno, spolehlivě plnit svou funkci, musí být jeho konstrukce, výroba i montáž správná, pečlivě provedená. Nastane-li porucha kluzného ložiska, bývá to zpravidla tato hlavní příčina:

- nevhodné konstrukční řešení,
- výrobní vady,
- montážní vady,
- mimořádné provozní podmínky.

Při výpočtu a konstrukčním řešení se předpokládají určité provozní podmínky (velikost, směr a průběh zatížení, kluzná rychlost, provozní teplota atd.). Neshodují-li se skutečné podmínky s předpokládanými, což se poměrně často stává, může nastat porucha ložiska. Příčinami poruch mohou být: nevhodná výpočtová metoda, nevhodný geometrický tvar kluzných ploch (poměr l/D , ložisková vůle, tvar a poloha mazacích drážek, nevhodný ložiskový materiál, nevhodné mazivo, popř. i mazací zřízení). U ložisek dynamicky namáhaných, není často uvažována tuhost nebo případná deformace ložiskového tělesa.

Výrobní vady mohou být jednak ve vlastním ložiskovém materiálu (jeho struktuře, nedostatečné přilnavosti výstelky atd.), jednak při vlastním obrábění, tj. nedodržení makrogeometrického i mikrogeometrického tvaru kluzných ploch. Výrobním vadám lze zabránit přesným dodržením správné výrobní technologie a pečlivou kontrolou.

Nesprávná montáž (nadměrné nebo i nedostatečné utažení ložiskových vík, nečistoty v kluzných nebo dosedacích plochách, popř. v olejovém potrubí atd.) může být příčinou poruch i velmi dokonalé řešených a vyrobených kluzných uložení. Příliš utažená víka zdeformují kluzné plochy ložiskových pánví, málo utažená víka umožňují pootočení pánví, popř. jejich nežádoucí posuv. Nečistoty na vnějším povrchu pánví způsobují rovněž deformace kluzných ploch. Nečistoty v kluzných plochách působí abrazivně, zvětšují drsnost ploch a ložiskovou vůli a bývají příčinou zadření ložiska. Poruchám zaviněných provozními vadami je možno zabránit odbornou a pečlivou montáží.

Nejobtížnější je zabránit poruchám ložisek zaviněným mimořádnými provozními podmínkami, např. náhlým mechanickým nebo tepelným přetížením, chvěním a vibrací a poruchou mazacího zařízení. Mimořádné podmínky mohou též vzniknout neodbornou obsluhou nebo údržbou (zanedbané doplňování a výměny oleje, kontrola a výměna filtru atd.), odstranění těchto příčin však nemá být problémem.

Uvedené čtyři hlavní příčiny poruch se mohou projevit velmi rychle, tj. jako havárie, nebo působí delší dobu a projeví se jako opotřebení ložiska. Podle toho, jakým způsobem se opotřebily kluzné plochy ložiska, můžeme rozlišovat pět druhů opotřebení: adhezivní, abrazivní, erozivní, únavové a kavitační. Děje, které probíhají při jednotlivých druzích opotřebení (resp. třecí procesy, jejichž následkem je opotřebení) jsou velmi složité.

3.12.5 Vibrační opotřebení

Tento druh opotřebení vzniká tehdy, když stýkající se povrchy vůči sobě oscilují v tangenciálním směru při malých amplitudách, přičemž na ně působí určité normálové zatížení. Vznikající částice se z místa styku těžko odstraňují.

Uvedené hlavní druhy opotřebení kluzných ložisek se v mnoha případech vzájemně kombinují. Počáteční opotřebení je např. adhezivní a volné částice, které se při něm vytvoří vinou nedostatečné filtrace oleje, způsobí abrazivní opotřebení. Časté bývá opotřebení únavové a abrazivní nebo únavové a kavitační.

3.12.6 Životnost ložiska

Životnost ložiska závisí na jeho konstrukci, jakosti výroby, montáži a také na vlastních provozních podmínkách a údržbě. Za kritéria životnosti ložiska můžeme považovat buď stupeň opotřebení, nebo deformace povrchu kluzných ploch, které způsobí, že funkce ložiska se stane neuspokojiví.

Kluzná ložiska s kapalinným třením mají teoreticky neomezenou životnost, neboť mazací vrstva vzájemně odděluje kluzné plochy ložiska a čepu, nenastává proto jejich přímý dotyk, takže se neopotřebují. Tento ideální stav narušuje pouze provoz ložiska v oblasti mezného mazání, tj. u hydro-dynamicky mazaného ložiska při rozběhu nebo doběhu. V mnoha případech však není účelné, aby životnost ložiska byla podstatně delší než životnost celého strojního zařízení nebo jeho nejdůležitějších částí.

V takových případech rozhoduje další důležitý faktor, to je cena ložiska, popřípadě cena jeho opravy (renovace). Jestliže se zřetelem k životnosti i třecí ztrátě vyhoví ložisko kluzné, ložisko pracující v oblasti mezného mazání (s jednoduchým mazacím zařízením nebo i samomazné ložisko) je výhodnější než ložisko valivé.

3.12.7 Faktory ovlivňující životnost kluzného ložiska za provozu

- režim provozu
- provozní teplota
- přesnost montáže
- způsob mazání, volba oleje
- obsluha a údržba

Režim provozu soustrojí může být různý. Provoz stroje od několika minut, hodin a celých dní. Provozní teplota ložiska je důležitá především pro správnou volbu mazacího oleje, zdali je velmi nízká nebo velmi vysoká. U kluzných ložisek, pracujících v oblasti kapalinného tření, musí se mazivo v mazací soustavě předeheřt, není-li to možné je nutno při studeném rozběhu polít přes kontrolní otvory na ložisku přiměřeným množstvím předeheřtého oleje mazanou hřídel, má-li být jejich rozběh bezpečný. Nejvyšší přípustná teplota je u kluzných ložisek i valivých dána nejvyšší trvale přípustnou teplotou použitého maziva. U některých speciálních minerálních olejů je nejvyšší přípustná teplota až 250°C. Zejména u ložisek s kluznými plochami tvořenými kompozicí (cínová, olověná), nesmí teplota

přesáhnout 85°C to má za příčinu zmenšení únosnosti ložiska následkem zmenšující se tvrdosti kluzných ploch.

Přesnost montáže a odbornost s jakou provedeme opravu nebo kontrolu ložiska se řídí příslovím "dvakrát měř jednou řež". Dopustíme-li se nějaké chyby při montáži může se stát, že při spuštění stroje do zkušebního provozu dojde k havárii. Tím vzniknou nemalé náklady na odstranění škod způsobených nedokonalou montáží.

Dovolená nesouosost je u obou druhů ložisek téměř stejná, pouze u méně náročných uložení je přípustná nesouosost větší u kluzných ložisek. U kluzných ložisek lze pouzdra nebo pánve uložit v kulových, nastavitelných polohách. Tolerance nesouososti je dána v některých případech různými příčinami, např. pro nerovnoměrný ohřev nebo přestup tepla, průhyb hřídele při změnách pracovního režimu (zatížení a otáček). Konstruktor by se však měl snažit vhodným konstrukčním řešením umožnit co nejpřesnější výrobu i montáž.

Obsluha a údržba je nedílnou součástí každého strojního zařízení. Údržba u kluzných ložisek, které jsou mazány pomocí volných mazacích kroužků je zpravidla jen vizuální kontrolní činnost stavů množství olejové lázně a zdali volné mazací kroužky plní bezvadně svou činnost.

4 Elektromagnetický původ vibrací rotujících strojů a asynchronních elektromotorů

Jedním z nejdůležitějších zdrojů energie je elektrický proud, který je měněn elektrickými motory na energii pohybovou. Nejvíce používanými elektro-motory jsou asynchronní elektromotory. Provoz elektrických motorů je

doprovázen různými nežádoucími parazitními jevy. Mezi ně patří především vibrace a hluk, které jsou vedle znečišťování ovzduší a vod jedním z hlavních faktorů ohrožujících životní prostředí.

Hluk elektrických strojů je tedy charakterizován jako soubor nežádoucích zvuků, vyvolaných rychlými změnami tlaku vzduchu. Příčiny těchto změn mohou být v podstatě dvě:

- vibrace části stroje, nebo celého stroje,
- aerodynamické jevy vedoucí k tlakovým pulsacím prostředí a rezonančním jevům (tzv. ventilační hluk).

Vzhledem k tomu, že první příčina může být způsobena dvěma odlišnými jevy, rozeznáváme tři základní složky hluku elektrických strojů:

- hluk elektromagnetického původu,
- hluk mechanického původu,
- hluk ventilačního původu.

Celkový hluk elektrického stroje je tvořen celkovým účinkem všech tři uvedených základních složek.

4.1 Hluk elektromagnetického původu

Hluk elektromagnetického původu je nejtypičtější složkou hluku elektrického rotujícího stroje. Jeho příčinou jsou vibrace kostry, popř. jiných částí stroje, způsobené elektromagnetickými silami. Další příčinou tzv. elektromagnetického hluku je magnetostrikce magnetického obvodu. Frekvenční spektrum hluku je elektromagnetického původu je diskrétního charakteru. Zároveň se v mnohých případech vyskytuje i značně výrazná směrová charakteristika této složky. Tu pak v celkovém hluku stroje zjišťujeme často tak, že po vypnutí stroje ze sítě sledujeme pokles hluku v čase. Je-li tento pokles velmi rychlý, jde zcela evidentně o složku hluku elektromagnetického původu. Jiný způsob vyšetřování elektromagnetického hluku je měření frekvenčního spektra pro různé hodnoty napájecího napětí, popř. i kmitočtu. Snížení složky elektromagnetického hluku je především otázkou vhodného elektrického návrhu stroje. To znamená např. optimálního poměru počtu statorových a rotorových drážek v některých případech natočení drážek rotoru, popř. zesílení konstrukce v místech zvýšeného namáhání elektromagnetickými silami.

4.2 Hluk mechanického původu

Hluk mechanického původu je způsoben především valivými ložisky a dále nevyvážením všech rotujících částí stroje. Valivá ložiska mohou vytvářet řadu frekvenčních složek, které mají svůj původ především v nerovnosti valivých částí, i samotných drah na kroužcích ložiska viz předchozí kapitola. V zásadě lze říci, že hluk mechanického původu má smíšený charakter. Jde o hluk způsobený nevyvážením tak hluk valivých ložisek, který se šíří konstrukcí velmi dobře a proto je při instalaci stroje nutné velmi účinné oddělení stavební konstrukce od samotného stroje pružnými spoji. Snížení hluku mechanického původu se rovněž provádí pečlivým dynamickým vyvážením při výrobě, zejména u strojů s vysokými otáčkami je tato podmínka nezbytná. Také dodržení výrobních tolerancí a technologických postupů zvláště při výrobě malých strojů, je nejlepší cestou ke snižování hluku mechanického původu.

Tabulka č. 6.1: Elektromagnetický hluk

Charakter vyzářovaného spektra	Zdroj hluku	Způsob ověření	Možnosti snížení
Diskrétní charakter frekvenčního spektra	Indukované silové elektromagnetické vlny ve vzduchové mezeře stroje působí mechanické deformace paketu statoru (popř. jiných částí stroje).	Výrazné změny intenzity zvuku se změnou sycení stroje.	Úprava elektromagnetického návrhu stroje. Zesílení kmitajících konstrukčních částí stroje.
	Kritické vlny v elektromagn. poli (možnost nastavení rezonance), kývavý moment.	Pečlivé sledování časového průběhu diskretních složek frekvenčního spektra.	Změna vinutí. Ověření geometrie vzduchové mezery stroje.

Tabulka 6.2: Mechanický hluk

Charakter vyzářovaného spektra	Zdroj hluku	Způsob ověření	Možnosti snížení
Diskrétní charakter spektra, výrazná frekvence rovna otáčivé rychlosti.	Nevyvážené rotující části.	Amplituda vibrace na povrchu stroje se zvyšuje s otáčivou rychlostí nezávisle	Zlepšit vyvážení stroje.

		na el. zatížení.	
	Ložisko stroje.	Frekvence se mění se změnou otáčivé rychlosti.	Úprava axiálního posuvu hřídele. Redukce hřídelových a ložiskových tolerancí. Výměna plastického maziva v ložisku.
Smišený charakter frekvenčního spektra, nereprodukovatelné změny ve frekvenci a amplitudě.	Vadná montáž	Vibrace se výrazně redukuje při dotažení částí stroje; velké rozdíly mezi jednotlivými kusy strojů stejného typu.	Průběžná kontrola přesnosti montáže.
	Deformující montáž	Vibrace i hluk se výrazně sníží po demontáži a opětném složení jednotlivých dílů.	Důsledná kontrola tolerancí jednotlivých dílů stroje.
Amplituda vibrací vykazuje maximum těsně pod nebo nad maximem rychlosti otáčení.	Rezonance	Výrazné snížení amplitudy vibrací pro vyšší rychlost otáčení, než je frekvence rezonanční.	Zvýšení tuhosti nebo zesílení konstrukce. Změna hmotnosti celku nebo jeho částí.
Spektrum s výraznou frekvenci rovnou otáčkové frekvenci.	Dření částí stroje	Nevýrazná odezva na nové vyvažovací operace.	Odstranit spojení, které je příčinou dření ve stroji.
Změna v amplitudě vibrací stroje při přechodu od studeného k teplému motoru.	Tepelné nevyvážení.	Změna velikosti vibrací stroje se změnou teploty.	Korigovat příčiny nesymetrie teplotních gradientů ve stroji.

4.3 Elektromagnetický hluk asynchronních strojů

4.3.1 Vliv stupňových harmonických na radiální síly

Uvažujme asynchronní stroj s ideální stálou vzduchovou mezerou o konstantní magnetické vodivosti $\Lambda(\alpha, t) = \Delta_0$. Řád ξ harmonické magnetomotorického napětí F_ξ určuje řád libovolné interferenční harmonické magnetomotorického napětí statoru a rotoru lze rovnici pro radiální tlak napsat ve tvaru

$$p_r = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0} \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{\mu=0}^{\infty} F_v F_\mu \cos[(v - \mu)\alpha \pm (\omega_v \pm \omega_\mu) - \varphi_\mu], \quad (6.58)$$

kde

v a μ	jsou řády libovolných harmonických magnetomotorických napětí statoru a rotoru
φ_μ	fázový posun mezi fázory vyšších harmonických statoru a rotoru stejného řádu
ω	úhlový kmitočet
μ_0	permeabilita vakua
Λ_0	vodivost vakua
α	obvodový úhel
F_v	magnetomotorické napětí harmonické statoru
F_μ	magnetomotorické napětí harmonické rotoru

Kritériem pro vznik radiální síly, schopné rozechvět stator, je vznik síly nízkého řádu, což je splněno, platí-li v rovnici (6.58)

$$v - \mu = r, \quad (6.59)$$

$$r = 0, 1, 2, \dots$$

Mezi statorem a rotorem mohou tedy vznikat radiální časově proměnné síly, které mají různý počet prostorových vln – sil různého řádu. Prostorové vlny mají obecný tvar:

$$p_r = A_r \cos(r\alpha - \Omega t) \quad (6.60)$$

$r = 0, 1, 2$, libovolné číslo

A_r amplituda působící síly

Ω_r úhlový kmitočet síly řádu r

Tyto síly obíhají po obvodu stroje úhlovou rychlostí Ω_r/r . V libovolném místě obvodu je kmitočet časových změn tahu roven $f_r = \Omega_r/2\pi$. Je-li počet pólových dvojic u těchto vln malý, mohou působící síly rozechvět stator. Je-li počet prostorových vln vyšší, působí síly na příliš krátkém ramenu a nebezpečné rezonanční vibrace nenastávají anebo jsou velmi malé. Největší deformace statorového prstence vznikne tehdy, leží – li kmitočet f_r v blízkosti vlastního mechanického kmitočtu statoru. Pro vibrace jsou důležité případy, kdy počet deformačních vln po obvodu stroje $r = 0; 1; 2; 6; 4$.

Případ kdy $r = 0$.

Příslušná složka síly má tvar

$$p_0 = A_0 \cos \Omega_0, \quad (6.61)$$

kteřá je po obvodu rovnoměrně rozložená a v čase se periodicky mění, čímž způsobuje ve všech směrech konfázní radiální kmitání statorového prstence.

Složka p_0 vznikne tehdy, jestliže se skládají dvě harmonické složky magnetomotorického napětí, které mají stejný počet pólových dvojic ξ , avšak různý úhlový kmitočet ω_ξ , tj. při interferenci dvou vln stejné vlnové délky, ale různé rychlosti.

Případ kdy $r = 1$.

Příslušná složky síly má tvar

$$p_1 = A_1 \cos(\alpha - \Omega_1 t), \quad (6.62)$$

kteřá představuje jednostranný tah, který obíhá úhlovou rychlostí Ω_1 a při rezonanci s vlastním kmitočtem stroje vyvolá silné vibrace. Tento negativní jev byl mnohokrát autorem naměřen při přejímkách nových elektromotorů a taktéž při provozním diagnostickém měření u dvoupólových synchron-ních elektromotorů všech výkonů a napětí. Motory s takovou vadou jsou neupotřebitelné. Jsou to zmetkové výrobky a nelze je do provozu nasadit. Poruchu lze identifikovat tak, že při spojení s hnáným mechanismem jsou velké vibrace na první harmonické, což svědčí o nevyvážení soustavy. Systém je nevyvažitelný. Při rozpojení spojky a zapnutí elektromotoru naprázdno závada se projevuje ve vibračním spektru na 100 Hz.

Tato složka vznikne, jestliže interferují dvě harmonické indukce, u nichž se počet pólových dvojic liší o jednu. Příklad kdy $r = 2; 6; 4$. V těchto případech způsobují radiální síly průhyby statorového prstence. Jde o složky:

$$p_r' = P_\xi \cos(\zeta\alpha - \omega_\zeta + \varphi_\zeta) \quad (6.63)$$

$$p_r'' = P_{\zeta\xi} \cos\left[(\zeta - \xi)\alpha - (\omega_\zeta - \omega_\xi)t + (\varphi_\zeta - \varphi_\xi)\right] \quad (6.64)$$

Podle rovnic (6.63) a (6.64) vznikají síly nízkých řádů tj. síly s malým počtem prostorových vln tehdy, platí – li v prvním případě rovnice (6.63).

$$|\zeta| = r \quad (6.65)$$

a v druhém případě rovnice (6.64)

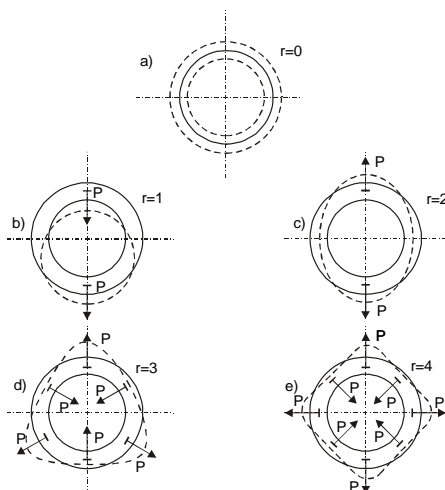
$$|\zeta - \xi| = r, \quad (6.66)$$

r je malé celé číslo včetně nuly.

Nemají-li být stroje nadměrně hlučné, je nutné, aby se pokud možno nevyvinuly harmonické jejich řád vyhovuje rovnicím (6.65) a (6.66).

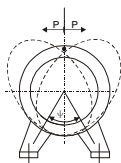
Pro ilustraci je na obr. 6.24 naznačeno prostorové rozložení sil způsobujících kmity řadu $r = 0$ až $r = 4$. Jako zvláštní případ je na obrázku č. 6.24 a znázorněno tzv. dýchání stroje působením sil nultého řádu podle rovnice (6.61), pro které platí podmínka (6.65). Tento případ je analogický případu válcové nádoby s časově proměnlivým vnitřním přetlakem. V obrázku 6.24 b až e jsou čárkovanou čarou naznačeny deformace statoru vlivem působení radiálních sil.

Běžně provedený elektrický stroj je uchycen k základu pomocí patek. Je-li uchycen k základu a konstrukční provedení patek dostatečně tuhé, je nutné stator uvažovat jako prstenec pevně vetknutý v bodech připojení patek na jhu. Stator pak může kmitat takovým způsobem, při němž v bodech připojení patek vznikají uzly. Kmitání tohoto druhu je ilustrováno na obrázku č. 6.25. Je však třeba poznamenat, že kmitání stroje může do značné míry ovlivnit způsob připevnění patek ke kostře a jejich uchycení na základ, resp. rám.



Obrázek č. 6.24: Deformace statoru vlivem prostorového rozložení deformačních sil, způsobujících kmitů řádu $r = 0$ až $r = 4$

Z uvedeného rozboru vyplývá, že elektromagnetickými příčinami hluku jsou časově proměnné radiální síly, způsobené interferencí pracovní a vyšších harmonických magnetické indukce ve vzduchové mezeře a tudíž vyššími harmonickými magnetomotorickými napětí a vodivostí vzduchové mezery.



Obrázek 6.25.: Kmitání statoru uchyceného na patkách

Nejvýznamnější harmonické magnetomotorických napětí jsou pro třífázová vinutí tzv. stupňové harmonické řádu $v = Q_1 \pm p\alpha\mu = Q_2 \pm p$.

Po úpravě tato kritéria: u bezhlučných strojů nemá být

$$|Q_1 - Q_2| = 0, 1, 2, \dots \quad (6.67)$$

$$|Q_1 - Q_2| = 2p, 2p \pm 1, 2p \pm 2, \dots \quad (6.68)$$

V daném místě α pulsuje pole každé statorové stupňové harmonické kruhovou frekvencí

$$\omega_v = \omega = 2\pi f \quad (6.69)$$

kde f je kmitočet sítě. Kruhová frekvence polí rotorových stupňových harmonických

$$\omega_\mu = \omega \pm k Q_2 \omega_R = 2\pi f \left[1 \pm k \frac{Q_2}{p} (1-s) \right], \quad (6.70)$$

kde p je počet pólových dvojic stroje, s je skluz, $k = 1, 2, 6 \dots$ a ω_R je úhlová rychlost rotoru.

Kruhová frekvenci $\omega_\xi = (\omega_v \pm \omega_\mu)$ kmitání radiální síly v daném místě α nebo její kmitočet $f_c = \omega_\xi / 2\pi$.

Po úpravě dostaneme

$$f_c = f k \frac{Q_2}{p} (1-s) \quad (6.71)$$

nebo

$$f_c = f \left[k \frac{Q_2}{p} (1-s) \pm 2 \right] \quad (6.72)$$

Rovnice (6.71) a (6.72) udávají kmitočty radiálních sil vyvolaných stupňovými harmonickými, z nichž stator mohou rozechvět pouze síly nízkého řádu, tj. při splnění podmínek (6.67) a (6.68) pro $k = 1$. Kmitočty těchto sil jsou lineární funkcí skluзу a mohou se při určité rychlosti rotoru shodovat s kmitočty harmonických vlastních kmitů statoru. V těchto případech jsou amplitudy kmitů a intenzita hluku podstatně zesíleny rezonancí, což se projevuje hlavně při rozběhu.

Pro úplnost ještě o vlivu pracovní harmonické řádu p na hluk stroje. Působením této nejsilnější harmonické magnetomotorického napětí vzniká při rovnoměrné vzduchové mezeře pro $v = \mu = p$ síla

$$p_p = F_p^2 \frac{A_0^2}{2\mu_0} \cos 2(p\alpha + \omega t). \quad (6.76)$$

Lze dokázat, že tato síla s dvojnásobným síťovým kruhovým kmitočtem může způsobit deformace statorového jha vlastně jen u velkých dvou-pólových asynchronních strojů.

4.3.2 Vliv drážkování statoru a rotoru

Drážkové harmonické statoru a rotoru mají stejný počet pólů a stejnou rychlost jako příslušné stupňové harmonické, takže drážkové harmonické nepřinášejí nová kritéria pro vznik hluku.

V průběhu magnetického tlaku vzniknou dvě harmonické stejného řádu $\xi = \zeta$, avšak různého kmitočtu, je-li řád některé harmonické složky magnetomotorického napětí ξ stejný jako řád některé složky magnetické vodivosti ζ (přičemž $\omega_\xi \neq \omega_\zeta$). Interferenci těchto dvou harmonických se vytvoří složka tlaku s počtem vln $r = 0$, stejnoměrně rozdělená po obvodu vrtání, avšak časově kmitající, což má za následek silný hluk. Vznikají tlaky nultého řádu.

Nemá-li tedy vznikat hluk, nesmí se řád nejsilnějších složek magnetomotorického napětí statoru a rotoru shodovat s řádem některé silně vyvinuté harmonické složky vodivosti vzduchové mezery.

Z harmonických složek magnetomotorického napětí jsou nejsilnější složky řádu $Q_1 \pm p, Q_2 \pm p$.

Hluk tedy vzniká, platí-li

$$Q_1 \pm p = Q_2, \quad (6.74)$$

$$Q_2 \pm p = Q_1 \quad (6.75)$$

neboli

$$|Q_1 - Q_2| = p. \quad (6.76)$$

Tím je dáno další kritérium pro návrh bezhlučných strojů.

Působí-li drážkování rotoru na stupňovou harmonickou statoru nebo naopak, vznikají tzv. diferenční pole. Časový a prostorový průběh síly způsobené touto diferenční harmonickou dostaneme pomocí rovnice

$$p_r = \frac{\mu_0}{4} H_{\Delta}^2 \{1 - \cos 2[(\omega \mp Q_2 \omega_R)t + (Q_2 - Q_1 \mp p)a]\} \quad (6.77)$$

H_{Δ} je amplitudu výsledného diferenčního pole. Nejnebezpečnější je síla nízkého řádu, platí-li

$$|Q_2 - Q_1 \mp p| = 1, \text{ neboli} \quad (6.78)$$

$$|Q_1 - Q_2| = p \pm 1. \quad (6.79)$$

Síly s malým počtem prostorových vln působící hluk vzniknou, je-li

$$|Q_1 - Q_2| = p, p \pm 1, p \pm 2, \dots \quad (6.79)$$

Přitom vznikají kmity nultého, druhého, čtvrtého, atd. řádu. Kmitočet síly v daném místě pod úhlem α určíme z rovnice (6.77) jako

$$f_c = 2f \left[\frac{Q_2}{p} (1-s) \pm 1 \right]. \quad (6.80)$$

4.3.3 Vliv deformace vzduchové mezery

Jak vyplývá názorně z obr. 6.24, dochází účinkem radiálních sil k periodické deformaci jha statoru, což způsobuje odpovídající deformaci vzduchové mezery. Tato deformace může u asynchronních motorů nabýt neza-nedbatelných hodnot vzhledem k minimální vzduchové mezeře, konstruované u těchto strojů pro dosažení dobrého účinku. Nejvýznamnějšími a zcela nezanedbatelnými silami působícími mezi statorem a rotorem jsou radiální síly vybuzené pracovní harmonickou magnetického pole ve vzduchové mezeře řádu p . Síly mohou vyvolat deformaci vzduchové mezery, kterou lze respektovat v průběhu magnetické vodivosti vzduchové mezery přidavným členem obsahujícím harmonickou $2p$. Při oboustranném drážkování vzniknou v průběhu vodivosti vzduchové mezery harmonické řádu

$$q = Q_1 \pm 2p \quad \text{a} \quad \sigma = Q_2 \pm 2p.$$

Při interferenci těchto harmonických magnetické vodivosti vzduchové mezery se stupňovými harmonickými magnetomotorického napětí řádu

$$v = Q_1 \pm p \quad \text{a} \quad \mu = Q_2 \pm p$$

vznikají radiální síly nízkého řádu, platí-li $\zeta - \mu = r$ nebo $v - \sigma = r$, z čehož lze odvodit další kritérium, tj. že se pro omezení hluku nemá volit

$$|Q_1 - Q_2| = 3p, 3p \pm 1, 3p \pm 2 \dots \quad (6.81)$$

Toto kritérium je důležité zvláště pro větší dvoupólové stroje s tenkým statorovým jhem a zvláště pro omezení hluku při rozběhu.

Vzniká-li ve stroji unipolární tok (např. vlivem excentricity), je magnetomotorické napětí, odpovídající tomuto toku, rozloženo rovnoměrně po obvodě a platí $v = \mu = 0$, nebo) je $\zeta = 0$. Pak vznikají harmonické radiálních sil nízkého řádu pouze interferencí harmonických magnetické vodivosti $\rho - \sigma = r$. Z toho pro nejvýraznější harmonické nultého řádu vyplývá další kritérium

$$|Q_1 - Q_2| = 4p, \quad (6.82)$$

které je důležité hlavně pro větší dvoupólové stroje.

4.3.4 Vliv neharmonického napájení

V moderní praxi elektrických pohonů se čím dále tím více rozšiřuje napájení asynchronních motorů z polovodičových střídačů, které představují zdroj hospodárně regulovaného napětí o proměnlivém kmitočtu. V zásadě lze o střídačích hovořit jako o zdrojích napětí nebo o zdrojích proudu, v každém případě však představuje polovodičový střídač zdroj neharmonického napětí, jehož průběh se obvykle značně liší od sinusovky a obsahuje velký počet vyšších harmonických.

Z hlediska asynchronního stroje jde o neharmonické napájení, které se projeví v průběhu magnetomotorických napětí zvýšeným obsahem tzv. časových harmonických. Budeme-li v dalším uvažovat pouze nejvýraznější prostorovou pracovní harmonickou řádu p , pak při obecně neharmonickém napájení můžeme napsat pro průběh magnetomotorických napětí a rotoru vztahy

$$F_S(a, t) = \sum_{c=1}^{\infty} F_{Sc} \cos(pa \pm c\omega t) \quad (6.86)$$

a

$$F_R(a, t) = \sum_{c=1}^{\infty} F_{Rc} \cos(pa \pm c\omega_R t + \varphi_c), \quad (6.84)$$

c je příslušný řád časové harmonické. U osově symetrického průběhu napájecího napětí může řád c být pouze liché číslo a vzhledem k vlastnostem třífázového vinutí v tomto případě platí

$$c = (6k \pm 1) \quad (6.85)$$

$k = 0, 1, 2, 6 \dots$ je libovolné celé číslo včetně nuly a znaménko $+$ a $-$ určuje směr postupu pole v rovnicích (6.86) a (6.84).

Pro rozbor radiálních budeme uvažovat, že výrazy pro kmitočty ω_s a ω_r nahradíme výrazy $c\omega$, kde řád časové harmonické c je určen rovnicí (6.85).

Pro sledovaný účinek vlivu neharmonického napájení na hluk stroje není nutné uvažovat vliv harmonických vzduchové mezery, které jsou ve své podstatě převážně prostorové. Radiální síly působící mezi statorem a rotorem budou určeny v tomto případě pouze interferenčními harmonickými magnetomotorických napětí.

Uvažujme interferenci nejvýznamnější pracovní harmonické řádu p s libovolnou časovou harmonickou napájecího proudu. Pracovní harmonická řádu p vytváří podle rovnice (6.86) statorové magnetomotorické napětí o p vlnách kolem obvodu vzduchové mezery, které kmitá časově s úhlovou rychlostí $\omega = 2\pi n$ tj. harmonickou řádu $c_p = 1$ pro kterou platí podle rovnice (6.84) $k = 0$. Libovolná vyšší časová harmonická vytváří rovněž p vln prostorové rozložených ve vzduchové mezeře, které kmitají časově s úhlovou rychlostí $\omega_k = c\omega$. Při interferenci těchto dvou harmonických vznikají mezi statorem a rotorem radiální síly, jejichž prostorové rozložení výsledné rozdílové interferenční harmonické je

$$(p - p)\alpha = 0 \quad (6.86)$$

takže působí ve všech směrech konstantním tlakem a způsobují kmity nultého řádu (dýchání strojů), které jsou pro vznik hluku velmi nebezpečné.

Výsledný kmitočet těchto sil je určen rozdílem úhlových rychlostí uvažovaných harmonických magnetomotorických napětí

$$\omega_v = \omega_\xi = [(6k + 1)\omega - \omega] = 6k\omega \quad (6.87)$$

Při napájení třífázového asynchronního motoru neharmonickým napětím o základním pracovním kmitočtu f tedy vzniknou budící síly o kmitočtech

$$f_v = 6kf \quad (6.88)$$

k je libovolné celé číslo.

Je-li základní napájecí kmitočet např. $f = 50$ Hz, vznikají radiální síly o kmitočtech $f_v = 300, 600, 900$ Hz.

Velikost výsledných radiálních sil závisí ovšem na skladbě vyšších časových harmonických napájecího napětí hlavně na obsahu 5., 7., nebo 11., 16. harmonické, které jsou u běžných šestipulsních a dvanáctipulsních střídačů vždy nejvýznamnější.

5 Princip asynchronního elektromotoru

Asynchronní stroje jsou nejpoužívanější a zároveň nejjednodušší a nejlevnější točivé elektrické stroje a vyrábějí se, v malých a středních výkonech, ve velkých sériích. Asynchronní stroje se dříve nejčastěji používaly k pohonům, které nevyžadují změny rychlosti, neboť otáčivá rychlost asynchronního stroje souvisí s rychlostí točivého pole

$$n_s = f_1 / p.$$

S nástupem polovodičové výkonnostní techniky se asynchronní elektromotory používají jako součásti pohonů, u kterých se je potřebná změna otáček.

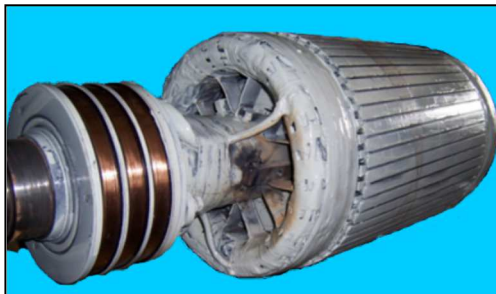
Asynchronní stroje, jsou magnetovány ze statoru připojeného k síti, proto mají nejmenší vzduchové mezery. Vyrábí se motory:

- klecové,
- které mají vinutí uzavřené do tvaru klece obrázek č. 7.1. Jejich rotory, jsou nazývány kotvy. Klecové vinutí je robustní, nevyžaduje ani komutátor, ba ani kroužky a kartáče



Obrázek č.7.1: Rotor asynchronního elektromotoru klecový – nakrátko

- s kroužkovým rotorem
- na obrázku č. 7.2. asynchronní motor, který je reprezentantem druhé-ho typu asynchronních elektromotorů s vinutým rotorem



Obrázek č.7.2: Kroužkový rotor asynchronního elektromotoru

5.1 Princip působení asynchronního motoru

Trojfázovým vinutím statoru, připojeným na trojfázovou síť, protéká trojfázový proud. Tento proud vyvolá ve vzduchové mezeře stroje točivé magnetické pole, které se otáčí synchronními otáčkami n_s . Siločáry magnetického pole protínají vodiče statorového i rotorového vinutí a indukují v nich napětí.

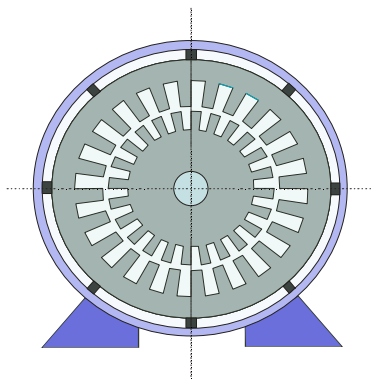
Napětí indukované ve statorovém vinutí působí proti napětí sítě, čímž omezuje statorový proud na hodnotu, pro kterou je stroj navržený. Napětí indukované v rotorovém vinutí v něm vyvolá proud. Na rotorové vinutí, jež se nachází v magnetickém poli a protéká jím proud, působí mechanická

síla, stejně jako na každý vodič v magnetickém poli. Na základě Lenzova zákona se vodiče rotoru začnou vychylovat ve směru otáčení magnetického pole, protože se svými účinky (tj. snížením rychlosti pohybu vodičů vůči poli) snaží potlačit příčinu, pro kterou se v nich indukuje napětí a následně protéká proud.

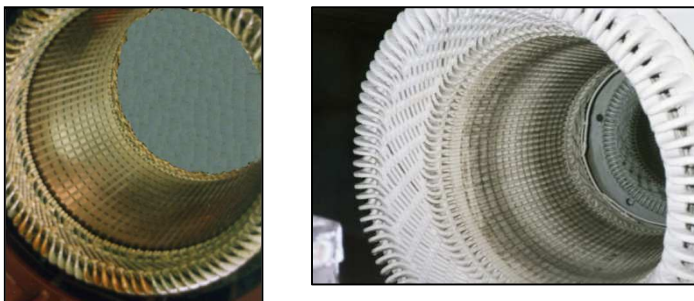
Při postupném narůstání otáček se snižuje relativní pohyb vodičů rotoru vůči točivému poli a zpomaluje se i časová změna magnetického toku vázaného těmito vodiči. Tím se snižuje indukované napětí, proud i mechanická síla na vodiče. Tak dochází k ustálení otáček rotoru na určité hodnotě pod synchronními otáčkami magnetického pole. Synchronní otáčky nemůže rotor nikdy dosáhnout, protože by při nich nebyl žádný relativní pohyb vodičů rotoru vůči točivému poli, neindukovalo by se napětí a tím nepoteče žádný proud a nevznikl by žádný točivý moment. Z tohoto důvodu se tento motor nazývá asynchronní respektive indukční, protože jeho působení je založeno na indukování napětí v rotoru.

5.2 Uspořádání asynchronních elektromotorů

Asynchronní stroj se skládá ze statoru a rotoru. Statorové plechy mají na vnitřním obvodu drážky (obrázek č. 7.3), do nichž se ukládá obvykle trojfázové vinutí (obrázek č. 7.4). Vinutí bývá obvykle dvouvrstvové se zřetelem na výhodné vlastnosti po stránce elektromagnetické. Rotory jsou buď s trojfázovým vinutím, vyvedeným ke kroužkům, z nichž lze přes kluzné kontakty vést proud ke spouštěcím odporům, nebo mají rotory kotvu nakrátko.



Obrázek č. 7.3: Schematický řez asynchronním elektromotorem



Obrázek č. 7.4: Navinuté statory asynchronních elektromotorů

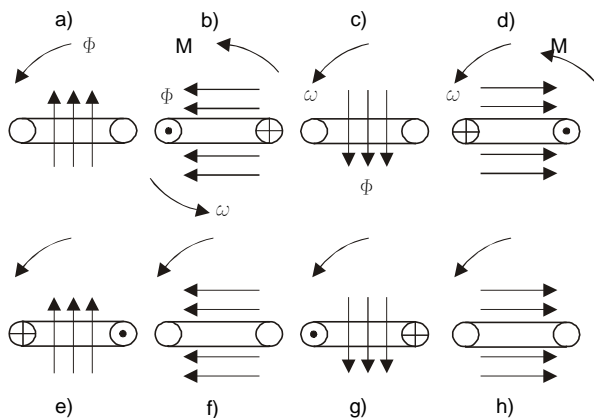
U obou druhů vinutí kotev indukuje točivé pole statoru vícefázové napětí a proudy, které mohou dávat moment spolu s točivým polem. Elektromagnetický moment M

$$M \approx \phi I_2 \cos \varphi_2 \sin \beta \quad (7.1)$$

je úměrný magnetickému toku ϕ ve vzduchové mezeře, pracovnímu proudu v rotoru I_2 , kosinu časového úhlu φ_2 mezi U_2 a I_2 a sinu prostorového úhlu β mezi osami toku ϕ a proudu I_2 . Činnost asynchronního elektromotoru a jeho základní vlastnosti si můžeme názorně vysvětlit následující úvahou: Úvaha je převzata z knihy Teorie elektrických strojů, autorů J. Bašta, J. Chládek, I. Mayer, strana 377, z roku 1968.

Mějme uzavřenou vodivou smyčku v rotujícím homogenním magnetickém poli. Smyčka je v řezu vyznačena na obr. 7.5 a, na němž je šipkami naznačen okamžitý směr pole, které se otáčí proti směru otáčení hodinových ručiček. V daném okamžiku je magnetický tok Φ , zabírající se smyčkou, maximální ($d\Phi/dt = 0$), indukované napětí je nulové a proud ve smyčce je rovněž nulový. V dalším časovém průběhu se pohybem pole při stojící smyčce zmenšuje záběr magnetického pole se smyčkou: $D\Phi/dt < 0$, ve smyčce se podle Lencova pravidla indukuje napětí takového smyslu a velikosti, že proud protékající smyčkou následkem tohoto napětí se snaží zachovat velikost původního záběru. Maximální $d\Phi/dt$ bude v poloze pole naznačené na obr. 7.5 b. Proud ve smyčce, o kterém zatím budeme předpokládat, že je omezen jen činným odporem smyčky, má polaritu

vyznačenou na obr. 7.5 b. Protože prostorový úhel $\beta = \pi/2$ a fázové posunutí $\varphi_2 = 0$ (jde o činný odpor), je v tomto okamžiku též točivý moment maximální, jak plyne z rovnice (7.1). Smysl točivého momentu je shodný se smyslem otáčen magnetického pole. Při dalším otáčení se $d\Phi/dt$ zmenšuje a s ním indukované napětí, proud i točivý moment, až v poloze podle obrázku č. 7.5 c nabudou všechny tyto veličiny nulové hodnoty. V následujících okamžicích začne nabývat $d\Phi/dt$ kladné hodnoty, vznikne napětí a proud, a to opačné polarity než dříve, a vyvrcholí v poloze podle obr. 7.5 d. Točivý moment má však stejný smysl jako dříve, jeho velikost sice pulsuje od nuly do maxima, a to dvakrát během jednoho kmitu střídavého proudu, budícího točivého magnetického pole, dává však určitý střední výsledný moment. Pulsaci točivého momentu lze potlačit uspořádáním dvou nebo více smyček rovnoměrně úhlově vzdálených. Dovolme-li smyčce otáčení vzhledem k ose kolmé k nákretně, pak se roztočí ve směru působení točivého momentu, tj.



Obrázek č.7.5: Princip působení magnetického pole

ve smyslu otáčení magnetického pole. Čím větší bude mechanická rychlost otáčení smyčky, tím menší bude relativní rychlost magnetického pole vzhledem ke smyčce, a proto se zmenší i hodnoty $d\Phi/dt$ indukovaného napětí, proudu a točivého momentu. Kdyby se smyčka dostala do synchronní rychlosti, bude vzhledem k magnetickému poli v relativním

klidu, $d\Phi/dt = 0$ a nulové budou napětí, proud i točivý moment. Jelikož smyčka musí vytvořit točivý moment na krytí mechanických ztrát, popř. u motoru i na krytí zatěžovacího momentu, je nutné, aby mechanická rychlost byla alespoň o zlomek procenta menší než synchronní rychlost. Čím bude zatěžovací moment větší, tím bude rychlost menší. Proto se právem nazývají motory pracující na tomto principu asynchronními.

Doposud jsme předpokládali, že smyčka má jen činný odpor. Ve skutečnosti má však též určitou indukčnost, jež se projeví při průchodu střídavého proudu jako reaktance. Tato skutečnost má podstatný vliv na vlastnosti smyčky. Abychom tyto vlastnosti poznali, uvažujme druhý extrémní (neskutečný) případ: smyčka má jen reaktanci, odpor nechť je nulový. Proto budou střídavé proudy, vznikající působením indukovaných napětí, ve své fázi o 90° zpožděny, takže v poloze podle obr. 7.5 e bude ve smyčce maximální proud s vyznačenou polaritou. Tento proud bude působit demagnetizačně a smyčka připomíná sekundární vinutí transformátoru v chodu nakrátko. Proud bude velký, $\phi = \pi/2$, $\beta = 0$. $M = 0$. V poloze podle obr. 7.5 f bude proud nulový, ($M = 0$) a v poloze podle obr. 7.5 g bude maximální proud s polaritou jako na obr. 7.5 b; opět působí demagnetizačně ($M = 0$). V poloze obr. 7.5 h jsou opět proud i moment nulové. Jak je patrné, ve vyznačených polohách e, f, g, h nevznikají točivé momenty; v mezipolohách sice vznikají určité momenty, ale bližším sledováním jejich směru působení bychom zjistili, že se střídají tak, že výsledný střední moment je nulový. Z této úvahy vyplývá, že asynchronní stroj s nulovým odporem by se nerozběhl a odebíral by však ze sítě velký jalový proud. Tomuto případu se blíží asynchronní motory s kotvou nakrátko, které se rozbíhají přímým připojením na síť. Při záběru se indukují v rotoru proudy o síťovém kmitočtu, takže reaktance rotoru je značně větší než jeho činný odpor. Po skončení rozběhu je kmitočet i reaktance rotoru malá, činný odpor ji převyšuje, motor má příznivou velikost proudu i točivého momentu.

U motorů s kotvou kroužkovou lze výrazně zlepšit rozběhové poměry zařazením odporu do rotorového obvodu a přiblížit chování kotvy případu smyčky, jejíž proud byl omezen jen činným odporem.

Aby se v rotoru indukovalo napětí U_2 točivým tokem ϕ

$$U_2 = 4,44 f_2 N_2 k_{v2} \phi \quad (7.2)$$

musí být rozdíl mezi rychlostí točivého pole n_s a rychlostí kotvy n . Rozdíl $n_s - n$ vyjadřujeme jeho poměrem k synchronní rychlosti n_s , tak dostaneme poměr, zvaný skluz s

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (7.2)$$

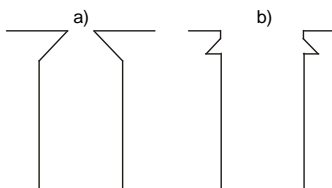
Zcela podobně jako je vyčíslen kmitočet v kotvě stejnosměrného stroje $f = n_p$ vyčíslíme jej i u kotvy asynchronního stroje

$$f_2 = (n_s - n)p = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot n_s p = s f_1 \quad (7.3)$$

Vztah (7.3) je základní pro činnost asynchronního stroje.

5.3 Vinutí indukčních strojů

Vinutí indukčních strojů odpovídá celkem statorovému vinutí synchronních strojů, neboť jak ve statoru, tak v rotoru indukčních strojů se uzavírají proudy vícefázové. Aby se magnetizační proud odebíraný ze sítě zbytečně nezvětšil, je vzduchová mezera co nejmenší a drážky polozavřené (obr. 7.6 a). Pouze u statorů na vysoké napětí bývají drážky otevřené (obr. 7.6 b), do nichž se vkládají cívky předem formované a izolované.



Obrázek 7.6: Tvary drážek : a) polozavřená drážka, b) otevřená drážka

Někdy se otevřené drážky uzavírají magnetickými klíny. Otevřené drážky vyvolávají jinak při malé vzduchové mezeře velký rozptyl magnetického toku a tím velké přídavné ztráty na povrchu rotoru i v jeho vinutí. Tak vznikají drážkové harmonické v křivce magnetického toku, proti nimž se bráníme zešíkmením drážek rotoru nebo statoru, obr. 7.7.

$$F_1 = \frac{m_1}{\pi} \sqrt{2 \frac{N_1 k_{v1}}{p}} \ddot{x}_2 \quad (7.7)$$

$$F_2 = \frac{m_2}{\pi} \sqrt{2 \frac{N_2 k_{v2}}{p}} \ddot{x}_2 \quad (7.8)$$

Z rovnosti $F_1 = F_2$ dostaneme převod proudů p_1

$$p_1 = \frac{\ddot{x}_2}{\ddot{x}_2} = \frac{m_2}{m_1} \frac{N_2 k_{v2}}{N_1 k_{v1}} \quad (7.9)$$

6 Účinnost zavedení bezdemontážní technické diagnostiky obecně

Každé hodnocení účinnosti je postaveno především na hodnocení ekonomického přínosu, resp. efektu, který musíme pojmut jako technicko-ekonomický přínos.

Efekty zavedení bezdemontážní technické diagnostiky strojů jsou ekonomicky těžko vyčíslitelné a je možno je v zásadě rozdělit do následujících skupin:

- zvýšení preventivnosti,
- zvýšení bezpečnosti (havárie, ohrožení zdraví),
- zvýšení produktivity výrob,
- zvýšení jakosti výroby a oprav strojů,
- zjišťování příčinnosti poruch.

Další specifikaci efektů zavedení, v tomto případě vibrodiagnostiky představuje tabulka č. 8.1, která je sestavena na základě zprávy pro britský průmysl.

Nejlepší výsledky použití technické diagnostiky ve výrobních provozech jsou dosahovány v odvětvích, kde je výrazné riziko havárie, vlastní výroba je finančně náročná a většina strojů a zařízení není zálohována:

- chemie a související s ní odvětví průmyslu,
- těžba uhlí, hutnictví, zpracování nafty,

- energetika, zpracování a doprava plynu a vody.

Zavedením diagnostiky dle zahraničních informací, úspory dosahují řádově 0,5 až 3 % čisté výroby podniku v závislosti na hospodářském odvětví. Tyto úspory vznikají 35 % snížením nákladů na opravy hmotných prostředků a z 65 % nárůstem produktivity výroby.

Pro potvrzení uvedených tvrzení je níže uveden konkrétní příklad úspor po zavedení technické diagnostiky v podnicích Chevron Oil – USD.

- snížení nákladů na opravy o 20 až 30 % v závislosti na druhu stroje,
- prodloužení doby mezi jednotlivými opravami ze 3 let na 7-8 let,
- snížení spotřeby elektrické energie o 1 %,
- zvýšení bezpečnosti z titulu vibrací a hluku v prostorách rafinérie.

Je samozřejmé, že tyto konkrétní výsledky v oblasti zvýšení spolehlivosti a snížení ekonomické náročnosti výroby nejsou zadarmo. Od získaných úspor (0,5 až 3 % čisté výroby) nutno odečíst 16 % na náklady diagnostického personálu a jeho vybavení přístrojovou technikou. Přesto návratnost nákladů na technickou diagnostiku je více než 500 %. Počet pracovníků diagnostického střediska závisí na potřebách provozu. K této sestavě přístrojů a personálu jsou nezbytné odborné teoretické vědomosti, jejíž ekonomická hodnota je přímo úměrná k jejich rozsahu a složitosti.

Tabulka č. 8.1: Přínosy zavedení technické diagnostiky v průmyslu

Přínos		Způsob, jímž lze docílit efektů zavedení technické diagnostiky	
		Predikce poruchy	Lepší znalost stavu strojů
Bezpečnost	Snížení počtu úrazů zapříčiněných stroji	Umožňuje bezpečné zastavení stroje před havárií	Alarm řídicího systému je dostatečným důvodem k zastavení stroje
	Snížení ohrožení zdraví pracovníků chvěním a hlukem	Umožňuje odvolání pracovníků z oblasti ohrožené havárií	Šetří zbytečné náklady na dodatečné snížení chvění a hluku

Efektivita	Zvýšená provozní spolehlivost strojů	Delší doba provozování strojů	Snížení nákladů z titulu neplánovaného zastavení provozu	Umožňuje až dvojnásobné zvětšení doby provozování mezi opravami a taktéž umožňuje provozování strojů bez plánování oprav
		Kratší doba oprav	Umožňuje zastavení provozu na dobu nutnou pro opravu konkrétního elementu na stroji. Havárie elementu nezpůsobují další poškození.	Snížení doby zjišťování stavu stroje po jeho zastavení a urychlení rozhodování o potřebných opravárenských činnostech
	Zvýšená efektivnost výroby		Umožňuje plánování efektivnosti	Umožňuje provozování strojů při zvětšeném zatížení a rychlosti. Umožňuje zjistit elementární poškození strojů anebo zvýšený odběr energie
Jakost	Lepší kvalita výrobků a služeb		Umožňuje eliminovat neplánované prostoje a tím zabezpečit plynulost dodávek pro odběratele a tím zvyšuje bonitu výrobce	Snižuje zmetkovost a taktéž snižuje služby o nižším standartu než je obvyklé

V dalším textu uvedu konkrétní příklad nasazení a zavedení technické bezdemontážní diagnostiky od důlního provozu uhelné společnosti.

6.1 Efekty zavedení technické bezdemontážní technické diagnostiky

V níže uvedeném textu bude popsán způsob ekonomického hodnocení přínosu technické diagnostiky. Ekonomické hodnocení je provedeno do roku 1989 kdy ceny, nelze porovnávat ze současností. Myslím, že když se výsledky budou násobit 10 krát bude to odpovídat současnému stavu. Tyto příklady uvádím proto, abych přesvědčil čtenáře, že se dá spočítat ekonomický přínos i na bezdemontážní technické diagnostice.

Oddělení technické diagnostiky, které jsem řídil, bylo vybaveno přístrojovou technikou pro měření vibrací, stacionární vyvažování rotorů elektrických motorů, elektrickou brzdou na kontrolu zaručovaných parametrů motorů, přístrojem pro měření kvality izolace tg δ , termografickým zařízením – termovizi, atd.

Měření vibrací strojů bylo prováděno na čtyřech důlních závodech a třech úpravárnách uhlí. Byla také prováděna měření strojů na jiných důlních podnicích a taktéž i jiných podnicích v tehdejší ČSSR. Laboratoř byla vedená jako „chozrasčotní“ - rozpočtová.

Diagnosticky byly kontrolovány tyto stroje a mechanismy: těžní stroje, hlavní důlní ventilátory, kompresory, rotační kompenzátory, degazační stanice, čerpací stanice, dálková pásová doprava, celé komplexy úpraven, důlní čerpací stanice, dobývací a razící kombajny všech typů, elektrické motory po opravách, lutnové ventilátory atd.

Přejímky investičních celků a taktéž jednotlivých nových strojů byly prováděny na základě výsledků technické diagnostiky. Při měření těchto strojů byla snímána celá spektra a byla prováděna spektrální analýza. Na základě výsledků spektrální analýzy byla přesně určena součástka nebo uzel, který způsobuje poruchu.

Vyvažování rotorů elektrických motorů bylo zavedeno, protože 75 % závad na točivých strojích tvořily právě nevyvážené rotory.

Elektrická brzda – dynamometr byla vybudována pro kontrolu elektrických motorů pro zjišťování jejich dosahovaných technických parametrů. Motory byly zatíženy na maximální výkon, prohráty a současně byly změřeny vibrace. Touto zkouškou byly eliminovány případy, kdy došlo k poruše na elektrickém motoru dobývacího kombajnu až po jeho montáži v důlních podmínkách.

6.2 Alternativní návrhy vyčíslení ekonomického přínosu technické diagnostiky při údržbě hmotného investičního majetku

Hodnocení ekonomických přínosů technické diagnostiky je na jedné straně řešitelné pomocí tradičních metod anebo běžně užívaných metod hodnocení ekonomické efektivnosti používaných pro hodnocení technického rozvoje.

Je však třeba vzít v úvahu určitou specifičnost technické diagnostiky jako činnosti, která nově nevytváří přínosy ve smyslu inovací používané techniky, ale racionálně působí na vyšší využitelnost používané techniky. Proto musí být metodicky uspořádány postupy ekonomického hodnocení technické diagnostiky a upraveny pro využití v této oblasti.

Jsou k dispozici dvě základní metody hodnocení technické diagnostiky. Při výběru a aplikaci těchto metod ekonomického hodnocení technické diagnostiky je nutné vzít v úvahu tyto skutečnosti:

- náročnost jednotlivých metod na zpracování,
- vypovídací schopnost metod pro účel ekonomického hodnocení,
- využitelnost těchto metod z hlediska dostupnosti vstupních informací.

V tomto smyslu se pro aplikaci nabízejí dvě metody o to:

- Metoda Cempel – Hudeczek,
- Metoda Sturm.

Z hlediska výše uvedeného byla vybrána Metoda Cempel - Hudeczek a tak-též aplikována. Tato metoda logicky řadí přínosy, aby je na závěr integrovala a po jejich snížení o náklady na vlastní technickou diagnostiku vyčíslila celkový ekonomický efekt v peněžním vyjádření.

Poznámka:

Zde je nutno poznamenat, že hodnocení bylo prováděno v uplynulém společensko-ekonomickém seskupení a byl hodnocen pouze přínos zavedení technické diagnostiky, tzn., že nebylo hodnoceno zvýšení účinnosti údržby.

Příklad číselného ekonomické zhodnocení bezdemontážní diagnostiky

Pro číselně ekonomické zhodnocení bezdemontážní diagnostiky byla s ohledem na možnosti praktického využití aplikována metoda Cempel-Hudeczek.

Celkový přínos technické diagnostiky za jeden rok po odečtení nákladů činil 5 122 387 Kčs. V tomtéž roce podnik, kde byla diagnostika zavedena vyráběl zboží v hodnotě 3 300 000 tis. Kč.

Při souhrnných celkových úsporách technické diagnostiky 6 659 654,- Kčs ve sledovaném roce procento úspor je 0,2 z celkové částky prodeje zboží. Při tomto hodnocení byly vždy úspory technické diagnostiky brány jako minimální a náklady na ní jako maximální. Výsledek přínosu je srovnatelný s údaji uváděnými v zahraniční literatuře hodnocení přínosu technické diagnostiky.

Jednoznačně bylo prokázáno, že bezdemontážní technická diagnostika je fundamentálním kamenem kontroly strojů a údržby prováděné na základě skutečného stavu stroje, celého výrobního procesu.

7 Bezdemontážní technická diagnostika elektromotoru

Zvláštní pozornost je nutné věnovat elektromotoru, který je nejdůležitějším článkem při pohánění strojů všeho druhu. Ve většině případů má elektrický motor největší otáčky z celého soustrojí a taktéž se na něm odráží celá dynamika poháněného stroje. Z těchto důvodů je nutné věnovat maximální pozornost elektrickým motorům již v době konstrukce, projekce, zkoušek prototypu, výroby a v neposlední řadě po celou dobu jeho provozování a po provedené opravě. Jednou z objektivních metod sledování těchto strojů je bezdemontážní technická diagnostika.

Technická diagnostika pro asynchronní elektromotory se dělí do těchto skupin:

- Vibrodiagnostika,
- diagnostika výkonu,
- diagnostika izolace.

7.1 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostikou lze u elektrických strojů točivých bez zastavení a demon-táže zjistit jejich stav po mechanické i elektrické stránce. Elektrický točivý stroj je vždy spojen s pracovním mechanismem, který působí na něj. Proto při posuzování elektrických točivých strojů je nutné přihlížet na technický stav poháněného mechanismu a při posuzování poháněcího mechanismu nutno přihlížet na technický stav elektromotoru.

Pro vibrodiagnostická měření elektromotoru nutno zpracovat metodiku měření. Metodika měření musí obsahovat:

- nastavení frekvenčních filtrů,
- kinematické schéma stroje,
- schéma měřících bodů,
- výpočet očekávaných frekvencí v jednotlivých spektrech,
- tabulkovitý přehled o typech ložisek,
- počet otáček,
- frekvence sítě,
- počet pól párů,
- počet drážek rotoru,
- počet drážek statoru,
- skluz.

Dále při provádění metodiky je vyznačení měřících bodů. Zásada při jejich určování je, aby měřící bod byl co nejbližší ložiska. Ložisko je vysílačem informací o kontrolovaném stroji a také o samém sobě. Měřící body musí být trvale vyznačeny na kontrolovaném stroji pro zaručení opakovatelnosti měření.

Příčiny, které způsobují vibrace strojů a zařízení jsou mechanického a elektrického původu, proto výpočet očekávaných frekvencí je dvojí. Pro mechanické příčiny je výpočet uveden v předchozích kapitolách. Pro elektrické příčiny je výpočet očekávaných frekvencí následující:

- stacionární změna vzduchové mezery nebo zkratové statorové plechy, popřípadě proudová nesymetrie se projeví na dvojnásobku síťové frekvence f_1 potom platí:

$$f_{st} = 2 \cdot f_1$$

- závary a dynamické účinky, to znamená rotující vzduchová mezera, závit nakrátko na rotoru, zlomená rotorová tyč nebo zkratované rotorové plechy se projevují na frekvencích:

$$f_{dyn} = f_o \pm 2f_{sk}$$

- mezi frekvencemi, otáčkami a skluzem platí vztahy:

$$n_1 = \frac{f_1}{p}$$

$$n_2 = \frac{t_2}{p}$$

$$f_2 = s \cdot f_r$$

$$n_2 = n_1 - n$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

- **stacionární změna vzduchové mezery nebo také statická excentricita obsahuje kromě frekvence f_{st} složky frekvencí, které jsou závislé na počtu drážek a skluzu podle vztahu:**

$$f_{drs} = f_1 \cdot \left[\frac{i \cdot m \cdot (1 - s)}{p} \pm k_1 \right]$$

- **lokální přehřátí statoru v určitém místě je zobrazeno ve spektru frekvencemi f_{sta} , f_{drs}**
- **dynamická změna vzduchové mezery obsahuje kromě frekvencí f_{dyn} tuto složku:**

$$f_{drd} = f_1 \cdot \left[\frac{(i \cdot m \pm k_e) \cdot (1 - s)}{p} \pm k_1 \right]$$

f_1 frekvence sítě [Hz]

f_{sk} skluzová frekvence neboli frekvence rotoru [Hz]

i $\pm 1, \pm 2 \dots$ číslo harmonické

p počet pólů

s skluz

k_s počet drážek statoru

m počet drážek rotoru

n_1 otáčky točivého pole statoru [min^{-1}]

n_2 otáčky točivého pole rotoru [min^{-1}]

a nominální otáčky rotoru [min^{-1}]

k_1 0, 2, 4, 6

k_e stupeň excentricity (pro statickou excentritu má nulovou hodnotu, pro dynamickou excentritu je to celé číslo).

Vztahy platí pro asynchronní motory. Taktéž nesouměrná zatížení se projeví na f_{st} . Statické nebo dynamické změny vzduchové mezery lze

analyzovat velmi obtížně, protože vzduchová mezera u synchronních strojů je podstatně větší než u asynchronních motorů, takže jejich změny jsou relativně zanedbatelné. Vibrace způsobené elektrickými příčinami se projevují hlavně v radiálním směru, tzn., že se budou vyskytovat ve vertikálním a horizontálním směru. V axiálním směru by se měly projevit při nestejné vzduchové mezeře podél stroje způsobené nesouměrným uložením rotoru. Vypočtené očekávané frekvence se ne vždy ztotožňují s frekvencemi na spektrálním grafu. Příčiny chyby jsou tři.

První je v otáčkách rotoru, které jsou závislé na skluzu a druhá ve frekvenci napájecí sítě, která není přesně 50 Hz. Další, třetí chyba je závislá na počtu spektrálních čar zvolených při rychlé Fourierově transformaci. Při provádění spektrální analýzy je nutno mít na zřeteli výše uvedené okolnosti. Volba přístrojové techniky je stejná jako u strojů.

7.2 Zkouška výkonových parametrů

Zkouška výkonu elektrického motoru je předepsána podle platných norem a u elektrických motorů se provádí při zkoušení prototypu a v průběhu běžné výroby se pouze zkouší určitý vyrobený kus. Běžně dodávaný elektromotor do provozu nemusí projít zkouškou na dynamometru. Totéž platí u motorů, na kterých byla provedena generální oprava. Popisovaný problém se vztahuje na elektromotory do 200 kW. Z provozní praxe je známo, že po uvedení do chodu nový nebo opravený stroj a zařízení okamžitě havaruje v rozsahu od 15 – 20 % nasazených strojů. Z provozní praxe autora příspěvků jsou známy případy, kdy nový nebo opravený elektrický motor nasazený do provozu cca po 60 minutách zhavaroval. Ve většině případů došlo ke zkratu ve vinutí nebo k jednopólovému zemnímu spojení. Jiný druh poruchy, který se projevoval po několika hodinách provozu, je mechanické poškození elektromotoru. Docházelo k poškození ložiska nebo k ukroucení hřídele. Výše uvedené poruchy způsobovaly velké výpadky ve výrobě, což zhoršovalo ekonomiku provozu a snižovalo bezpečnost provozovaných zařízení.

Na základě těchto negativních jevů byl zakoupen dynamometr DS 250 MEZ Vsetín. Po oživení dynamometru a provedení funkčních zkoušek byl vydán příkaz vedení organizace, na základě kterého každý elektromotor, který byl zakoupen od výrobce nebo byl po generální opravě, musel být před nasazením do provozu přezkoušen na dynamometru. Zkouška na dynamometru má tyto kroky:

- proměření izolačního stavu za studena,
- proměření odporu jednotlivých cívek za studena,
- proměření proudu v jednotlivých fázích při chodu neprázdnou,
- zatížení elektromotoru ne jmenovitý moment,
- proměření motoru ve všech třech fázích při zatížení jmenovitým momentem a srovnání naměřených hodnot zda jsou všechny stejné,
- zatížení elektromotoru na hodnotu 125 % jmenovitého momentu až do docílení provozní teploty elektromotoru. Oteplení elektromotoru je hlídáno tepelnými čidly speciálně umístěnými na elektromotoru anebo ovládání dynamometru je připojení přes tepelné ochrany, které jsou umístěny ve vinutí výrobcem. V obou případech při docílení provozní teploty dojde k vypnutí dynamometru.
- proměření izolačního stavu za tepla,
- proměření odporu jednotlivých cívek vinutí za tepla,
- vyhotovení protokolu naměřených hodnot s jednoznačným doporučením: elektrický motor je – není schopen spolehlivého a bezpečného provozu,
- zkouška je prováděna při kontinuálním hlídání izolačního stavu zkoušeného elektromotoru,
- dynamometr a zkoušený elektromotor je automaticky vypnut při poklesu izolačního stavu na hodnotu $300 \Omega/1 \text{ V}$.

Zjišťované závady

Na základě analýzy výsledků proměřených elektromotorů byly stanoveny okruhy závad, které je možno zjistit pomocí zkoušky výkonů:

- zkrat v magnetickém obvodu,
- přerušené tyče rotorového vinutí asynchronního elektromotoru,
- nedokonale provedená izolace mezi závitky a mezi kostrou zařízení,

- nedokonalá impregnace vinutí nebo nedostatečně vysušený impregnační lak.

7.2.1 Zkratky v magnetických obvodech

Zkratky v magnetickém obvodu elektromotoru se projevují snížením momentu. Při jmenovitém proudu je moment menší o 25 – 30 %. Zkratky v magnetických obvodech jsou ve většině případů ve jhu rotoru. Poškození rotorových nebo statorových plechů se projevuje ve snížení momentu M , což lze vysvětlit tím, že je lokálně zvětšena vzduchová mezera a elektro-motorická síla F_m zůstává konstantní, tudíž i statorový magnetický tok Φ_1 zůstává konstantní zároveň dochází ke zvětšení magnetického odporu R_m a taktéž vznikají v místě poškození vířivé proudy, které způsobují lokální přehřátí rotoru a statoru.

Pro toto platí vztahy:

$$\Phi_1 = \frac{F_m}{R_m}$$

$$M = \Phi_1 I_2$$

I_2 = rotorový proud

Na foto č. 10.1 je rotor elektromotoru KWB 135 W, 1000 V, 1450 t/min., který vykazoval při zkoušce na dynamometru pokles momentu na 68 % M_n při jmenovitém proudu. Demontáží bylo zjištěno devět lokálních poškození magnetického obvodu. Na foto č. 10. 2 je detail jednoho poškození, který zobrazuje vylomený rotorový zub.

K poškození magnetického obvodu statoru elektromotoru dochází také v důsledku takzvaného bourání vinutí. U moderních izolací vinutí nelze pouze mechanicky z drážek vytáhnout. Stator musí být vhodnou metodou zahřát na teplotu měknutí impregnačního laku vinutí a následně vytažen. Tyto teploty se pohybují v těsné blízkosti teploty, kdy statorové plechy ztrácejí své zaručované magnetické vlastnosti. Pokud rozehtívání statoru elektromotoru je prováděno nevhodnou metodou např. plynovými hořáky, které svůj plamen přímo směřují na statorové plechy, dochází k lokálnímu nevhodnému prohřátí statorových plechů. Lokálně přehřátý stator má větší magnetické ztráty a menší moment. Pokles momentu je až do 30% v závislosti na poškození statorových plechů. Pokud byl zjištěn takový elektromotor, sloužil pouze jako náhrada náhrad. Při jeho nasazení do provozu z nutnosti jeho životnost byla malá.

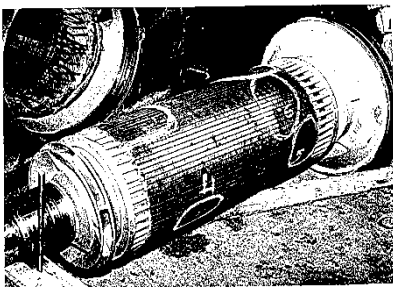


Foto č. 10. 1: Rotor elektromotoru KWB
135 W, 1000 V, 1450 t/min, poškození
magnetického obvodu

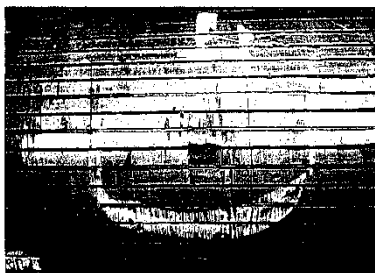


Foto č. 10. 2: Rotor elektromotoru KWB
135 W, 1000 V, 1450 t/min, poškození
magnetického obvodu

7.2.2 Přerušené rotorové vinutí

U asynchronních motorů s kotvou nakrátko dochází k poškození rotorových tyčí vytavením nebo přerušením. Dále dochází k prasknutí zkratovacího věnce vinutí a to především u rotoru s dvojistou klecí.

Při těchto poruchách dochází opět ke snížení momentu M a zvýšení oteplení. Zmenšení momentu M je způsobeno zmenšením magneto-motorické síly F_m a tím i magnetického toku.

Zvýšení teploty je způsobeno tím, že rotorový proud I_2 se rozdělí do neporušených rotorových tyčí teplota je řízená podle vztahu:

$$\Delta P = m \cdot R_2 \cdot I_2^2$$

ΔP - tepelné ztráty v rotorovém vinutí [W]

m - počet fází rotorového vinutí

R_2 - odpor rotorového vinutí [Ω]

I_2 - proud rotorového vinutí [A]

Zvýšením teploty rotorového vinutí dochází k tepelnému namáhání izolace tyčí a taktéž ke zvýšené roztaživosti tyčí a následně k rozpojení rotorového zkratovacího věnce, což má za následek zničení elektromotoru.

7.2.3 Špatně provedená izolace vinutí

Špatně provedená izolace vinutí mezi závity taktéž vůči kostře se projevuje při zkoušce na dynamometru mezi závitovým nebo zemním zkratem, následkem čehož dochází ke zničení motoru pouze na zkušebně. Ke zkratu dochází v důsledku tepelné roztaživosti vinutí. V místech se slabou nebo špatně provedenou izolací dojde k probití elektrického proudu.

7.2.4 Nedokonalá impregnace vinutí

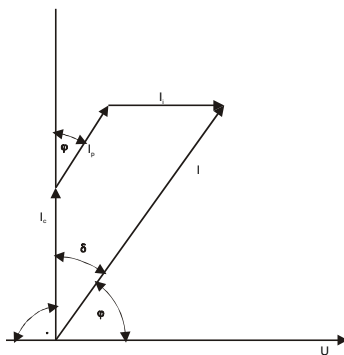
Při zkoušce na dynamometru elektromotor se oteplí na teplotu kolem 90°C. Při jeho chladnutí pohlcuje prostor v motoru a taktéž i izolace vinutí, okolní páru ze vzduchu a při opotřebované izolaci vinutí dochází k poklesu izolačního stavu. Elektromotor musí být pořádně vysušen nebo naimpregnován. U velkých elektromotorů se tomu říká dýchání izolace s počasím. Teple počasí zvyšuje izolační stav a studené počasí prudce snižuje izolační stav.

7.2.5 Diagnostika izolace

Izolací statorového vinutí elektromotoru si lze představit jako dielektrikum kondenzátoru, jehož jednu elektrodu tvoří vodič měřeného vinutí a druhou železo s ostatními částmi statoru. Po přiložení střídavého napětí k tomuto kondenzátoru začne dielektrikem procházet proud. V případě ideálního dielektrika byl tento proud pouze kapacitní a fázový posun mezi napětím a proudem by byl 90° . Dielektrikum není ideální, takže proud procházející dielektrikem má kromě jalové složky také činnou složku a fázový posun je menší než 90° . Činná složka proudu je způsobena těmito příčinami:

- odpor izolačního materiálu je velký, ale konečný,
- dielektrikum je v elektrickém poli polarizováno, polarizační proud má kromě jalové složky i složku činnou,
- při důsledně dodržovaném technologickém postupu výroby vinutí vznikají mezi vrstvami izolace miniaturní dutiny naplněné plynem.

Překročí-li gradient napětí na vrstvách izolace hodnotu zapalovacího napětí, dojde v dutinách ke vzniku částečných výbojů. Na obrázku č. 10.3 je zobrazen fázorový diagram reálného kondenzátoru, ve kterém nedochází k částečným výbojům.



Obrázek č. 10.3: Fázorový diagram reálného kondenzátoru

Z fázorového diagramu je zřejmé, že čím více se bude reálná izolace blížit dielektriku, tím menší bude úhel δ - izolace bude lepší. Tangenta úhlu δ se nazývá ztrátový činitel, a protože je úměrná velikosti úhlu δ lze ji považovat za měřítko jakosti izolace elektromotoru. Při měření ztrátového činitele izolace vinutí elektromotoru lze použít vysokonapětového střídavého můstku. Ztrátový činitel se měří na izolaci celé fáze vinutí. Naměřený průběh závislosti ztrátového činitele na napětí proto představuje charakteristiku měřené izolace. Měří se průběh závislosti ztrátového činitele na napětí. Počáteční napětí se volí tak, aby při něm ještě nedocházelo ke vzniku částečných výbojů v dutinách izolace. Vyhovuje napětí $0,2 U_a$, kde je jmenovité sdružené napětí. Při měření se zvyšuje napětí od $0,2 U_a$ do $1,0 U_n$. Při každém napětovém stupni se přečte velikost ztrátového činitele.

Stanovit obecné platné kritérium, podle kterého by bylo možno jednoznačně určit stav měřené izolace je obtížné. V publikacích jsou stanoveny hodnoty $\tan \delta$ pro vybrané druhy izolace. Tyto hodnoty slouží jako orientační. Nejlépe je změřit nový nebo generálováný elektromotor a tyto hodnoty používat jako referenční pro další měření.

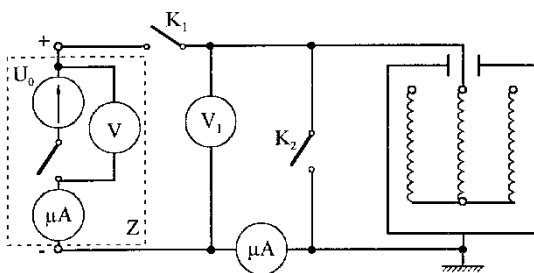
Stanovení kvality izolace pomocí $\tan \delta$ má svá omezení. Pomocí této metody nelze přesně zjistit, zda izolace je vlhká, mechanicky poškozená (rozpraskaná), má vysušený impregnant. Při špatném $\tan \delta$ vinutí elektromotoru se musí vyměnit a nahradit novým. V mnoha případech je to zbytečný krok stačilo by pouze je vysušit nebo naimpregnovat vhodným impregnantem, čímž by došlo ke značným úsporám finančních prostředků na opravy.

Prof. Tadeusz Glinka z Polska je autorem metody posuzování kvality izolace nedestruktivním způsobem. Izolace daného elektrického stroje je namáhána pouze do jmenovitého napětí. Předností této metody je, že lze přesně stanovit diagnózu stavu izolace ve všech směrech. Metodu jsem aplikoval za účasti autora metody na vysokonapětových i nízkonapětových elektro-motorech velkých výkonů včetně generátorů. Firma HUDECZEK SERVICE, s. r. o. Albrechtice používá tuto metodu jako základní způsob posouzení stavu izolace před a po opravě točivých elektrických strojů a takéž ostatních elektrických zařízení. Metodu prof. Glinky jsem doplnil o svůj vlastní návrh regenerace vinutí bez jeho vybourání, která je běžně aplikována.

Metodika nedestruktivních diagnostických měření izolace vinutí je založena na měření stejnosměrným napětím. Měření izolačního systém stejno-směrným napětím zahrnuje tři kroky:

- Stanovení charakteristiky $R_{60} = f(U)$, pokud je to možné v rozsahu napětí $0 \div 2 U_N$, většinou do U_N
- Obraz časového průběhu únikového proudu i_p po skokovém zapnutí, na úplně vybitém izolačním systému stejnosměrného napětí o hodnotě $U_0 \geq U_N$
- Nabití izolačního systému na hodnotu napětí $U_0 \geq U_N$ (do ustáleného stavu), následném odpojení napájecího napětí a zkratování izolačního systému na čas t_z po té rozpojení izolačního systému a odečtení hodnot zotaveného napětí na izolačním systému. $U_{od}(t)$

První dvě kontrolní měření byla doposud používána při zjišťování stavu izolace a jsou doporučována v návodech pro provoz a údržbu elektrických strojů. Rozsah těchto kontrolních měření byl omezen obvykle na jednu hodnotu napětí a to 2 500 V nebo 1 000 V. Třetí zkouška je zkouškou, která byla nově navržena a je nejdůležitější z hlediska diagnostiky technického stavu izolace a určení stupně jejího opotřebení. Měření stavu izolace jsou prováděna podle zapojení uvedeném na obrázku č. 10. 4. Základním elementem zapojení uvedeného na obrázku je zdroj stejnosměrného napětí Z o regulovaném napětí $0 \div 2 U_N$, mikroampérmetr, elektrostatický volt-metr V_1 a vypínače K_1 a K_2 , které umožňují provádět jednotlivé zkoušky.



Obrázek č. 10. 4: Schéma zapojení pro měření izolace stejnosměrným napětím, Z – vysokonapěťový zdroj, V_1 – elektrostatický voltmetr

Při výše uvedeném zapojení nutno dát pozor, aby neměl odpor izolace vypínačů vliv na výsledky měření. V případě, že by tak tomu bylo, je vhodnější tyto vypínače nezapojovat a přepínání provádět přímým připojováním vodičů do zdírek měřících přístrojů. Při práci je nutné použití

dielektrických rukavic. Postupným přepojováním měřícího vysokonapětového vodiče, připojeného k diagnostikovanému vinutí, ze zdroje na zem způsobujeme vykratování izolačního systému po dobu t_z a následně po připojení na elektrostatický voltmetr, odečítáme v určitém časovém intervalu hodnotu zotaveného napětí na izolačním systému. Na základě provedeného měření jsou sestaveny charakteristiky a parametry izolačního systému.

- Průběh odporu izolace $R_{60} = f(U)$ v rozsahu napětí $0 \div 2 U_N$, ze kterého se určuje odpor R_{60} při U_N
- Z extrapolace průběhu $R_{60} = f(U)$ hladinu průrazného napětí U_p izolačního systému
- Průběh zotaveného napětí $U_{od}(t)$ izolačního systému, ze kterého se odečítá doba zotavení t_{od} a hodnota maximálního zotaveného napětí U_{odmax}
- Součinitel absorpce izolačního systému i_{p15}/i_{60} při napětí $U_0 \geq U_N$
- Úroveň kmitů únikového proudu i_{p60max} a i_{p60min} po době $t > 60$ s od doby zapnutí napětí (tzn. pro ustálený stav)

Výše uvedené parametry charakterizují technický stav izolace v tabulce č. 10. 5

Č.	Parametry izolačního systému		Technický stav izolace			
			Dobry	Uspo- kojivý	Neuspokojivý	
					Opotřebo- vaná izolace	Vlhká izolace
1	Průrazné napětí U_p/U_a		> 3	> 2	< 1,5	≈ 1,5
2	Odpor R_{60}/U_a při U_N [kΩ/V]		> 10	> 1	může být větší	< 1
3 a	Doba zkratování t_z [s]	pro $U_N = 6$ kV	> 30	> 10	1	0,1
		pro $U_N < 6$ kV	> 10	> 5	1	0,1

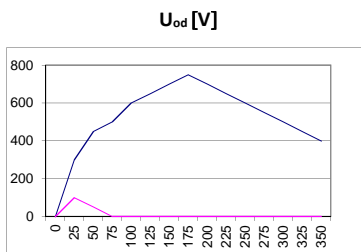
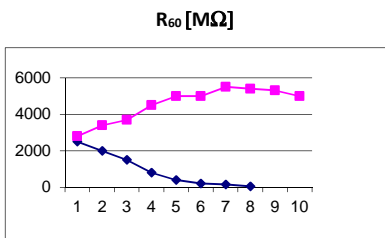
3 b	Maximální hodnota zotaveného napětí $U_{od\ max}/U_o$		> 0,1	> 0,1	= 0	= 0
3 c	Doba zotavení napětí t_{od} [s]	pro $U_N = 6\ kV$	> 120	> 30	0	0
		pro $U_N < 6\ kV$	> 30	> 15	0	0
4	Výchylky únikového proudu $(i_{p60\ min} - i_{p60\ min})/I_{p60sr}$ při U_N		< 2	< 3	> 5	1
5	$i_{p15}/i_{p60} = R_{60}/R_{15}$		> 15	> 1	≈ 1	= 1

Kritické hodnoty parametrů izolace z tabulky č. 10. 5 budou prezentovány na příkladu izolačního systému vinutí statorů dvou synchronních generátorů o těchto parametrech:

- výkon: 16 MVA a 12,8 MVA,
- napětí: 6 300 V,
- proud: 1470 A,
- otáčky: 3000 ot/min,
- buzení: napětí 50 ÷ 170 V, proud 158 ÷ 420 A,
- izolace: tř. B.

Cílem těchto měření bylo určení technického stavu izolace těchto dvou generátorů a u lepšího z nich regenerovat izolaci vinutí. Výsledky měření izolace generátoru 1 a generátoru 2 jsou uvedeny na následujících obrázcích:

- odpor izolace $R_{60} = f(U)$ je na obrázku č. 10 .6
- zotavené napětí U_{od} je na obrázku č. 10. 7
- průběh únikového proudu $i_p = f(t)$ je na obrázku č. 10. 8



U [kV]

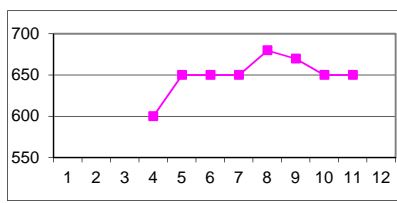
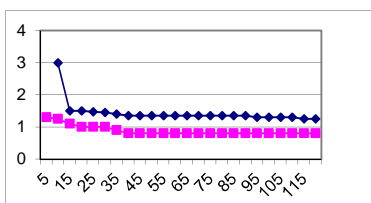
t [s]

Obrázek č. 10. 6

Obrázek č. 10. 7

I_p [μA]

R_{60} [$M\Omega$]



t [s]

U [kV]

Obrázek č. 10. 8

Obrázek č. 10. 9

Na základě získaných grafů byly určeny kritické parametry izolačního systému strojů, které jsou uvedeny v tabulce č. 10. 10.

Tabulka č. 10. 10

Č.	Parametry izolačního systému statoru		Generátor I	Generátor II	Generátor I po opravě
1	Jmenovité napětí vinutí [kV]		6,3	6,3	6,3
2	Průrazné napětí U_p/U_a		> 2	< 2	> 2
3	Odpor R_{60}/U_N při U_N [$k\Omega/V$]		820	33	690
4	Zotavené napětí	Doba zkratování t_z [s]	30	30	30
		$U_{od\ max}/U_o$	0,11	0,01	0,125
		Doba zotavení t_{od} [s]	170	20	210

5	$i_{p15}/i_{p60} = R_{60}/R_{15}$	1,15	2	1,5
6	Výchyvky únikového proudu t > 60 s při U_a	> 8	> 15	0

Parametry izolačního systému generátoru č. 1: hodnota průrazného napětí, odpor, zotavené napětí jsou dobré.

Parametry, které nevyhovují stavu dobrému: součinitel absorpce i_{15}/i_{60} , výchyvky únikového proudu, které se začaly objevovat již při napětí 5 kV.

Výchyvky únikového proudu dokumentují skutečnost, že izolace vinutí je popraskaná a částečně rozvrstvená. Parametry izolačního systému generátoru č. 2 jsou značně horší a jsou dokumentovány:

- velmi malou hodnotou (1%) zotaveného napětí,
- krátkou dobou zotavení – 20 s,
- výchyvkami únikového proudu se objevují již při napětí 2 kV, což znamená, že při této hodnotě napětí se objevují částečné výboje,
- součinitelem absorpce, který se rovná 1.

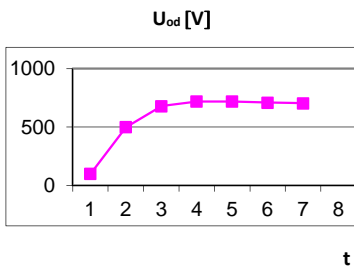
Izolace generátoru 2 je opotřebená a generátor je nutno převinout.

Na základě výsledků diagnostického měření generátoru č. 1 lze jednoznačně určit, že izolaci vinutí je možné regenerovat. Rozsah prací při obnově je následovný:

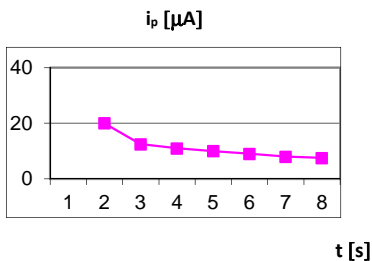
- vyfoukání čel vinutí včetně paketu a nosných částí statoru,
- rozklínování vinutí,
- opětovné vyfoukání zbytků prachu z rozklínovaných drážek,
- vyčištění vinutí vhodným čistícím prostředkem,
- vysušení vinutí do ustálení izolačního stavu,
- naimpregnování vinutí v čelech a drážkách vhodným impregnačním lakem,
- zaklínování vinutí,
- vypálení vinutí.

Po vypálení a zchladnutí izolačního systému následuje provedení diagnostického měření. Výsledky měření na statoru generátoru č. 1 jsou:

- odpor izolace $R_{60} = f(U)$ je na obrázku č. 10.9
- zotavené napětí U_{od} je na obrázku č. 10.11
- průběh únikového proudu $i_p = f(t)$ je na obrázku č. 10.12



Obrázek č. 10.11

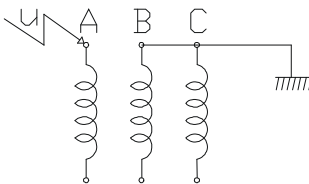


Obrázek č. 10.12

Výše uvedené charakteristiky regenerované izolace mají průběhy, které odpovídají dobrému izolačnímu systému. Parametry izolačního systému jsou uvedeny v tabulce č. 10.5. Srovnání parametrů izolačního systému před a po renovaci lze komentovat:

- absence výchylek únikového proudu potvrzuje jednoznačný nárůst hodnoty napětí částečných výbojů,
- součinitel absorpce vzrostl na hodnotu 1,5,
- zotavené napětí vzrostlo o 11% a doba zotavení o 23 %,
- došlo ke snížení odporu izolace o 16 %. Přesto všechno je hodnota 690 k Ω /V. V průběhu provozování stroje dojde k úplnému vysušení impregnantu a izolační stav naroste.

Měření izolace stroje bylo ukončeno napětovou zkouškou mezi jednotlivými fázemi, viz obrázek č. 10.13.



Obr. č. 10.13

Tato zkouška slouží také pro odzkoušení izolace čel vinutí.

Měření bylo prováděno napětím $U = 10$ kV po dobu tří minut. Únikové proudy jednotlivých fází při tomto měření byly následovné:

fáze A = 5 μ A

fáze B = 4,5 μ A

fáze C = 4,5 μ A

Po těchto zkouškách byla provedena napěťová zkouška tvrdým zdrojem při $2U_n$ po dobu 60s. Izolační systém vydržel.

Výše uvedený popis měřící metody je napsán na základě skutečně provedených měření a následné renovace izolace vinutí a potvrzení

dobrého stavu kontrolním měřením po provedených pracích na jednom generátoru v teplárně v ČR. Generátor byl provozován devět let. Po té byl provoz teplárny zastaven teplárna poddolována a její provoz zastaven. Úspory na generální opravě činily 1.6 mil. Kč.

Další zkoušky na dynamometru

V rámci řešení výzkumného úkolu, kterého jsem byl odpovědnou osobou, jsme prováděli zkoušku elektromotoru KWB 135 kW (elektromotor dobývacího kombajnu KWB 3RDU – výrobek PR), 1000 V, 1450 ot/min. 102 A 870 Nm na dynamometru. Zkouška byla zaměřena na bezdemontážní zjištění přerušených rotorových tyčí asynchronního motoru pomocí vibrací, dynamometru a harmonické analýzy proudu. Postup zkoušky byl stanoven takto:

- přezkoušení dobrého elektromotoru,
- poškození tří rotorových tyčí a přezkoušení,
- poškození dalších tří rotorových tyčí a přezkoušení,
- každá zkouška měla proběhnout a taktéž i probíhala při zatížení 0,25 %, 50 %, 75 %, 100 % a 125 % jmenovitého výkonu.

Pro tento účel byl použit motor ze skládky opravených motorů bez zvláštního výběru (elektromotor doposud neprošel zkouškami technické diagnostiky).

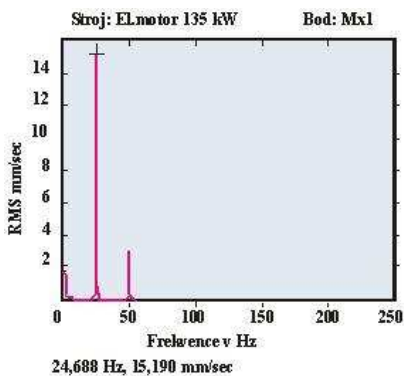
První měření. Při tomto měření a zatížení motoru na jmenovitý moment elektromotor odebíral velký proud. Po snížení zatížení dynamometrem na jmenovitý proud elektromotoru, tj. 102A byl naměřen moment 620 Nm, což je asi 70 % jmenovitého momentu.

Pro frekvenční analýzu vibrací platí tyto výpočty:

$$f_{st} = 2 \cdot f_1 = 2 \cdot 50 = 100 \text{ Hz}$$

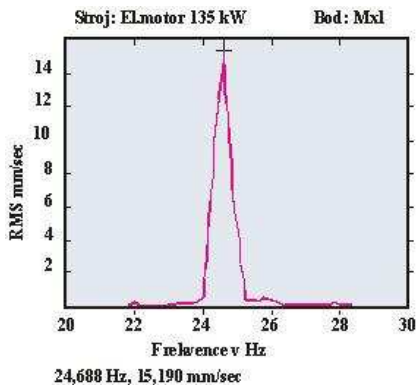
$$f_{dyn} = f_0 \pm 2f_{ak} = 24,688 \pm 2,0,7488 = \begin{matrix} 23,19\text{Hz} \\ 26,18\text{Hz} \end{matrix}$$

Na obrázku č. 10.14 je zobrazeno frekvenční spektrum při zatížení elektro-motoru na 125 % Mn, které na první pohled vykazuje nevyváženost rotoru.



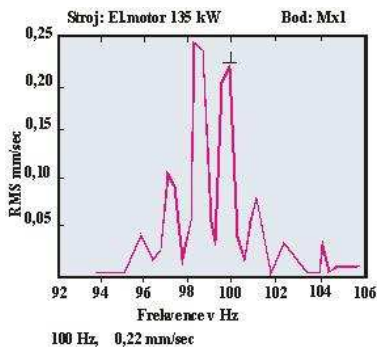
Obrázek č. 10.14: Frekvenční spektrum při zatížení elektromotoru na 125% Mn v rozsahu od 0 do 250Hz

Analýzou frekvenčního spektra v oblasti 20 – 30 Hz, což je oblast nevyváženosti rotoru a dynamické změny vzduchové mezery f_{dyn} , vykazuje spektrum jednoznačně nevyváženost viz obrázek č. 10.15.



Obrázek 10.15.: Frekvenční spektrum při zatížení elektromotoru na 125%Mn v rozsahu od 0 do 250Hz

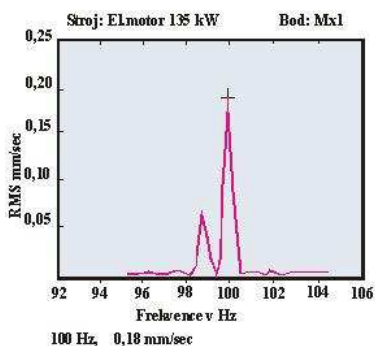
Analýzou frekvenčního spektra v oblasti 92 – 106 Hz, což je oblast stacionární změny vzduchové mezery f_{st} , byly zjištěny velmi malé amplitudy, ale silně členěné. Na základě praxe takového spektrum má např. opotřebovaný hřídel v místě drážky pro péro – viz obrázek č. 10.16.



Obrázek č. 10.16: Frekvenční spektrum elektromotoru v rozsahu od 92 do 106 Hz s poškozenými rotorovými tyčemi

Po odzkoušení elektromotor byl demontován a rotor vytažen ze statoru. Na rotoru byla zjištěna poškození tří kusů rotorových tyčí (prasknutí) včetně rotorového věnce. Tyto závady se jednoznačně projeví snížením momentu a silně členěným spektrem v oblasti 100 Hz.

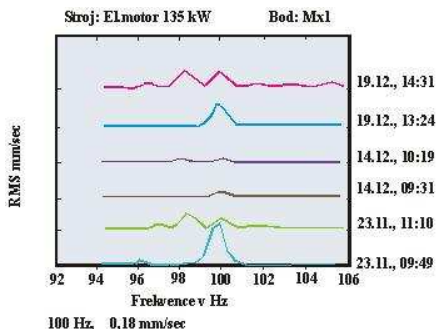
V následujícím dni byl na dynamometru zkoušen další elektromotor KWB 135 kW za účelem zjištění spektra dobrého elektromotoru. Moment motoru vykazoval jmenovitou hodnotu a spektrum vykazovalo malé amplitudy. V oblasti 100 Hz spektrum vykazovalo klasický průběh – viz obrázek č. 10.17.



Obrázek č. 10.17: Frekvenční spektrum dobrého elektromotoru v rozsahu od 92 do 106 Hz

Ve třetím dni byl na dynamometr namontován elektromotor KWB 135 kW, ze dne prvního, s tím, že byly přerušeny další tři tyče. Zkouškou se mělo

prokázat vliv počtu prasklých tyčí. Moment motoru při jmenovitém proudu a napětí byl stejný, spektra vibrací stejná jako v prvním dni, s tím, že jejich amplitudy se zvýšily právě o 100 %. Na obrázku č. 10.18 jsou zobrazena spektra všech tří měření vždy při chodu naprázdno a při zatížení 125 %.



Obrázek č. 10.18: Porovnání všech naměřených spekter v rozsahu od 92 do 106 Hz

Na základě výše uvedených skutečností nelze jednoznačně říci, že ta nebo ona metoda zjišťování stavu asynchronního motoru je dostatečná. Jako nejvhodnější se jeví postup, který jsem zavedl a je prováděn jako komplexní proměřování motorů (vibrace, výkon a izolace).

Metoda je na první pohled nákladná, ale prostředky jsou vynaloženy smysluplně, protože špatně vyrobené nebo opravené elektromotory jsou rozpoznány na zkušebně a ne v provozu. Zjišťování špatného stavu elektromotoru v provozu přináší velké ztráty výrobě a náklady na opravy. Zároveň poškozuje poháněný mechanismus, kterým byl v tomto případě dobývací kombajn.

8 Vliv nesymetrie elektromagnetického pole elektromotoru na poháněný mechanismus

V mnoha publikacích jsou popsány příčiny vzniku nesymetrie elektromagnetického pole elektromotoru. Patří mezi ně např.:

- nesymetrie vzduchové mezery,
- přesycování zubů statoru a rotoru,
- nevhodný poměr počtu statorových a rotorových drážek,
- nevhodné natočení drážek rotoru,
- excentricita rotoru,
- vliv uspořádání vinutí s několika paralelními větvemi u větších strojů s napětím $U < 1000 \text{ V}$,
- vliv neharmonického napájení atd.

V průběhu diagnostických měření po dobu posledních dvaceti let byly zjištěny na kombajnových elektromotorech a motorech hlavních důlních čerpadel v důlních provozech a provozech tepláren a elektráren na elektro-motorech čerpadel a ventilátorů a taktéž přejímek nových elektromotorů přímo u výrobce dvě nové příčiny vzniku nesymetrie elektromagnetického pole, které doposud nebyly nikým publikovány.

K poškození magnetického obvodu statoru elektromotoru a následně k nesymetrii elektromagnetického pole dochází také v důsledku takzvané-ho bourání vinutí. Stator musí být vhodnou metodou zahřát na teplotu měknutí impregnačního laku vinutí a následně vinutí vytaženo. Tyto teploty se pohybují v těsné blízkosti teploty, kdy statorové plechy ztrácejí své zaručované magnetické vlastnosti. Pokud rozehtívání statoru elektro-motoru je prováděno nevhodnou metodou např. plynovými hořáky, které svůj plamen přímo směřují na statorové plechy, dochází k lokálnímu nevhodnému prohřátí statorových plechů. Lokálně nadměrně oteplený stator má větší magnetické ztráty a menší moment.

Při nákupu dynamových plechů pro výrobu statorových a rotorových plechů jsou ne vždy tyto plechy vybaveny atestem kvality z hlediska magnetických vlastností. Nekvalitní tabule dynamových plechů nemají vždy po celé ploše přesně stejnou tloušťku. Při prostřihávání a následném skládání jednotlivých plechů je délka nestejnorodá a způsobuje nesymetrii elektromagnetického pole.

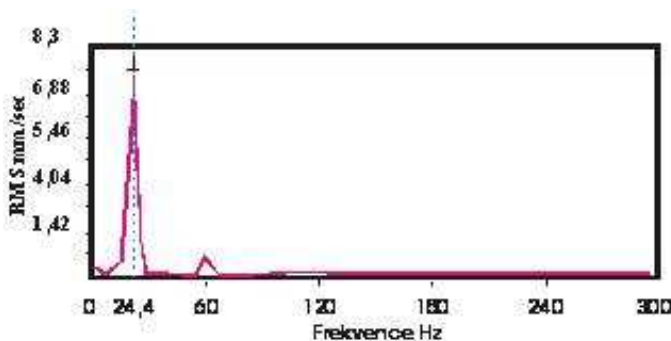
Doposud jsem nenalezl publikaci o vlivu nesymetrie elektromagnetického pole elektromotoru na poháněný mechanismus. Při provádění bezdemon-

tážní technické diagnostiky na teplárnách a elektrárnách a taktéž i hornictví jsem tento vliv experimentálně ověřil přímo na provozovaných strojích

a následně stanovil metodiku měření a taktéž vyhodnocování naměřených hodnot. Přímou v provozních podmínkách jsem zjistil 21 x nesymetrii elektromagnetického pole elektromotoru a jeho negativní působení na poháněný mechanismus.

8.1 Identifikace poruchy elektromotoru zapříčiněné nesymetrií elektromagnetického pole a jeho vliv na poháněný mechanismus

Ve všech doposud zjištěných případech se projevují poruchy elektromotoru zapříčiněných nesymetrií elektromagnetického pole na poháněném mechanismu i na samotném elektromotoru vibracemi a to v oblasti hodnocení mezních stavů jako ještě přípustný nebo nepřípustný podle VDI 2056. Poruchu lze identifikovat při zatížení na první harmonické frekvenčního spektra viz obrázek č. 11. 1.



Obrázek č. 11. 1

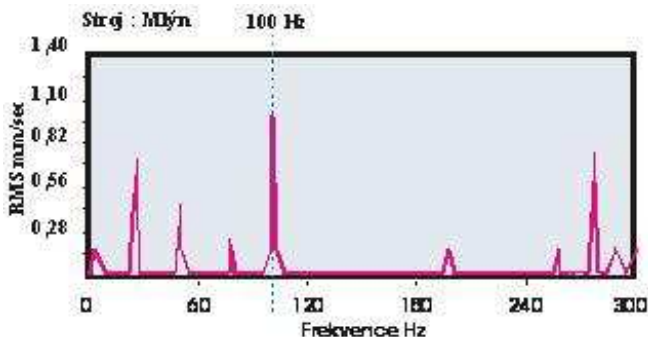
Chvění na první harmonické odpovídá nevyváženosti rotujících hmot. Hodnoty chvění na elektromotoru jsou o 15 % větší od hodnot chvění na poháněném mechanismu v některých případech jsou stejné nebo opačné. Při zjištění tohoto stavu začne každý diagnostik vyvažovat. Nejprve poháněný mechanismus (ventilátor, čerpadlo) ve dvou rovinách. Následně na ventilátoru elektromotoru jeho rotor. Po spojení spojky se výsledky zlepší o zbytkovou nevyváženost za předpokladu stavu, že soustrojí bylo dobré. Hodnoty chvění po těchto opatřeních se zlepší cca o 20 %. Při tomto zlepšení, má soustrojí nadále vibrace nevyhovující. Následně je provedena demontáž elektromotoru a vyvážen na vyvažovací stoličce jeho rotor. Po montáži elektromotoru a proměření vibrací je stav stejný. Tento proces probíhá několik dnů. Zde popisuji skutečný případ, který se stal v jedné organizaci. Byl jsem pozván jako nezávislý odborník.

Tak jako mí předchůdci, jsem začal vyvažovat, s tím rozdílem, že pro vyvažování jsem použil starou graficko-početní třibodovou metodu. Z moderní techniky jsem použil pouze datakolektor pro přesné měření první harmonické vibrací na dané vyvažovací rovině. Důvodem použití staré graficko-početní třibodové metody vyvažování byla skutečnost, že sonda pro měření fáze při předchozím vyvažování na jiném stroji byla mechanicky poškozena. Při třetím vyvažovacím běhu jsem zjistil, že grafické zjišťování místa a hmotnosti vyvážku nemá řešení. Tím opodstatnění pro vyvažování nebylo shledáno. Vyvažování jsem opakoval několikrát se stejným výsledkem. Kolegové vyvažovali na moderním vyvažovacím přístroji firmy Schenck. Jejich přístroj pro vyvažování automaticky vedl celý vyvažovací proces a taktéž vždy určil místo a hmotnost vyvážku. Po připevnění vývážku na vyvažovací rovinu byl výsledek z hlediska snížení chvění nulový.

Příčina neúspěchu s moderním vyvažovacím přístrojem byla v tom, že algoritmus vyvažování má přístroj napevno zakódován do mikroprocesoru a vždy musí určit lehčí místo, kam se připojí vyvážek.

Z dřívějších vyvažování pomocí graficko-početní metody jsem byl poučen, že v případě kdy při grafickém řešení vyvážku se kruhy k_1, k_2, k_3 nesejdou viz. obrázek č. 11. 6 je celá soustava nelineární. Nelinearity v předchozích případech se projevovaly v tom, že byly uvolněné svorníky v základech, které kotvily konstrukci stroje. Dále se nelinearita projevovala, když byly značně měkké nosné konstrukce rámu stroje atd. Při vyvažování ventilátoru jsem nezjistil konstrukční závady, které by způsobovaly

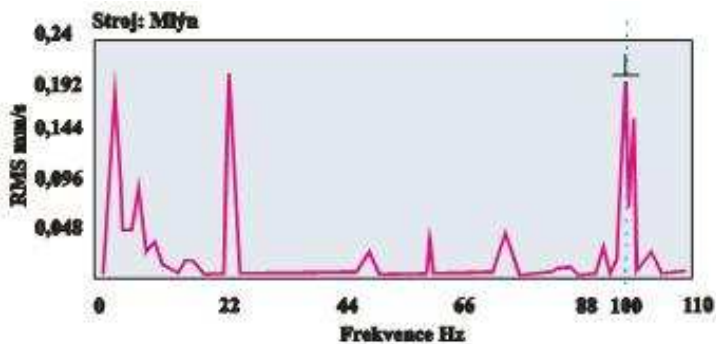
nelinearitu. Po dalších úvahách jsem nechal rozpojit spojku a proměřil vibrace elektromotoru bez zatížení. Celková efektivní hodnota vibrací elektromotoru při chodu naprázdno byla na úrovni stavu dobrého, což by nasvědčovalo, že elektromotor je dobrý. Frekvenční analýzou viz obrázek č. 11. 2 jsem zjistil, že na dvojnásobku síťové frekvence tj. 100 Hz je amplituda větší od první harmonické.



Obrázek č. 11. 2

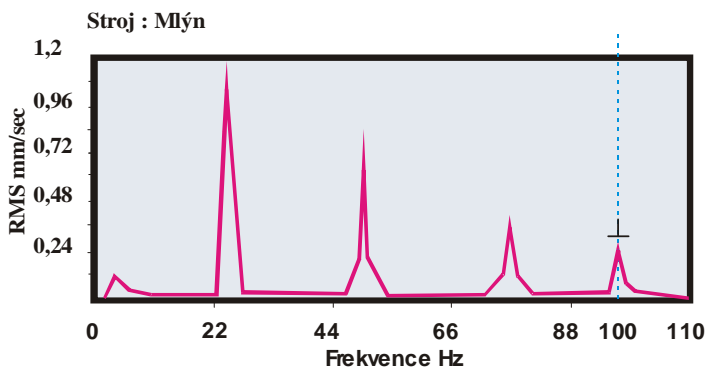
Z dřívějších diagnostických měření jsem věděl, že při této konfiguraci frekvenčního spektra je ve stroji anomálie a stroj nutno zastavit a opravit. Dále jsem věděl, že na této harmonické se u elektromotorů vyskytují závady elektromagnetického pole. Nechal jsem elektromotor vyměnit i při značných protestech provozních pracovníků, protože výměna elektro-motoru byla velmi obtížná. Po výměně elektromotoru byly vibrace celého stroje na mezní hodnotě dobré. Tímto prvním náhodným pokusem jsem začal tento postup používat jako standardní při problémech na strojích jak je uvedeno výše.

Na obrázku č. 11. 3 je uvedeno spektrum vibrací náhradního elektromotoru, který byl zkoušen na zkušebně za účelem zjištění jeho technického stavu. Po provedeném měření jsem jednoznačně určil, že elektromotor je vadný. Příčinou tohoto tvrzení byla frekvenční analýza spektra vibrací, kde na dvojnásobku síťové frekvence je amplituda o velikosti $\frac{2}{3}$ základní harmonické a navíc má postranní pásma.



Obrázek č. 11. 3

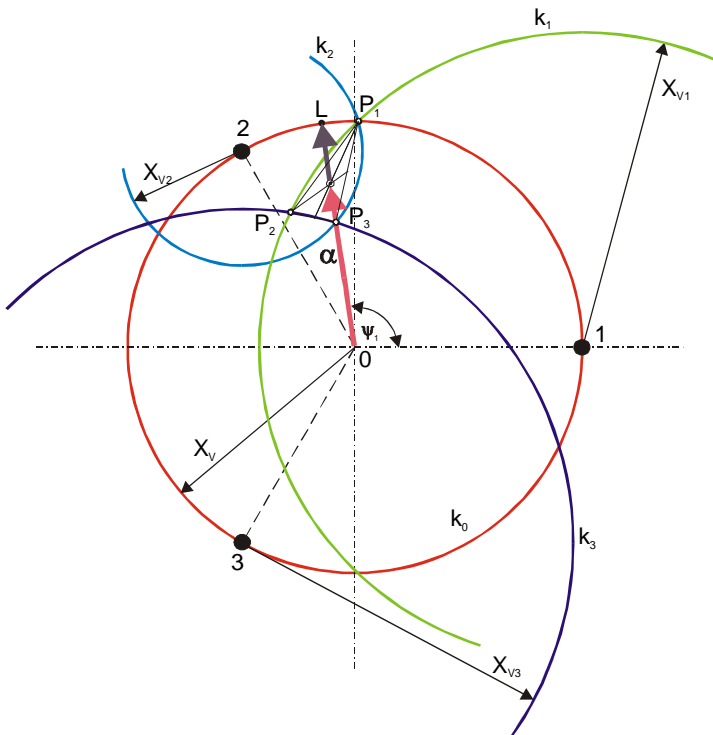
Na obrázku č. 11. 4 je zobrazeno spektrum dalšího elektromotoru téhož typu a parametrů. Elektromotor byl označen jako dobrý a mohl být použit v provozu. Spektrum vibrací tohoto elektromotoru je možno označit jako školní příklad. Každý dobrý stroj má spektrum o takovémto průběhu.



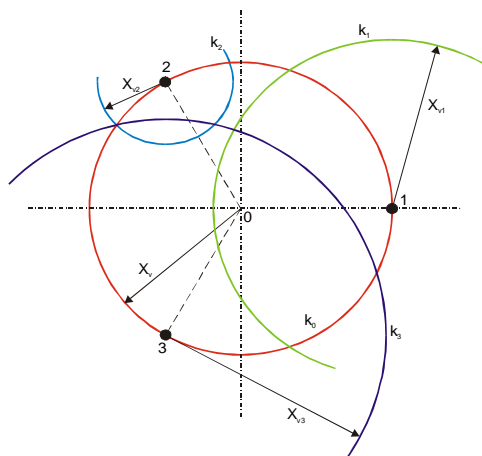
Obrázek č. 11. 4

8.2 Metoda vyvažování nelineárních soustav

Třípolohová metoda vyvažování je známa a je nejvýhodnější pro vyvažování v provozních podmínkách i na vyvažovacích stolicích staršího typu, které mají dobrý technický stav mechanické části stoličky, ale mechanické nebo elektronické zařízení pro určení místa a hmotnosti vyvážku je nefunkční. Výhodnost metody spočívá v tom, že při relativně malém počtu měření lze i bez měření fáze určit polohu vyvážku. Největší přínos této metody je v tom, že při její pravidelné aplikaci jsem zjistil, že lze pomocí ní identifikovat, zda vyvažovaný stroj je nebo není lineární. Nelineární stroj se nedá vyvážit žádnou vyvažovací metodou ani přístrojem. Třípolohovou metodu používám od roku 1986 dosud.



Obrázek č. 11. 5



Obrázek č. 11. 6

Postup vyvažování:

Vyvažovaný stroj např. ventilátor se připojí pod napětí, a když se otáčky stroje ustálí na jmenovitých otáčkách (u vyvažovacích stolic stačí otáčky 750 otmin^{-1} , otáčky při všech bězích musí být stejné) je možné zahájit měření vibrací. Měření vibrací provádíme vždy v jednom bodě a to záleží, kterou vyvažovací rovinu chceme vyvažovat. Měřící bod musí být vyznačen tak aby byla kdykoliv zachována opakovatelnost měření. V tomto bodě se změří vibrace, pokud chceme vyvažovat oběžné kolo ventilátoru, přístrojem, jehož výstupem je frekvenční spektrum alespoň v rozsahu od 0 do 200 Hz v efektivní hodnotě, v lineárních souřadnicích a mohutnost kmitání v rychlosti v $[\text{mms}^{-1}]$. Na první harmonické odečteme hodnotu amplitudy X_v v rychlosti v $[\text{mms}^{-1}]$. Na výkrese sestrojíme kružnici k_0 o poloměru rovném hodnotě X_v . Někdy je nutné kreslit v měřítku pro lepší rozlišitelnost. Stroj zastavíme a tím je ukončen první běh.

Při zastaveném a zajištěném stroji proti nahodilému zapnutí rozdělíme oběžné kolo na tři části vzájemně posunuté o 120° . Na každé části vyznačíme bod na stejném poloměru a označíme je čísly 1, 2, 3. Do těchto bodů budou postupně připevňovány pomocné vývažky W a při stejných otáčkách budou proměřeny vibrace ve stanoveném měřícím bodě a ode-

čteny hodnoty amplitud X_{v1} , X_{v2} , X_{v3} . Po změření těchto amplitud je ukončen druhý, třetí a čtvrtý běh. Hmotnost pomocného vývažku se volí

podle empirického vztahu $m_W = \frac{X_v M}{r_W} [\text{kg} \cdot 10^{-3}]$, kde X_v je hodnota

amplitudy změřená při prvním běhu v měřícím bodě, M je hmotnost rotujících částí (oběžné kolo, hřídel, spojka), r_W je poloměr pomocného vývažku udávajícího vzdálenost jeho těžiště od osy rotace. Tímto vztahem se lze spolehlivě řídit při určování pomocného vývažku avšak je nutná velká zkušenost při vyvažování.

Z naměřených hodnot se graficky určí příčinkový činitel α , potřebný pro výpočet hmotnosti m_v hledaného vývažku (obrázek č. 11.5), takto:

- kolem zvoleného počátku O se opíše kružnice ko poloměrem rovným X_v ;
- na kružnici ko se vyznačí body 1, 2, 3 odpovídající místům připojování pomocného vývažku W ;
- kolem bodu 1 se opíše kružnice k_1 poloměrem X_{v1} , kolem bodu 2 kružnice k_2 poloměrem X_{v2} a kolem bodu 3 kružnice k_3 poloměrem X_{v3} ; všechny tři kružnice by se teoreticky měly protnout v jednom bodě P . Vlivem nelineárních vlastností měřené soustavy a vlivem určitých nepřesností měření se dostanou obvykle tři průsečíky P_1 , P_2 , P_3 ; jejich spojením vznikne trojúhelník, jehož plocha je určitou mírou nelinearity soustavy, popřípadě nepřesností měření;
- spojnice těžiště $\Delta P_1 P_2 P_3$ s bodem O je příčinkový činitel α ; jeho směr určuje tentokrát rovinu nevyváženosti zcela jednoznačně, přičemž průsečík α s ko udává „lehké místo“ L ;
- hmotnost m_v hledaného vývažku V se určí ze vztahu

$$m_v = \frac{X_v}{\alpha} m_W \frac{r_W}{r_v}$$

Vypočtený vývažek o hmotnosti m_v se připojí do místa L a při stejných otáčkách jako dříve se změří amplituda X^*v což reprezentuje pátý běh. Nedosáhne-li se tímto vyvažovacím krokem žádaného stupně vyvážení, je třeba celý postup opakovat; pomocný vývažek se volí úměrný hodnotě X^*v .

Při tomto vyvažování nutno dbát na bezpečnost a to z hlediska protipožárního při svařování jednotlivých pomocných vývažků do jednot-

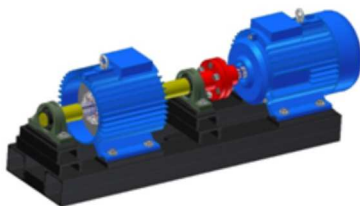
livých bodů a taktéž z hlediska zajištění stroje proti nahodilému zapnutí. U elektromotorů je nutné dodržet výrobcem stanovenou čekací dobu mezi jednotlivými zkušebními běhy. Nedodržením čekací doby hrozí tepelné poškození vinutí elektromotoru a následný elektrický zkrat.

Pokud se všechny tři kružnice neprotnou vlivem nelineárních vlastností měřené soustavy a nevytvoří tři průsečíky P_1 , P_2 , P_3 viz obrázek č. 11.6 měření je nutno pro kontrolu zopakovat a pokud další výsledek je stejný soustava je jednoznačně nelineární. Nelinearitu je nutno hledat v prasklém základovém rámu, měkké nosné konstrukci ventilátoru, uvolnění oběžného kola v náboji atd. Pokud závada není nalezena v konstrukčně mechanické části soustrojí, je nutné rozpojit spojku a elektromotor proměřit při chodu bez zatížení ve všech měřících bodech. Pokud naměřená spektra budou podobná frekvenčním spektrům na obrázcích č. 11.2 a č. 11.3 jen nutno elektromotor vyměnit za nový. Elektromotor, který má takováto frekvenční spektra, je poškozen. Jeho elektromagnetické pole je nelineární. Ve většině případů se motor nedá opravit. Závada je konstrukčně výrobního charakteru. Náklady na opravu převyšují pořizovací náklady na nový elektromotor. Na jedné teplárně byl proveden pokus na elektromotoru, který jsem určil jako elektromotor s poškozeným elektromagnetickým polem. Elektromotor byl odzkoušen na elektrické brzdě. Při zatížení elektromotoru na jmenovitý proud, v elektromotoru nastal tepelný průraz ve vinutí s následným zkratem. V provozních podmínkách tento motor pracoval se zvětšenými vibracemi a nedošlo k tepelnému poškození vinutí, protože nebyl zatížen na jmenovitý výkon. Na základě tohoto výsledku mi teplárna vystavila objednávku na stanovení mezních hodnot pro nákup nových elektromotorů.

Přejímky takto vyrobených elektromotorů jsou u výrobce prováděny na základě výsledků měření vibrací při požadavku dodržení mezních hodnot, které jsem stanovil. Takto nakoupených elektromotorů o výkonu od 0,2 MW do 1,2 MW je provozováno v současné době na této teplárně asi sedm. Některé z těchto elektromotorů jsou v provozu již pátý rok bez jakýchkoliv problémů a poruch.

8.3 Experimentální simulace a analýza nesymetrie elektromagnetického pole asynchronního elektromotoru

Příčiny vzniku nesymetrického elektromagnetického pole, jsou v mechanické a elektrické části elektromotoru. Pro experimentální ověření účinků nesymetrie elektromagnetického pole elektromotoru musí být model koncipován tak, aby umožňoval vytvořit umělou nesouosost rotoru vůči statoru. Navržené řešení spočívá ve vytvoření statického a dostatečně tuhého uložení hřídele rotoru, přičemž excentrického uložení rotoru vůči statoru se docílí radiálním posunem statoru. V závislosti na požadovaném typu a velikosti excentricity lze posunem statoru v místech ukotvení patek elektromotoru nastavit požadovanou paralelní či úhlovou excentricitu.



Obrázek č. 11. 7. Zkušební model pro experimentální měření

8.3.1 Návrh konstrukce zkušebního agregátu

Hlavními prvky modelu pro simulaci a analýzu poruch pohonné jednotky jsou dva asynchronní elektromotory, z nichž jeden je zařazen jako motorový pohon (elektromotor) a druhý jako motorová brzda (generátor). Štítkové údaje a technické parametry obou elektromotorů byly stejné:

- jmenovitý výkon 15 kW
- jmenovité otáčky $2\,900\text{ min}^{-1}$
- jmenovité napětí 380 V
- jmenovitý proud 29,5 A

Elektromotor je upraven tak, aby bylo možné nastavit posuv statoru vůči rotoru a tím nastavit velikost vzduchové mezery mezi statorovým a roto-

rovým paketem. Úprava elektromotoru spočívá v sólovém uložení rotoru elektromotoru vůči statoru. Toho je docíleno odejmutím ložiskových štítů i s ložisky a uložení rotoru do samostatných ložiskových jednotek.

Motorovou brzdu tvoří elektromotor stejného typu, výkonu i otáček. Brzdného čili zatěžovacího účinku je docíleno snížením otáček změnou napájecí frekvence pomocí frekvenčního měniče. Díky tomuto uspořádání je možné zatížit elektromotor asynchronním elektromotorem.

Stator, rotor v ložiskových jednotkách a motorová brzda jsou ustaveny na svařovaném ocelovém rámu. Rám modelu je tvořen dvěma vyztuženými krabicovými profily opatřenými stojkami pro usazení ložiskových jednotek. Dosedací desky rámu jsou opatřeny závitovými oky pro odtlačné šrouby. Odtlačné šrouby jsou umístěny v radiálním i axiálním směru u obou statorů elektromotorů. Pomocí odtlačných šroubů na statoru elektromotoru je možné posunout stator v v horizontálním směru a nastavit tak velikost vzduchové mezery na obou koncích rotorového paketu.



Obrázek ř. 11.8. Fotografie zkušebního agregátu

8.3.2 Zapojení agregátu a řízení otáček

Elektromotory agregátu jsou napájeny síťovým napětím 3 x 400 V při jmenovitém proudu 29,5 A. Hnací elektromotor modelu je zapojen do sítě prostřednictvím pojistkového odpojovače, stykače a motorové ochrany.

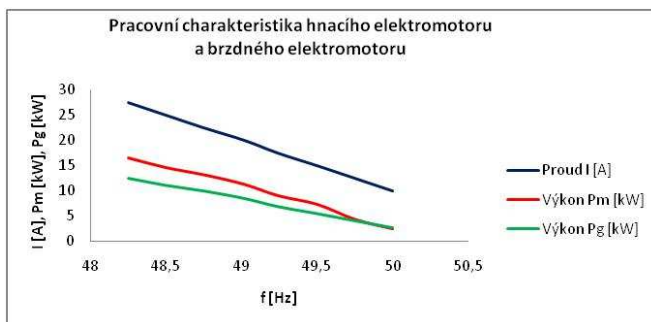
Do silového obvodu brzdného elektromotoru je zařazen čtyřkvadrantový

rekuperační frekvenční měnič. Pomocí tohoto frekvenčního měniče je vyveden brzdňý moment na hnací elektromotoru, a to snížením napájecí frekvence brzdného elektromotoru.

Postup zatěžování hnacího elektromotoru

- Zapojení brzdného elektromotoru a pomocí frekvenčního měniče se nastaví napájecí frekvence na 50 Hz.
- Zapojení hnacího elektromotoru a na stykači se zapne hnací elektromotor. Oba elektromotory se otáčejí stejnými otáčkami.
- Na brzdém elektromotoru se v sedmi krocích nastaví snížená hodnota napájecí frekvence, čímž se docílí požadovaného brzdného účinku.
- Po provedení všech kroků měření se na frekvenčním měniči nastaví opět synchronní otáčky a elektromotory je možné postupně odpojit od sítě a připravit model na další krok měření.

Na obrázku č. 11.9 je zobrazena zatěžovací charakteristika obou elektromotorů, brzdného a hnacího. Charakteristiky jsou stejné, protože elektromotory mají totožné parametry.



Obrázek č. 11. 9: Graf závislosti napájecí frekvence na výkonových parametrech modelu

8.4 Postu měření při zjišťování nelinearity elektromagnetické pole

Na zkušebním agregátu pro stanovení vlivu nelinearity elektromagnetického pole hnacího elektromotoru na dynamiku pohonu, byly sledovány tyto parametry:

- poloha statoru vůči rotoru upraveného elektromotoru,
- fázové hodnoty napájecích napětí a proudů hnacího elektromotoru,
- fázové hodnoty napětí a proudů hnaného elektromotoru,
- vibrace na ložiskových štítech hnacího elektromotoru,
- vibrace na ložiskových domcích hnaného elektromotoru,
- vibrace na statoru hnaného elektromotoru,
- teploty a teplotní pole na ložiskových stojanech hnaného elektromotoru,
- teploty a teplotní pole na statoru hnaného elektromotoru.

8.4.1 Poloha statoru vůči rotoru upraveného elektromotoru

Agregát pro experimentální ověření vlivu vibrací na uměle vytvořenou excentricitu je konstruován tak, aby bylo možno nastavit velikost vzduchové mezery mezi rotorovým a statorem. Nastavení polohy zajišťují odtlačné šrouby, které jsou umístěny po obou stranách patek elektromotoru v radiálním i axiálním směru. Axiální poloha statoru vůči rotoru je nastavitelná pomocí montážního přípravku umístěného na čelech statoru. Radiální nastavení polohy se provádí pomocí listových měrek přímo ve vzduchové mezeře mezi rotorovým a statorovým paketem při zajištěném pohonu. Měření na zatíženém experimentálním agregátu je provedeno ve dvou polohách statoru elektromotoru, a to:

- V souosé poloze statoru a rotoru. Geometrická osa statoru je totožná s geometrickou osou statoru, přičemž vzduchová mezera je $e = 0$ mm.
- V nesouosé poloze statoru a rotoru. Osa rotoru je posunuta ve všech místech o konstantní excentricitu.

VQF400 - střídač

Řízení motoru
Ochrana

8.4.2 Měření vibrací na experimentálním modelu

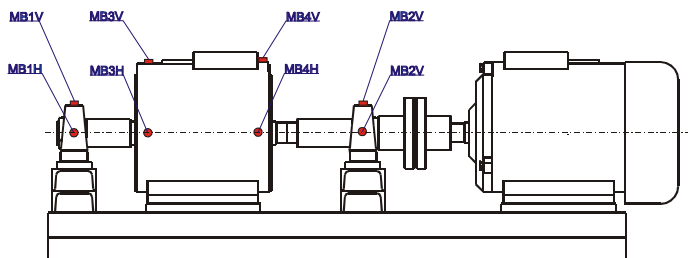
Na zkušebním agregátu byly měřeny vibrace na ložiskových jednotkách, statoru upraveného elektromotoru a statoru generátoru. Vibrace byly snímány v horizontální a vertikální rovině v měřících bodech vyznačených ve schématu. Měřící body jsou provedeny nalepením podložek pro měření vibrací z magnetické oceli.

Měření vibrací proběhlo ve třech fázích:

- měření vibrací pohonu se souosým statorem v závislosti na čase při nezatíženém elektromotoru,
- měření vibrací pohonu se souosým statorem v závislosti na zatížení elektromotoru,
- měření vibrací nesouosého rotoru v závislosti na zatížení elektromotoru.

Všechny tři režimy provozu pohonu zahrnují sedm úrovní měření odkrokových podle času měření a velikosti zatížení elektromotoru. K měření vibrací na modelu byl použit analyzátor a datakolektor vibrací ADASH A4300 VA3. Ke snímání vibrací byl použit snímač zrychlení vibrací ADASH A. Na experimentálním agregátu byly ve všech měřících bodech snímány tyto hodnoty:

- celkové hodnoty rychlostí vibrací ve frekvenčním pásmu 10 – 1000 Hz,
- frekvenční spektra rychlostí vibrací ve frekvenčním pásmu 10 – 1000 Hz.

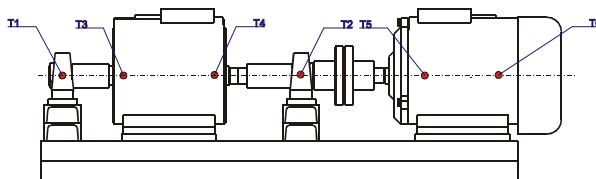


Obrázek č. 11. 10: Vyznačení měřících bodů pro umístění snímačů vibrací

8.4.3 Měření teplotních polí agregátu

Na zkušebním agregátu byly sledovány teploty, respektive teplotní pole jednotlivých částí modelu. Měření teplot na agregátu bylo prováděno za účelem snížení rizika poškození či havárie modelu a také z důvodu zpracování dat pro stanovení vlivu vibrací na teplotě ložisek, které bude následně použito v další vědecké práci.

Měření teplot proběhlo rovněž v sedmi krocích při třech různých provozech agregátu. K měření teplot a teplotních polí byla použita termovizní kamera FLUKE TI 45. Parametry termovizní kamery jsou uvedeny v tabulce.

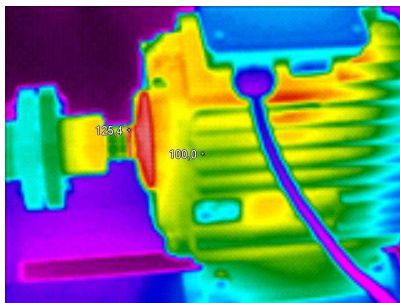


Obrázek č. 11.11: Vyznačení sledování teplot



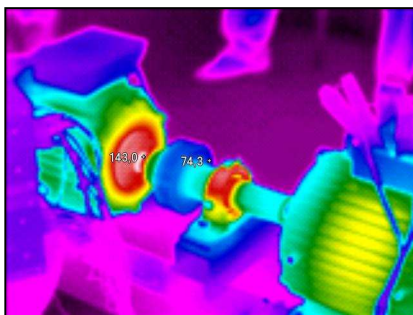
Obr. 11.12. Termovizní kamera FLUKE TI 45

Na obrázku č. 11. 13 je foto tepelného pole asynchronního elektromotoru, kde zkušební agregát měl uměle vytvořenou excentritu vzduchové mezery.



Obrázek č. 11. 13 Tepelné pole zatíženého a s excentritou vzduchové mezery

Na obrázku č. 11. 14 foto tepelného pole hnacího a hnaného synchronního elektromotoru při těž simulované chybě.



Obrázek č. 11. 14: Pohled na tepelné pole hnacího a hnaného asynchronního elektromotoru

8.4.4 Měření elektrických veličin agregátu

V rámci experimentu byly na zkušebním agregátu také zaznamenávány hodnoty fázových napětí a proudů hnacího elektromotoru a napětí a proudů brzdného elektromotoru. Současně byly snímány napájecí frekvence nastavené pro brzdny elektromotor. Průběhy napětí a proudů byly snímány klešťovými ampérmetry a zaznamenávány do paměti osciloskopu. Měření elektrických veličin proběhlo ve třech provozních stavech modelu:

- měření fázových hodnot napětí a proudů nezatíženého elektromotoru s vycentrovaným statorem elektromotoru,

- měření fázových hodnot napětí a proudů zatíženého elektromotoru s vycentrovaným statorem,
- měření fázových hodnot napětí a proudů zatíženého elektromotoru s excentrickým statorem.

8.5 Analýza celkových hodnot vibrací a frekvenčních spekter vibrací

Z výsledků měření celkových efektivních hodnot rychlostí vibrací na ložiskových stojanech elektromotoru, satoru elektromotoru a satoru brzdného elektromotoru, při měření v nezatíženém stavu soustrojí, kdy

rotor elektromotoru je souosý se statorem elektromotoru, je zřejmé postupné snižování celkových hodnot vibrací v důsledku záběhu modelu a vymezení vůlí v celém soustrojí.

Měřením celkových efektivních hodnot vibrací na soustrojí se souosým rotorem a statorem, kdy se elektromotor postupně zatěžoval brzdou, a sledováním trendu celkových hodnot vibrací na ložiskových stojanech, na satoru elektromotoru a na satoru brzdného elektromotoru byly zaznamenány amplitudy vibrací, jejichž hodnoty se pohybují kolem určité střední hodnoty. Jejich charakter je tedy při zatěžování soustrojí v určitém pásmu hodnot ustálený.

Při posunutí rotoru elektromotoru vůči satoru o excentricitu e , a následném zatěžování za stejných podmínek, byly na ložiskových stojanech elektromotoru a na satoru elektromotoru zaznamenány celkové hodnoty vibrací, jejichž amplitudy se exponenciálně zvyšují s rostoucím zatížením. Na satoru brzdy byly zaznamenány amplitudy celkových hodnot vibrací, jejichž hodnoty jsou v průběhu zatěžování ustálené.

Na základě analýzy celkových efektivních hodnot rychlostí vibrací měřených na zkušebním agregátu při třech různých zkušebních podmínkách lze stanovit tyto závěry:

- v počáteční fázi provozu soustrojí dochází k postupnému snižování celkových hodnot vibrací až do určité ustálené hodnoty,
- postupným zatěžováním elektromotoru, jehož rotor je souosý se statorem, nedochází k výraznému zvýšení celkových hodnot vibrací,

- změnou excentricity rotoru a následným zatěžováním dochází ke zvyšování celkových hodnot vibrací po exponenciální křivce.

Měřením frekvenčních složek efektivních hodnot vibrací na frekvenci 100 Hz při nezatíženém souosém rotoru byl indikován snižující se charakter velikosti amplitud vibrací, a to jak na ložiskových stojanech, statoru elektromotoru tak i na statoru brzdy. Postupným zatěžováním souosého elektromotoru jsou generovány amplitudy vibrací na frekvenci 100 Hz, jejichž hodnoty jsou zejména v horizontální rovině ložiskových stojanů, statoru elektromotoru i statoru brzdy ustálené a ve vertikální rovině hodnoty amplitud s rostoucím zatížením klesají.

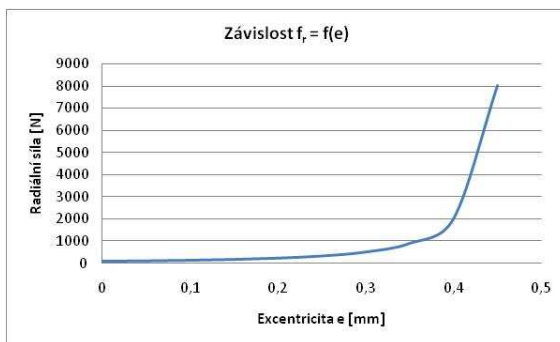
Vyosením rotoru a statoru a následným postupným zatěžováním brzdou jsou hodnoty amplitud vibrací na frekvenčních složkách 100 Hz oproti

hodnotám amplitud vibrací souosého elektromotoru na vyšších úrovních. Charakter amplitud s rostoucím zatížením na frekvenčních složkách 100 Hz měřených na ložiskových stojanech a na statoru elektromotoru je rostoucí. Na statoru brzdy je úroveň vibrací při malém zatížení vysoká, ovšem s rostoucím zatížením úroveň vibrací na frekvenční složce 100 Hz klesá. Z výše uvedeného textu je možné učinit tyto závěry:

- snižování amplitud na frekvenci 100 Hz při nezatíženém provozu soustrojí je důsledkem zabíhání stroje,
- zatěžování souosého elektromotoru nemá výrazný vliv na růst vibrací na frekvenční složce 100 Hz,
- vyosením os statoru a rotoru dochází k výraznému nárůstu hodnot amplitud vibrací na frekvenci 100 Hz a to jak na hnacím elektromotoru, tak i na brzdém elektromotoru,
- postupným zvyšováním zátěže elektromotoru hodnoty amplitud na frekvenci 100 Hz měřené na hnacím elektromotoru stoupají. Na brzdém elektromotoru však s rostoucí zátěží výrazně klesají.

8.6 Vyhodnocení vlivu nesymetrického elektromagnetického pole na vibrace elektromotoru v závislosti na velikosti vzduchové mezery

Radiální síly ve vzduchové mezeře mají v závislosti na velikosti vzduchové mezery průběh daný obrázkem 11. 15. V případě, že se velikost vzduchové mezery snižuje, dochází k nárůstu radiálních sil a v případě, že se velikost vzduchové mezery zvyšuje, dochází ke snížení velikosti radiálních sil a tedy i vibrací.



Obrázek č. 11. 15: Závislost velikosti radiálních sil ve vzduchové mezeře na její excentricitě

Měřením vibrací na zkušebním agregátu byla prokázána shoda tvaru křivky průběhů nárůstů vibrací s průběhem velikostí radiálních sil, získaných matematickým výpočtem, při snižující se velikosti vzduchové mezery v rozsahu hodnot excentricity $e = 0$ až $0,3$ mm.

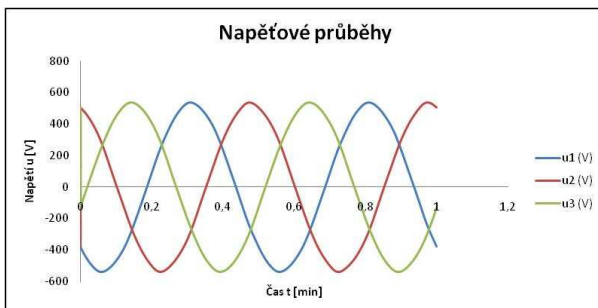
Minimální velikost vzduchové mezery asynchronních elektromotorů je 0,2 mm. Při této velikosti vzduchové mezery působí mezi rotorem a statorem přídavné radiální síly dle vztahu o velikosti 500 N. Budeme-li předpokládat, že hodnota 0,2 mm je hraniční hodnota velikosti vzduchové mezery pro daný typ měřeného elektromotoru, pak hodnota excentricity $e = 0,25$ mm při souměrné velikosti vzduchové mezery $\delta = 0,45$ mm, odpovídající této minimální vzduchové mezeře, je rovněž hraniční hodnotou. Vibrace, které tato excentricita vyvolá, pak můžeme považovat za maximálně přípustné. Protože se excentricita projevuje nárůstem amplitud vibrací frekvenční složky 100 Hz, je nutné posuzovat velikost excentricity vyhodnocením této frekvenční složky. Z grafů získaných měření na zkušebním agregátu, je možné stanovit kritickou hodnotu amplitudy vibrací frekvenční složky 100 Hz, a to nejmenší naměřenou hodnotu amplitudy vibrací, čili $v_{\text{efk}} = 0,75$ mm.s⁻¹. Hodnoty amplitud vibrací frekvenční složky 100 Hz pohybující se nad touto hodnotou lze považovat pro měřený elektromotor za zcela nepřijatelné pro další provozování. Pro hodnotu alarmu vypnutí platí, že nesmí překročit 89 % kritické hodnoty vibrací.

Ze zkušeností získaných z provozních měření na elektrických strojích vyplývá, že zvýšená poruchovost strojů se projevuje zejména při amplitudách frekvenčních složek na 100 Hz, které dosahují hodnot 0,25 mm.s⁻¹, což odpovídá asi 40 % hodnoty alarmu vypnutí, získaného měření na zkušebním soustrojí.

8.6.1 Analýza elektrických veličin

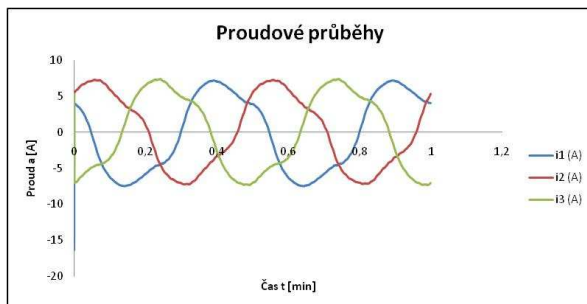
Na nezatíženém elektromotoru se souosým statorem bylo provedeno měření elektrických veličin v sedmi intervalech po 15 minutách. Tímto měřením byla sledována úroveň nejen vibrací, ale i elektrických veličin a teplot jednotlivých uzlů.

Průběh napájecího napětí elektromotoru je v době chodu elektromotoru symetrický a vyhlazený. Napájecí napětí opisuje sinusovou křivku s maximální hodnotou 580 V viz obrázek č. 11. 16.



Obrázek č. 11. 16: Napěťové průběhy nezatíženého a centrického elektromotoru

Průběh fázových proudů vinutí statoru vykazuje v místech stejné úhlové polohy dvou fází mírnou nesymetrii od sinusového průběhu. Maximální hodnota fázových proudů je 8 A. V průběhu záběhu zkušebního modelu se hodnoty elektrických veličin výrazně nemění viz obrázek č. 11. 17.

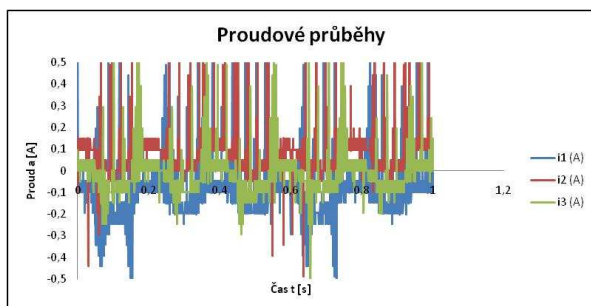


Obrázek č. 11. 17.: Proudové průběhy nezatíženého a centrického elektromotoru

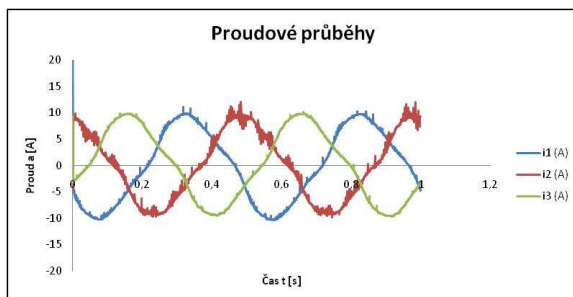
Dále se zkušební elektromotor postupně zatěžoval brzdým elektromotorem prostřednictvím frekvenčního měniče. Zatěžování elektromotoru proběhlo v sedmi krocích, při nichž se postupně snižovala napájecí frekvence brzdného elektromotoru, čímž byl vyvozen brzdový moment. Zatěžování elektromotoru proběhlo až do dosažení jmenovitého proudu elektromotoru.

Na elektromotoru zatíženém brzdným elektromotorem pomocí frekvenčního měniče byly měřeny průběhy fázových napětí. Hodnoty fázových napájecích napětí při zatížení jsou na stejné úrovni jako v nezatíženém stavu. Maximální hodnota napájecího napětí dosahuje úrovně 580 V.

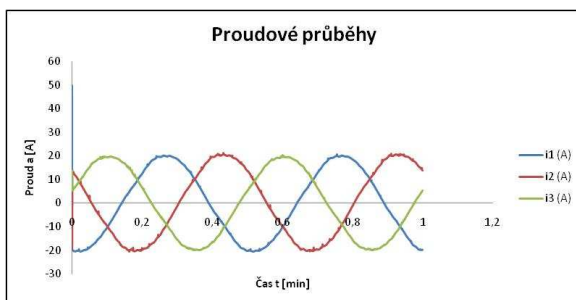
Na průběhu fázových proudů elektromotoru jsou patrné subharmonické amplitudy modulované na nosnou sinusovou křivku napájecího proudu. Maximální hodnoty proudů při zvyšujícím se zatížením rostou lineárně. V průbězích fázových proudů jsou rovněž patrné nelinearity od sinusové křivky, nicméně při zatížení elektromotoru a tím i růstem amplitud proudů se proudové křivky napájecího napětí vyhlazují, viz obrázek č. 11. 18., č. 11. 19. a č. 11. 20.



Obrázek č. 11. 18: Proudové průběhy elektromotoru nezatíženého a napojeného z čtyřkvadrantového měniče.



Obrázek č. 11. 19: Proudové průběhy elektromotoru zatíženého na 30% I_n a napojeného z čtyř kvadrantového měniče

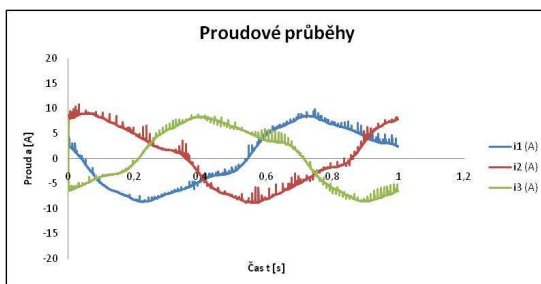


Obrázek č. 11. 20: Proudové průběhy elektromotoru zatíženého na 75% In a napojeného z čtyřkvadrantového měniče

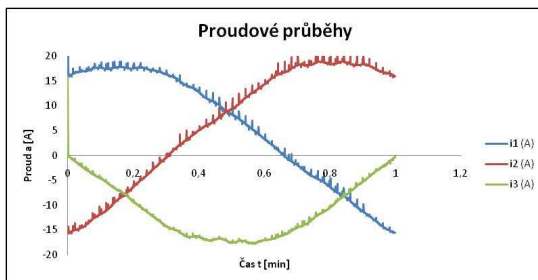
Při dalším měření se stator elektromotoru vůči rotoru vyosil o 0,3 mm a postupně se zatěžoval za stejných podmínek jako u předešlého měření. Napájecí fázová napětí statoru měřená na zatíženém elektromotoru vykazují hladký fázový průběh. Hodnota maximálního napětí dosahuje úrovně 580 V.

Na grafech proudových průběhů zatěžovaného nesouosého elektromotoru jsou patrné zvýšené amplitudy subharmonických složek proudů modulovaných na nosnou napájecí proudovou křivku.

Veškeré výsledky výše uvedených měření jsou duševním majetkem firmy HUDECZEK SERVICE, s. r. o. Albrechtice u Českého Těšína a jsou uloženy v archivu firmy.



Obrázek č. 11. 21: Proudové průběhy elektromotoru nezatíženého a napojeného z čtyřkvadrantového měniče. Vzduchová mezera je excentrická



Obrázek č. 11. 22.: Proudové průběhy elektromotoru zatíženého na 75% In a napojeného z čtyřkvadrantového měniče. Vzduchová mezera je excentrická

8.7 Metodika stanovení kvality symetrie elektromagnetického pole pomocí analýzy vibrací

Provozní praxe při diagnostikování elektrických točivých strojů vyžaduje, zejména v provozech s nebezpečím výbuchu, stanovit takovou metodu zjišťování vad spojených s nesymetrickým elektromagnetickým polem, která umožní bezpečně tyto závady odhalit i při diagnostikování stroje na místě. Jednou z možností je využití vibrační diagnostiky a analýzy frekvenčních spekter vibrací, s jejíž pomocí lze tyto závady odhalit.

Metodika diagnostikování elektromotorů spočívá v analýze velikostí amplitud frekvenčních složek vibrací, které jsou projevem nesymetrického elektromagnetického pole elektromotoru. Postup je následující:

Měření vibrací na elektromotoru při chodu naprázdno

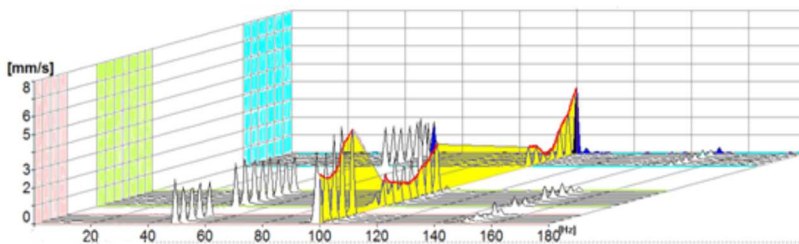
Měřením vibrací a analýzou frekvenčních spekter vibrací lze zjistit hodnoty amplitud vibrací na frekvenční složce 100 Hz, která vypovídá o stavu symetrie elektromagnetického pole. Měření je nutno provádět v horizontální i vertikální rovině na obou ložiscích elektromotoru případně statoru elektromotoru, neboť nesymetrie elektromagnetického pole způsobuje také magnetostrikci statorového tělesa (deformaci způsobenou magnetickými silami). Nastavení frekvenčního rozsahu a vzorkovací frekvence musí být takové, aby bylo možné rozlišit frekvenční složku 100 Hz od frekvenčních složek harmonických násobků otáčkové frekvence.

Měření a analýza vibrací zatíženého soustrojí

Měření a analýza vibrací zatíženého soustrojí je základním předpokladem pro posuzování technického stavu strojů pomocí vibrací. Tato měření dají údržbě základní obraz o stavu stroje, případně o jeho technických závadách. V případě výskytu nesymetrického elektromagnetického pole ve vzduchové mezeře elektromotoru dochází k výraznému nárůstu amplitudy vibrací na otáčkové frekvenci elektromotoru, která se často mylně zaměňuje s nevyvážeností rotorové soustavy. Zda je rotor elektromotoru případně pracovního stroje nevyvážený či nikoli, lze rozeznat sledováním vibrací při odpojení elektromotoru od napájecí sítě. V případě výskytu nesymetrického elektromagnetického pole se amplitudy vibrací na otáčkové frekvenci výrazně sníží.

Kvalitativní vyhodnocení nesymetrie elektromagnetického pole

V dalším kroku je nutné provést kvalitativní vyhodnocení velikostí amplitud frekvenční složky 100 Hz. Posouzení kvality symetrie elektromagnetického pole (EMP) se provede na základě tabulky č. 11. 25, která, stanovuje hraniční hodnoty pro pásmo dobrý, uspokojivý a neuspokojivý.



Obrázek č. 11. 23: Kaskáda frekvenčních spekter vibrací na frekvenční složce 100 Hz měřený v bodě nezatíženého souosého soustrojí, zatíženého souosého soustrojí a zatíženého nesouosého soustrojí

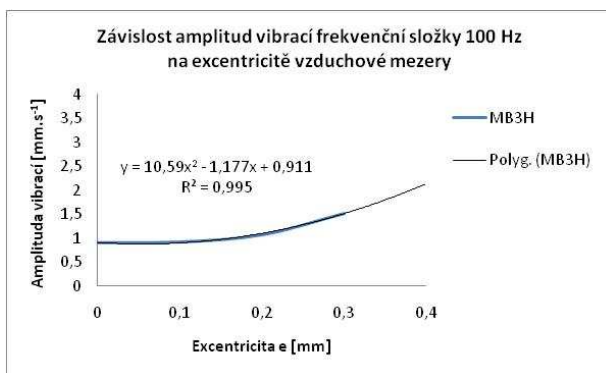
Experimentální měření chvění na agregátu a simulace jednotlivých stavů potvrzuje dlouholetou zkušenost autora knihy při zjišťování nesymetrie elektromagnetického pole asynchronního elektromotoru. Z obrázku č. 11. 23 jsou zřejmé, že při chodu naprázdno (růžový blok) asynchronního

motoru vystupují dominantní harmonické a to na základní otáčkové frekvenci což ukazuje na nevyváženost a na 100 Hz, což je harmonická elektromagnetických záležitosti elektromotoru. Amplituda na 100 Hz je větší než základní harmonická z toho důvodu, že stroj je napojen z měniče, který sám o sobě vyvolává nesymetrii elektrických a elektromagnetických veličin. U elektromotoru napojeného ze symetrické sítě je patrné, že jde o nesymetrii elektromagnetického pole elektromotoru. Záleží na velikosti amplitudy. Elektromotor se musí zatížit a závada se jednoznačně projeví.

Druhým projevem zkoušeného elektromotoru je skutečnost, že při zatížení naroste amplituda nevyváhy a amplituda na 100 Hz se zmenší viz zelený blok.

V modrém bloku při zvětšení excentricity vzduchové mezery amplituda na 100 Hz narůstá. Potvrzuje to opět zkušenost z provozních měření o vlivu excentricity na vibrace.

Na obrázku č. 11. 24 je zobrazena závislost amplitud vibrací frekvenční složky 100 Hz na excentricitě vzduchové mezery. Průběh křivky je exponenciální.



Obrázek č. 11. 24. Závislost amplitud vibrací frekvenční složky 100 Hz na excentricitě vzduchové mezery

Tab. 11. 25: Hranice pásem pro stanovení stavu elektromagnetického pole

Stav nesymetrie	Hranice pásma [mms ⁻¹]	Popis
DOBŘÍ	$\leq 0,27$	Stav EMP bez závad, nebo jen s malými nesymetriemi, které neovlivní kvalitu chodu zařízení.
USPOKOJIVÝ	$> 0,27 \leq 0,67$	Stav EMP se zvýšenými hodnotami parametrů nesymetrie. Elektromotor je možné provozovat za zvláštních podmínek do provedení nejbližší možné opravy, s důrazem na zvýšení intervalů diagnostických kontrol.
NEUSPOKOJIVÝ	$> 0,67$	Stav EMP s nepřijatelnými hodnotami parametrů. Elektromotor za těchto podmínek není možné dále provozovat. Hrozí snížení životnosti a provozní spolehlivosti stroje, případně havárie.

8.8 Experimentální stanovení vlivu nevyváženosti rotoru asynchronního elektrického motoru na vlastní mechanickou soustavu a poháněný mechanismus

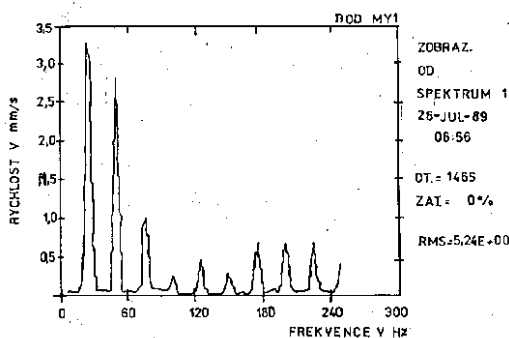
Asynchronní elektrický motor je nejvíce používaným poháněcím mechanismem. Elektrický motor je zdrojem vibrací mechanického i elektrického původu. Chvění elektromotoru nepříznivě působí na poháněný mechanismus a opačně. Při samotném měření chvění elektromotoru se naskytá otázka při jakém zatížení provádět měření. Nebude-li zjišťován stav stroje při rozjezdu, potom je nejlépe měření provádět při obvyklých pracovních podmínkách.

V rámci výzkumného úkolu byla zkoumána závislost chvění na zatížení asynchronního elektromotoru. Na zkušebně byl zkoušen asynchronní nevýbušný elektrický motor typ CWM 200, 30 kW, 500 V, 1458 ot/min., $I_n = 45$ A, $M_n = 220$ Nm. Motor byl připojen na tvrdou síť 3 + PEN, 50 Hz, 500 V, IT. Zatěžování bylo prováděno dynamometrem DS 250 MEZ Vsetín. Měření vibrací bylo prováděno ve čtyřech měřicích bodech po deseti-procentních zatěžovacích intervalech, vibrodiagnostickým přístrojem typu

datakolektor. Elektrický motor byl po nainstalování na dynamometr změřen z hlediska úrovně jeho chvění při chodu naprázdno. Frekvenční analýza změřeného chvění prokázala, že elektrický motor je nevyvážený. Úroveň chvění na první harmonické byla $3,25 \text{ mm/s}^{-1}$. Dále byla zjištěna značná nesouosost neboť druhá harmonická amplituda byla $2,73 \text{ mm/s}^{-1}$, která byla zapříčiněna nesouosým uložením zkoušeného elektromotoru na zkušební stoličce dynamometru. Zároveň byly zjištěny na třetí harmonické o amplitudě $0,97 \text{ mm/s}^{-1}$ mechanické vřůle, což je stav přípustný. Stav valivých ložisek, elektromagnetické pole elektromotoru vykazoval úroveň chvění v oblasti velmi dobrý. Spektrum nezatíženého elektromotoru je zobrazeno na obrázku č. 11. 24. Při každém zvýšení výkonu o 10 % bylo provedeno měření chvění a uloženo do paměti PC.

OBJEKT: 62-VÝZKUM-VLIV ZATÍŽENÍ NA VIBRACE

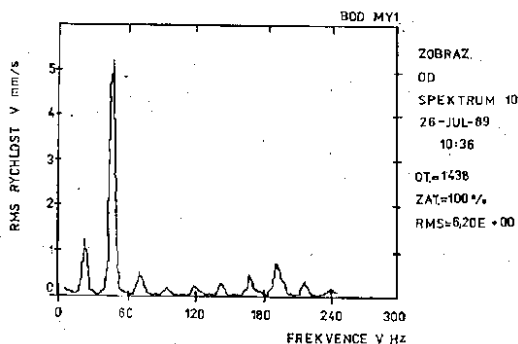
STROJ: ELEKTRICKÝ MOTOR CVM200 30kW



Obrázek č. 11. 26: Spektrum chvění nezatíženého elektromotoru

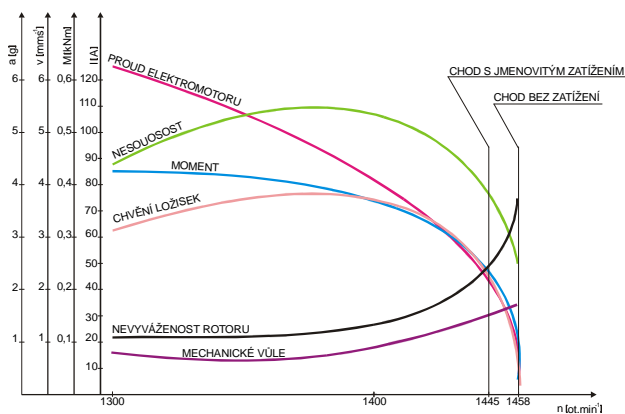
Na obrázku č. 11. 26 je zobrazeno frekvenční spektrum při jmenovitém zatížení. Frekvenční analýza spektra prokázala, že nevyváženost klesla na minimum a narostla na dvojnásobnou hodnotu nesouosost. Elektrický motor byl zatěžován až do třinásobku jmenovitého proudu. Vliv zatížení na chvění je graficky zobrazen na obr. č. 11. 28. Z grafu je vidět, že při chodu naprázdno je velká nevyváženost, středně velká nesouosost a velmi malé mechanické vůle včetně rezonančních frekvencí ložisek, které udávají stav ložiska. Při zatěžování elektrického motoru brzdou, nevyváženost a mecha-nická vůle klesají, narůstá nesouosost a rezonanční frekvence ložisek.

Příčina této změny je v symetrickém točivém elektromagnetickém poli asynchronního elektromotoru, které se snaží přizpůsobit nedokonalý geometrický tvar rotoru dokonalému pomyslnému tvaru točivého magnetického pole. Rotor je magnetickým polem vychylován, v důsledku čehož vzniká nadměrná nesouosost a vznikají nadměrné dynamické síly na ložiscích, které tímto trpí. Tyto síly se přenášejí na poháněný mechanismus a působí na něj destruktivně. Tento závěr platí pro elektromotory s dobrými elektrickými vlastnostmi.



Obrázek č. 11. 27: Spektrum chvění při jmenovitém zatížení elektromotoru

Při měření vibrací elektrických točivých strojů je nutné vždy zjistit zatížení stroje a analýzu spektra provádět s přihlédnutím na zatížení. Proto je velmi výhodné a zároveň i nutné každý elektrický stroj točivý proměřit po vyrobení nebo po opravě jako samostatný prvek, čímž se zjistí jeho stav a následně elektrický motor proměřit jako součást celého soustrojí. Tento postup nepřipustí chybu při analýze výsledků a určení diagnózy stavu. Dále bylo prokázáno, že elektrický motor z hlediska chvění má vliv na poháněný mechanismus a opačně.



Obrázek č. 11. 28: Vliv zatížení na chvění

9 Stanovení maximálně přípustných hodnot vibrací provozovaných strojů

Samotná znalost naměřených hodnot ještě nedovoluje posoudit stav stroje nebo elektromotoru. Teprve porovnání výsledků měření s určitými měřítky pro hodnocení umožní kvalifikované posouzení opotřebení stroje a určení jeho zbytkové životnosti.

V literatuře je rozsáhle pojednáno o stanovení maximálních hodnot vibrací na strojích a zařízeních. V mnohých případech jsou uváděny konkrétní příklady stanovení hodnoty chvění při, které musí být stroj zastaven a opraven. Po provedené analýze různých metod stanovení maximálních přípustných hodnot vibrací lze je rozdělit do pěti skupin:

- nárůst vibrací v určitém násobku referenčního spektra,

- posouzení porovnáním měřených hodnot s mezními hodnotami z norem a směrníc,
- statistické metody výpočtu maximálních hodnot vibrací,
- posouzení měřených hodnot s mezními hodnotami udanými výrobcem stroje,
- posouzení na základě zkušeností a dat, která získal provozovatel u podobných strojů.

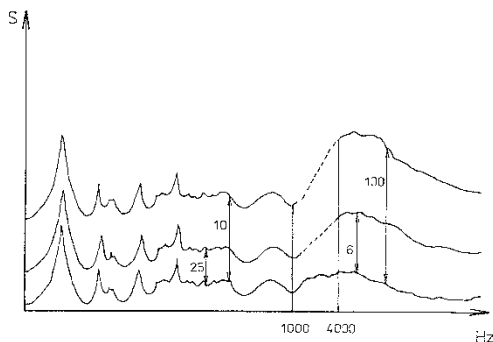
9.1 Nárůst vibrací v určitém násobku referenčního spektra

Dojde-li ke zvýšení amplitudy frekvenčního spektra o 2,5 násobek referenční hodnoty ve frekvenčním rozsahu 0 – 1 000 Hz nutno podle doporučení Brüel & Kjær, viz obrázek č. 13.11, stroj začít diagnosticky sledovat, a pokud dojde ke zvýšení o desetinásobek, nutno stroj zastavit a provést na něm opravu. U frekvenčního spektra v oblasti frekvencí vyšších jak 4 000 Hz, nutno stroj začít sledovat od šestinásobku referenčních hodnot a opravu provést při stonásobku.

Jediným a základním problémem této metody je referenční spektrum. Doposud výrobce neposkytuje referenční spektrum vibrací stroje při jeho prodeji. Jsou provozovatelé, kteří při převímce stroje na vlastní náklady provádějí nebo si nechají provést vibrační diagnostiku. Získají tím referenční spektrum a také se přesvědčí o tom, že koupili dobrý stroj.

Přejímky u výrobců a to jak dílčích dodávek, tak investičních celků jsem zavedl v důlním podniku což přineslo a přináší mnohonásobné úspory. Pro

některé zákazníky provádím přejímky motorů o výkonech stovek kW a napětí 6 kV přímo u výrobce. Také jsem stanovil hodnoty chvění pro tyto motory při převímce a chodu naprázdno. Kromě jistoty, že má kupovaný elektromotor vynikající parametry, má provozovatel referenční spektrum pro další posuzování jeho kvality a opotřebení.



Obrázek č. 13. 11: Referenční spektra

Odhad podle referenčního spektra lze použít jenom v tom případě, že výrobce nebo montážní organizace dodá referenční spektrum stroje jako protokol o provedené výstupní zkoušce.

9.2 Posouzení porovnáním naměřených hodnot s mezními hodnotami z norem a směrnic

Pokud nejsou dlouhodobé vibrace stroje známe a pokud nejsou k dispozici vlastní zkušenosti, lze vzít za podklad pro posuzování mezní hodnoty vibrační hodnoty z norem a směrnic, např.:

- VDI 2056, VDI 2059
- ISO 2372, ISO 2373
- DIN 45670
- API 610, 611, 612, 613, 616, 617, 672, 673
- CDA/MS/NVSH 107
- ČSN ISO 10816 – 1, Vibrace – Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 1: Všeobecné směrnice, ČNI 1998, s. 22.
- ČSN ISO 10816 – 2, Vibrace – Hodnocení vibračních strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 2: Velké stacionární parní turbogenerátory s výkonem nad 50 MW, ČNI 1998, 1 s.

- 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 15 000 1/min při měření in situ, ČNI 1999, s. 15.
- ČSN EN 60034 – 14, Točivé elektrické stroje – Část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm – Měření, hodnocení a mezní hodnoty vibrací, ČNI 1998, s. 19.
- ČSN IEC 300- 3 - 9, Management spolehlivosti, Část 3: Návod k použití, Oddíl 9: Analýza rizika technologických systémů, ČNI 1997, s. 28.
- a celá řada dalších.

Nejjednodušší je v rámci systematického uspořádání pro posouzení přijmout rozdělení na následující skupiny strojních systémů v souladu s VDI 2056, které patří k jednomu z nejpoužívanějších a samozřejmě nejstarších:

Strojní systémy do 300 kW

- pevné uložení – skupina M
- pružné uložení – skupina G

Strojní systémy nad 300 kW

- pevné uložení – skupina G
- pružné uložení – skupina T

U elektrických strojů točivých, lze rozdělení respektovat podle velikosti otáček (do 1 200 ot/ min a nad 1 200 ot/min.).

Shrnutí problematiky norem a doporučení pro stanovení dovolené meze vibrací

V tabulce č. 13. 12 je provedeno srovnání jednotlivých norem a doporučení na strojní součásti. Nejnížší hodnoty jsou uvedeny pod pořadovými čísly 1 a 4. ČSN 01 1412 lze zařadit mezi normy, které posuzují kmitání v horní oblasti rozsahu jednotlivých parametrů.

V tabulce č. 13. 13 je provedeno srovnání jednotlivých norem a doporučení pro elektrické stroje točivé. Nejnížší hodnoty udává pořadové číslo 2. Nejvyšší hodnoty udává pořadové číslo 3 a 4.

Tabulka č. 13. 14 jsou uvedeny mezní hodnoty valivých ložisek strojních systémů podle VDI 2056 a mezní hodnoty mohutnosti kmitání.

Velkým nedostatkem všech těchto norem a doporučení je ta skutečnost, že dělení na jednotlivé stavy je hrubé a nezahrnuje o stroji údaje jako např. hmotnost rotujících částí na ložiscích, typ ložiska a počet otáček. Dále normy a doporučení neuvádějí, jakým způsobem provádět výpočet doby provozu do dovršení max. hodnoty vibrací. Toto hodnocení norem jsem publikoval poprvé v roce 1989 a to doma i v zahraničí.

Posuzování max. hodnoty vibrací, při které má dojít k zastavení stroje, musí být prováděna na základě širokého spektra zkušeností a různých norem

a doporučení. Jednotlivé normy jsou zpracovány pro určité druhy strojů a taktéž provozů, ve kterých pracují.

Nejpropracovanější normou se jeví doporučení kanadské vlády pro opravy CDA/MS/NVSA 107 viz tabulka č. 13. 15. Na první pohled se jeví jako přísné pro stroje nové. Tato přísnost je opodstatněna tím, že stroj musí být z továrny dopraven a smontován přímo v místě své činnosti. V průběhu dopravy a montáže působí na stroj negativní vlivy, které zhoršují jeho technický stav.

Na základě mnoholeté zkušenosti s aplikací tohoto standardu lze doporučení kanadské vlády aplikovat pro těžký provoz v celém rozsahu.

Tabulka č. 13. 12: Srovnání doporučených mezních hodnot podle různých parametrů pro strojní pohony

Název pramene	Skupina strojního systému							
	M		G – pružné do 300 kW		G – pevné nad 300 kW		T	
	V [mm/s]	s [μm]	v [mm/s]	S [μm]	v [mm/s]	s [μm]	v [mm/s]	s [μm]
VDI 2056	7,1	160	11	250	11	250	18	400
ISO 2372	7,1				11,2			
ISO 3845					11,1		18,3	
John S. Mitchel	15 [mm/s]				250 [μm]			
IRD	4 [mm/s]				410 [μm]			
T. C. Rathborn					250 [μm]			
E. Federn					50 [μm]			
Brül Kjær	4,5 [mm/s]				100 [μm]			
VDI 2059 list 3					210 [μm]			
VDI 2060	Nelze takto určit, neboť platí: (e, x – určováno typem stroje) v = eω S = x Q							
CDA/MA/NVSH 107	v = 0,56 [mm/s] 115 [dB]							
Lit. [22]	118 [dB]							
VDI 2056	145 [dB]		141 [dB]		141 [dB]		145 [dB]	
ČSN 01 1412 STSEV 1368-78	Tuhý systém 11,2 [mm/s] Pružný systém 18[mm/s] (nad 300 kW, rozsah 10 ÷ 1000 Hz)							

Tabulka č. 13. 13.: Srovnání doporučených mezních podle různých parametrů pro elektrické stroje točivé

Pořadové číslo	Název pramene	Elektrický stroj točivý (elektromotory)	
		do 1200 [1/min]	nad 1200 [1/min]
1.	DIN ISO 2373	1,8 ÷ 4,5 [mm/s]	
2.	CDA/MA/NVSH 107	0,25 [mm/s] 108 [dB]	0,14 [mm/s] 103 [dB]
3.	ISO 2372	7,1 [mm/s]	
4.	ČSN 35 0091, STSEV 2412-80	1,8 ÷ 7,1 [mm/s]	

Tabulka č. 13. 14.: Mezní hodnoty valivých ložisek strojních systémů podle VDZ 2056 a mezní hodnoty mohutnosti kmitání

Typy strojů, na nichž je měřena celková rychlost	Nové stroje				Stroje nasazené do provozu (na plné otáčky a výkon)			
	trvale nasazené		krátkodobě nasazené		inspekční kontrola – úroveň hladiny		modernizace	
	v [dB]	[mm/s]	v [dB]	[mm/s]	v [dB]	[mm/s]	v [dB]	[mm/s]
1	2		3		4		5	
Motorgenerátor	120	1,0	130	3,2	135	5,6	140	10
Čerpadla								
Nad 3,7 kW	123	1,4	135	5,6	140	10	145	18
Do 3,7 kW	115	0,56	130	3,2	135	5,6	140	10
Elektromotory								
Nad 3,7 kW nebo pod 1200 ot/min	108	0,25	125	1,8	130	3,2	135	5,6
Do 3,7 kW nebo nad 1200 ot/min	103	0,14	125	1,8	130	3,2	135	5,6
Transformátory								
Nad 1 kVA	103	0,14	-	-	115	0,56	120	1,0
1 kVA a nižší	100	0,1	-	-	110	0,32	115	0,56
Kompresory								

přímé, pístové	140	10	150	32	150	32	155	56
vysokotlaké	133	4,5	140	10	140	10	145	18
nízkotlaké	123	1,4	135	5,6	140	10	145	18
chladicí	115	0,56	135	5,6	140	10	145	18
Diesलगenerátory	123	1,4	140	10	145	18	150	32
Převodovky 120								
nad 7460 kW	120	1,0	140	10	145	18	150	32
7,5 ÷ 7460 kW	115	0,56	135	0,56	145	18	150	32
do 7,5 kW	110	0,32	130	3,2	140	10	145	18

Vysvětlivky k tabulce č. 13. 15:

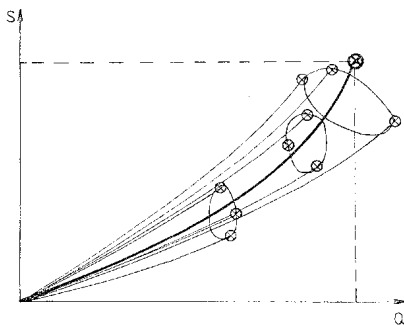
- dlouhá době provozu je od 1 000 do 10 000 hodin
- krátká doba provozu je od 100 do 1 000 hodin
- když nastane tato úroveň, nutno provést opravu nebo provádět ve zkrácených termínech diagnostická měření
- když nastane tato úroveň, nutno provést generální opravu

9.2.1 Statistické metody výpočtu maximálních hodnot vibrací

Na základě statistických metod lze určit dvě skutečnosti:

- křivku života stroje
- maximální přípustnou úroveň vibrací

Křivka života zobrazena na obr. č. 13. 16 je výsledkem pozorování strojů $N \gg 1$ anebo mnoho provozně opravárenských cyklů.



Obrázek č. 13. 16: Křivka života stroje

Křivka je střední křivkou života stroje, která je čtyřparametrickým procesem autoregrese, kde:

$$S = S(\tau, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4) \quad (13.18)$$

S – maximální hodnota vibrací – havarijní

ω_1 – parametr rozptylu kvality výroby

ω_2 – parametr rozptylu kvality dynamického uložení

ω_3 – parametr rozptylu provozního zatížení

Křivka života stroje končí havárií stroje. Pro zabránění této havárie lze vypočítat havarijní hodnotu S_b a na základě výpočetní metody Neymana – Pearsona.

$$P_g \int_{S_b}^{\infty} p(s) ds = A \quad (13.19)$$

$$P_g = \frac{\tau_{ch}}{\tau_{ch} + \tau_0} \quad (13.20)$$

P_g – pohotovost

τ_{ch} – střední doba chodu stroje mezi poruchami [hod]

τ_0 – střední doba oprav [hod]

S_b – havarijní hodnota vibrací [mms^{-1}]

A – procento vynechaných oprav (opravárenská politika závodu, A se doporučuje 2 až 5 %)

$P(S)$ – hustota pravděpodobnosti rozdělení hodnoty vibrací

Řešením rovnice (13.19) a při použití rozdělení Weibulla (W), Pareto (P) anebo použitím nerovnosti Chebyscheva (C) pro havarijní hodnotu vibrací obdržíme vztahy:

$$S_b^{(c)} = S + \tau \sqrt{\frac{P_g}{2A}} \quad (13.21)$$

$$S_b^{(C)} = S_n + (\ddot{S} - S_n) \Gamma^{-1} \left(1 + \frac{1}{K} \right) K \sqrt{\ln \frac{P_g}{A}} \quad (13.22)$$

$$K = \frac{\ddot{S} - S_n}{\sigma} \quad (13.23)$$

Γ – funkce gama (v tabulkách)

$$S_{(p)} = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) S \sqrt{\frac{P_g}{S}} \quad (13. 24)$$

$$\gamma = 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{S}{\sigma}\right)^2} \quad (13. 25)$$

τ = standardní odchylka

γ = střední hodnota vibrací [mms^{-1}]

Po překročení havarijní hodnoty vibrací je pravděpodobné, že stroj bude zničen.

Statistické metody nutno nadále v praxi ověřovat. Jak již bylo uvedeno, pro realizaci statistických metod v praxi nutno mít k dispozici $N > 1$ strojů. Pro vypovídající statistický výpočet je nutné mít k dispozici alespoň kolem cca 30 stejných strojů s přibližně stejnými provozními podmínkami, aby bylo možné určit křivku života stroje. Při tom je nutné dodržet podmínku, že jeden ze strojů bude provozován až do havárie. Tuto podmínku nelze splnit v těžkém průmyslu dost dobře. Výstavba provozoven se provádí jednou za desetiletí, což způsobuje rozličnost základních prostředků. V těžkém průmyslu jsou stejné základní prostředky, ale podmínky provozování jsou odlišné.

Dále nutno podotknout, že Weibullovo rozdělení vzniklo na základě zkoušek únavy a opotřebení dílčích částí strojů. Paretovo rozdělení vzniklo pro potřeby ekonometrie pro posouzení rozvoje a seskupení např. bakterií, měst, továren, organismů a organizací.

9.2.2 Stanovení maximálně přípustných hodnot vibrací ze zatížení ložiska

Výše zmíněné metody pro stanovení mezních hodnot vibrací udávají jen hrubé výsledky a často jen doporučený interval hodnot. Tyto metody nezohledňují zatížení ložisek ani jejich otáčky. Proto na základě zkušeností při provádění měření vibrací jsem navrhnul postup stanovení mezních hodnot vibrací vycházející ze zatížení ložisek. Tento postup lze aplikovat pouze na stroje, které při uvedení do provozu, tj. nové stroje nebo po opravě, splňují tyto podmínky: rotující hmoty musí být vyvážené, hnací a hnaný agregát musí být souosý, štíty elektromotorů, čerpadel, vývěv musí být souosé, jednotlivé mechanické části nesmí mít mechanické vůle. Z těchto důvodů při uvádění nových nebo opravených strojů do provozu celková hodnota rychlosti vibrací nesmí být větší než $v_{ef}=1,8 \text{ mm/s}$ ve

frekvenčním rozsahu od 2 do 1000 Hz a ve frekvenčním rozsahu od 300 do 15 000 Hz nesmí být větší než $a_{peak}=2 \text{ mms}^{-2}$.

Při dodržení podmínek maximální vyváženosti, souososti a minimálních vůlí dochází pouze k pravidelnému a známému opotřebení ložisek. Z tohoto důvodu lze přijmout sledování stavu ložisek za dobře vypovídající informaci o stavu stroje. Opotřebení ložisek nutno sledovat v rozsahu jejich rezonančních frekvencí, tj. ve frekvenčním pásmu od 300 do 15 000 Hz.

Někteří výrobci strojů definují pro své výrobky maximální hodnoty kmitání, posunů a teplot. Tyto mezní hodnoty udávají konstrukčně podmíněná přípustná zatížení stroje. Opírají se buď o výpočty, nebo o statistická vyhodnocení dlouhodobých zkoušek u výrobce. Takovýchto hodnot je třeba pro posouzení stavu stroje přednostně využít.

Stanovení maximálních hodnot vibrací vychází z rovnice trvanlivosti ložiska:

$$L_n = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{c}{p} \right)^{n_1} \quad (13. 26)$$

L_n - základní trvanlivost v provozních hodinách [hod]

c - základní dynamická únosnost ložiska [N]

p - ekvivalentní dynamické zatížení [N]

n_1 - pro kuličky = 3, ostatní = 10/3

n - otáčky [min^{-1}]

Je ještě uváděna hodnota L_n na modifikované L_{na} , např. podle teorie SKF. Moje teorie byla zpracována již v roce 1989.

V klasické fyzice platí vztah pro sílu

$$F = m \cdot a \quad (13. 27)$$

F – síla [N]

m – hmotnost [kg]

a – zrychlení [mms^{-1}]

Dále je možno přijmout úvahu, že ekvivalentní dynamické zatížení P je rovno síle F

$$P = F \quad (13. 28)$$

Řešením vztahů (13.26) a (13.27) obdržíme nový vztah pro výpočet max. bezpečné hodnoty vibrací:

$$a = \frac{c}{m \cdot n_1 \sqrt{\frac{L_n \cdot n \cdot 60}{106}}} \quad (13. 29)$$

a – max. bezpečná hodnota vibrací [ms^{-2}]

c – základní dynamická únosnost ložiska [N]

m – celková hmotnost na ložisku [kg]

n_1 – pro kuličková ložiska $n_1 = 3$, pro válečková, jehlová, kuželíková a soudečková $n_1 = 10/3$

L_n – základní trvanlivost v provozních hodinách pro každý stroj udává výrobce

n – počet otáček [min^{-1}]

Při dosažení této max. bezpečné hodnoty přechází opotřebení stroje do nekontrolovatelného režimu, který nelze popsat známými zákonitostmi. Alarmující hodnota vibrací se stanoví při dosažení 89 % max. bezpečné hodnoty. Doba, za kterou dojde k dosažení max. bezpečné úrovně vibrací, se vypočte ve vztahu:

$$p = a - \sqrt{h - 2kt} \quad (13. 30)$$

p – změřená hodnota vibrací [mms^{-2}]

a – max. bezpečná úroveň vibrací [mms^{-2}]

h, k – parametry regresní funkce

t – doba, kdy dojde k dovršení max. bezpečné úrovně vibrací [hod]

Tento přepočít musí být proveden po každých třech měřeních. Měření musí být prováděno na aparatuře, která poskytuje možnost provádění frekvenčních analýz od 2 do 1000 Hz. Při každém měření musí být vždy snímána celá frekvenční spektra. Dále aparatura musí umožňovat měření rezonančních frekvencí do 20 kHz.

Příklad výpočtu maximální hodnoty vibrací

Nejdůležitějším strojem v důlním podniku je hlavní důlní ventilátor. Z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti jsou vždy dva hlavní důlní ventilátory a každý z nich musí být napojen z nezávislého zdroje elektrické energie. Státní báňská správa svými předpisy stanoví, že jednou měsíčně musí být provedena zkouška funkčnosti záložního ventilátoru a jednou ročně musí být každý ventilátor zkontrolován po mechanické stránce (ložiska, oběhové kolo, atd.).

Na jednom z dolů hlavní důlní ventilátor č. 1 měl být zastaven a podroben roční fyzické revizi. Z hlediska nepříznivých poměrů v důlní poli nebylo možno ventilátor po dobu šesti měsíců zastavit a spustit na záložní, a proto musel být provozován bez zastavení. Přesto, že oba ventilátory byly diagnosticky sledovány, v nařízení hlavního inženýra podniku byla bezpečnost a spolehlivost ventilátoru převedena na výsledky vibro-

diagnostického měření. Ventilátor byl proměřován v sedmidenních intervalech. Stanovení maximální bezpečné hodnoty vibrací pro hlavní ventilátor č. 1 bylo provedeno v rozsahu od 300 Hz do 15 000 Hz pro hodnoty vibrací ve zrychlení [ms^{-2}] (tíže zemská $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$). Důvodem byla skutečnost, že ventilátor v pásmu od 0 Hz do 300 Hz měl hodnotu vibrací menší než $1,8 \text{ mms}^{-1}$. Byl dobře vyvážený, souosý a bez mechanických vůlí, tím šlo pouze o určení, kdy ložisko bude natolik opotřebované, že stroj musí být zastaven a opraven. Stanovení maximální bezpečné hodnoty vibrací bylo provedeno pouze pro ložisko V3, mělo ze čtyř ložisek největší hodnotu vibrací (předpokládá se, že ostatní ložiska nikdy nenabudou větších hodnot). Ložisko V3 je u oběžného kola.

Technické parametry ventilátoru:

- typ ventilátoru: ARA – 2180
- výkon motoru: 1,6 MW
- průměr oběžného kola: 3 550 mm
- základní dynamická únosnost kontrolovaného ložiska: $C = 1160\,00 \text{ N}$
- celková hmotnost hmot na ložisku $m = 2\,802 \text{ kg}$
- $n_1 = 3,33$
- základní trvanlivost, kterou udává výrobce: $L_n = 8\,000 \text{ hod}$
- počet otáček: $n = 421 \text{ ot/min}$
- připravenost: $P_g = 1,0$

- procento vynechaných oprav: $A = 0,03$

Datum měření	Bod VY3 [g]	Počet dnů
15. 2. 89	0,580	
19. 5. 89	0,514	42
30. 6. 89	0,486	93
9. 11. 89	1,016	132

Tabulka č. 13. 10: Naměřené hodnoty, kde vibrace jsou uvedeny v tíži zemské g a v pásmu od 300 Hz do 15 000 Hz

S_b Pareto	S_b Chebysch.	S_b Weibull	dopor IRD	vztah 1.máj
1,140	1,535	2,103	2 - 12	8,4

Tabulka č. 13.11: Vypočtené a odečtené hodnoty podle vztahů a doporučení uvedených v dřívějších kapitolách.

Z tabulek je jednoznačné, že hodnoty vypočítané podle vztahů Cempela tvoří jednu skupinu hodnot, které jsou min. větší od poslední naměřené. Doporučení IRD pro stav, kdy stroj je nutné zastavit má velký rozptyl. Hodnota vypočtená podle mého vztahu je značně větší, než hodnoty naměřené, ale je uprostřed hodnot, které doporučuje IRD. Jako autor vztahu pro hodnocení maximální přípustné hodnoty vibrací jsem doporučil ventilátor provozovat do hodnoty 8,4 g. Předpokládaná doba, kdy vibrace nabudou hodnoty alarmující, to je 89 % maximální bezpečné hodnoty, je vypočítaná podle vztahu, který je min. upraven pro možnost vyřešení hodnoty t .

Postup výpočtu:

$$p_1 = a - \sqrt{h - 2kt_1} \quad (13. 31)$$

$$p_2 = a - \sqrt{h - 2kt_2} \quad (13. 32)$$

p_1 – předposlední hodnota vibrací viz tabulka č. 4.10, $g = 0,486 \text{ mms}^{-1}$

p_2 – poslední hodnota vibrací viz tab. č. 4.10, $g = 1,016 \text{ mms}^{-1}$

t_1 – počet dnů k předposlednímu měření, $t_1 = 42$ dnů

t_2 – počet dnů k poslednímu měření, $t_2 = 132$ dnů

a – maximálně bezpečná hodnota vibrací podle (4.29), $a = 0,5 \text{ g}$

h, k – parametry regresní funkce

Dosazením do rovnic (13.31) a (13.32) a jejich vzájemným řešením obdržíme hodnoty parametrů, které jsou: $h = 66,41$ $k = 0,045$

Pro výpočet předpokládané doby t , kdy vibrace nabudou alarmující hodnoty, platí vztah:

$$p_3 = a - \sqrt{h - 2kt} \quad (13.33)$$

p_3 – alarmující hodnota vibrací, 89 % z 8,4 = 7,5 g

h, k – vypočtené parametry regresní funkce

t – předpokládaná doba, kdy vibrace nabudou alarmující hodnoty [hod]

Dosazením do vztahu (13.33) a jeho řešením hodnota

$$t = 728,7 \text{ dnů} = 1,9 \text{ roku}$$

Výpočtem předpokládané doby, kdy vibrace nabudou alarmující hodnoty, nabude diagnostik na první pohled jistoty, že stroj bez velkého rizika může provozovat dál. Důkladnou analýzou základního vztahu (13.29) se diagnostik přesvědčí, že při různých vstupních hodnotách vztah je velice

variabilní. Přes tyto jeho nevýhody, je první reálnou informací o době, po kterou stroj může být provozován. Při doplnění vztahu provozními zkušenostmi je dobrou podporou diagnostického rozhodování. Vztah nezahrnuje empirie, ale skutečné hodnoty.

Z dosavadních experimentů a praxe vyplývá, že při určování maximálních hodnot vibrací – prognózování, nutno mít na zřeteli všechny dostupné metody, tj. referenční spektrum normy a doporučení, statistické stanovení havarijních hodnot vč. nové popsané metody.

Ověření správnosti některé z metod musí být potvrzeno havárií stroje. Avšak tak drahé experimenty si zřejmě nikdo nedovolí. Havárie stroje nastane zřejmě nahodile, nečekaně. Pokud je stroj diagnosticky sledován, lze jednoznačně křivku života potáhnout od posledního měření a tím obdržet hodnotu vibrací, při které došlo k havárii. Tato hodnota, přepočtená na bezpečnou mez by byla závazná pro ostatní stroje.

Vytvoření banky dat s hodnotami, při kterých došlo k haváriím a ty následně zobecnit by stejně nebylo správné. Tento způsob by byl možný jen pro jednoho provozovatele. Ne u všech organizací je stejná kultura péče o hmotný majetek a stejné dodržování technických podmínek výrobce. Je jednoznačné, že prognózování musí být individuální záležitostí pro každý stroj a zařízení.

Závěrem nejdůležitější kapitoly nutno říci, že doposud nebyl nalezen matematický model, pomocí kterého by bylo možno popsat zkušenost diagnostika analytika. Při posuzování úrovně vibrací nutno vycházet z referenčního spektra, norem a analytického vzorce. Nejdůležitějším faktorem je diagnostik analytik. Musí znát provoz, který diagnosticky kontroluje, přístup technického štábu k údržbě, úroveň údržbářů a především musí mít sám velké provozní zkušenosti. Tyto faktory jsou základem pro stanovení konečné diagnózy vycházející z provozní diagnostiky.

Chceme-li aplikovat tento vztah u strojů se složitou kinematikou jako je například dobývací kombajn, který obsahuje převodová ústrojí, musíme do zatížení ložiska zahrnout všechny síly vznikající v ozubených převodech.

V ozubených převodech (v místě styku ozubených kol) vzniká síla, jejíž velikost je funkcí přenášeného výkonu, frekvence otáčení a průměru ozubeného kola. Velikost této kontaktní síly lze nejjednodušeji spočítat podle vztahu:

$$F = \frac{P}{\pi \cdot f \cdot D} \quad (13.34)$$

kde:

F kontaktní síla v ozubeném převodu [N]

P přenášený výkon [W]

f frekvence otáčení ozubeného kola [Hz]

D střední průměr ozubeného kola [m]

Pro určení zatížení radiálního ložiska uvažujeme pouze radiální složku této síly (při ozubeném převodu se šikmým ozubením vzniká i axiální složka). Tuto sílu lze přenést z poloměru ozubeného kola do osy, přičemž můžeme zanedbat krouticí moment. Tímto získáme radiální sílu od ozubeného převodu umístěnou v ose ozubeného kola. Zatížení jednotlivých ložisek určíme jednoduchým pákovým pravidlem.

9.2.3 Určení maximálně přípustných hodnot vibrací pro diagnostikovaná ložiska stroje se složitou kinematikou

Výše popsaná metoda určení mezních vibrací byla aplikována na diagnostikovaný dobývací kombajn a následně na veškeré kombajny, které byly důlním podnikem provozovány.

Pro všechna diagnostikovaná ložiska bylo propočítáno zatížení od ozubených převodů a vypočítána maximální přípustná hodnota vibrací. Výsledky jsou v tabulce č. 13. 12. Tyto frekvence byly spočteny pomocí programu TEC, který byl dodán s celkovým balíkem programů.

V tabulce je uvedeno i dílčí zatížení ložiska od jednotlivých ozubených kol: F_1 od bližšího ozubeného kola a F_2 od vzdálenějšího ozubeného kola. V prvním a druhém řádku tabulky č. 13. 12. mezi hodnotami F_1 a F_2 je uveden symbol „ \perp “, který naznačuje, že hodnoty F_1 a F_2 nutno sečítat vektorově (pro úhel 90°).

Do celkového zatížení ložiska by měly být započítány i síly od hmotnosti hřídele a ozubených kol. Vzhledem k přenášenému výkonu 160 kW jsou tyto síly o jeden až dva řády menší a proto byly ve výpočtech zanedbány.

Tabulka č. 13. 12 Maximální přípustné vibrace kombajnu

Měřicí body číslo	Číslo ložiska	Označení ložiska	Zákl. otáčková frekvence na hřídeli [Hz]	Dílčí zatížení N		Celkové zatížení [N]	Max. vibrace [g]
				F_1	F_2		
7;15	15	22 232	8,8	$\frac{50}{39} \cdot 16536$	$\perp \frac{9}{39} \cdot 31800$	22 450	5,7
6;17	18	22 230	8,8	$\frac{48}{39} \cdot 31800$	$\perp \frac{11}{39} \cdot 16540$	39 450	2,4
6;17	19	22 320	5,0	$\frac{27}{40} \cdot 3180$	$\frac{13}{40} \cdot 47160$	36 800	3,1
5;16	20	22 226	5,0	$\frac{53}{40} \cdot \frac{1}{2} \cdot 47160$	$\frac{13}{40} \cdot \frac{1}{2} \cdot 31800$	36 450	2,9

4;18	21	22 226	3,2	$\frac{1}{2} \cdot 47160$	$\frac{1}{2} \cdot 47370$	47 300	2,5
3;19	22	22 226	3,2	$\frac{1}{2} \cdot 47370$	$\frac{1}{2} \cdot 47370$	47 400	2,5
2;21	23	23 052	2,3	47370	0	47 400	7,2
2;21	24	22 222	0,54	$\frac{20}{36} \cdot \frac{1}{2} \cdot 12400$	$\frac{20}{36} \cdot \frac{1}{2} \cdot 58950$	19 850	7,5
1;20	25	23 052	0,54	$\frac{56}{36} \cdot 12400$	$\frac{56}{36} \cdot 58950$	111 000	4,7

Výjimkou jsou jenom ložiska výstupního hřídele, na kterém se nachází rozpojovací válec se značnou hmotností (1 240 kg). Působení hmotnosti tohoto válce bylo zahrnuto do celkového zatížení ložisek č. 24 a 25 (poslední dva řádky tabulky).

Maximální přípustné hodnoty vibrací uvedené v tabulce č. 13. 12, byly zaokrouhleny na prvním desetinném místě „směrem dolů“.

9.2.4 Analýza naměřených hodnot

Analýza naměřených hodnot je prováděna po přenesení naměřených hodnot z datakolektoru do nadřazeného počítače. Základem pro posouzení stavu měřeného stroje je zde výpis střední hodnoty rychlosti kmitání (mohutnosti kmitání) a dosažené špičkové hodnoty zrychlení kmitání a to ve dvou pásmech: 0,3 – 1,25 kHz a 1,25 – 15 kHz pro každý měřící bod. Hodnoty mohutnosti kmitání jsou uváděny v mms^{-1} a hodnoty max. zrychlení kmitání v g (tíhové zrychlení). Podle doporučení je stroj vykazující špičkové hodnoty zrychlení vibrací v rozmezí:

- 0 – 1 g vyhovující
- 1 – 4 g poškozen, vyžaduje opravu
- > 4 g havarijní stav, okamžité odstavení stroje

Dle výše uvedeného doporučení lze ložiska s apeak do 1 g považovat za vyhovující. Překročil-li hodnota apeak 1 g, ložisko vyžaduje důkladnější analýzu jeho stavu. Toto doporučení jsem přejal a aplikoval. Vyhovuje skutečností.

Výpis hodnot měření a analýza dvou měřících bodů s nejhoršími naměřenými hodnotami (body K18, K19) je na obrázcích č. 13. 33., 13. 34., 13. 35.

Ve výpisu naměřených hodnot (obrázek č. 13. 33) je zřejmé, že hodnoty nasnímané v měřících bodech K13, K14, K15, K18 a K19 překročily hranici 1 g. Avšak jako příklad další analýzy je udává pouze analýza bodů K18 a K19 – obrázek č. 13. 34., obrázek č. 13. 35. Oba obrázky uvádějí průběh mohutnosti kmitání v závislosti na frekvenci a průběh špičkové hodnoty zrychlení kmitání v závislosti na frekvenci.

Ideální průběh mohutnosti kmitání by měl být plynule exponenciálně klesající. V obou případech však vidíme skok na křivce mohutnosti kmitání pro frekvenci 2,81 Hz - odpovídá základní otáčkové frekvenci a současně vidíme i skok pro frekvenci 39,8 Hz, který je výrazněji patrný z průběhu špičkové hodnoty zrychlení kmitání (dolní graf). Tento nárůst hodnot a_{peak} při frekvenci 39,8 Hz signalizuje poškození ložisek.

Z analýzy bodů K18, K19 lze vyvodit závěr, že oba měřící body (jim odpovídající ložiska) vykazují nesouosost a poškozená ložiska.

Ideální průběh mohutnosti kmitání by měl být plynule exponenciálně klesající. V obou případech však vidíme skok na křivce mohutnosti kmitání pro frekvenci 2,81 Hz - odpovídá základní otáčkové frekvenci a současně vidíme i skok pro frekvenci 39,8 Hz, který je výrazněji patrný z průběhu špičkové hodnoty zrychlení kmitání (dolní graf). Tento nárůst hodnot a_{peak} při frekvenci 39,8 Hz signalizuje poškození ložisek.

Z analýzy bodů K18, K19 byl vyvozen závěr, že oba měřící body (jim odpovídající ložiska) vykazují nesouosost a poškozená ložiska. Rameno kombajnu bylo vyměněno komplexně za nové.

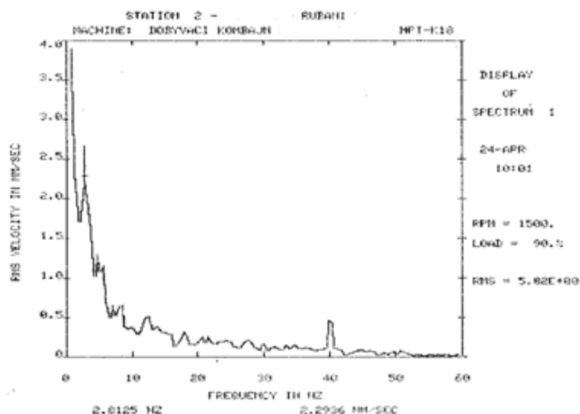
Abbreviated Last Measurement Summary

Station: RUBANI
Report Date: 24-MAY-90 08:41

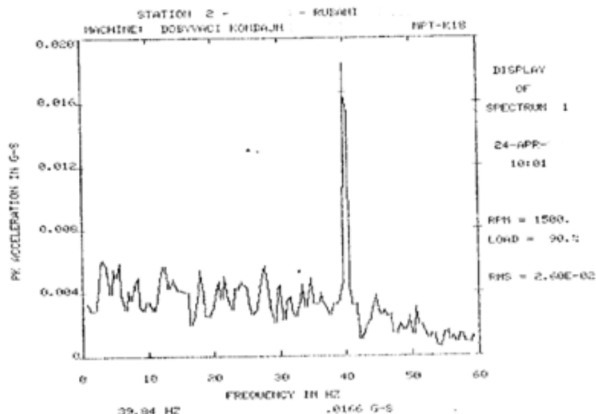
MEASUREMENT POINT	OVERALL VIBRATION	LOW FREQ BAND (0.3 - 1.25 KHZ)	HIGH FREQ BAND (1.25 - 15. KHZ)
----------------------	----------------------	-----------------------------------	------------------------------------

DOBYVACI KOMBIAJN		(24-APR-90) (RPM = 1500.)	(LOAD = 90.%)
K01	1.712 MM/SEC	.535 G-S	.163 G-S
K02	1.104 MM/SEC	.235 G-S	.023 G-S
K03	.912 MM/SEC	.179 G-S	.045 G-S
K05	1.445 MM/SEC	.445 G-S	.135 G-S
K06	.856 MM/SEC	.289 G-S	.038 G-S
K07	.564 MM/SEC	.511 G-S	.215 G-S
K08	.893 MM/SEC	.655 G-S	.693 G-S
K09	2.344 MM/SEC	.601 G-S	.282 G-S
K10	3.324 MM/SEC	.420 G-S	.121 G-S
K11	.778 MM/SEC	.251 G-S	.144 G-S
K12	2.071 MM/SEC	.719 G-S	.220 G-S
K13	1.296 MM/SEC	1.118 G-S	.621 G-S
K14	2.103 MM/SEC	1.281 G-S	1.127 G-S
K15	3.944 MM/SEC	1.491 G-S	.569 G-S
K17	3.113 MM/SEC	.806 G-S	.445 G-S
K18	5.829 MM/SEC	2.011 G-S	.939 G-S
K19	4.787 MM/SEC	1.458 G-S	.845 G-S

Obrázek č. 13. 33:Ve výpisu naměřených hodnot



Obrázek č. 13. 34: Spektrum bodu K18



Obrázek č. 13. 34: Spektrum bodu K19

Na základě předchozího lze jednoznačně stanovit:

- Při diagnostickém měření dbát na procesní systémový přístup, tzn., že musí být vypracována metodika měření pro daný stroj (skupinu), elektromotor a daný prvek s jediným cílem – maximalizace provozní spolehlivosti.
- Je nutno se orientovat na limitní hodnoty pro kvalitativní stav provozu stroje (stav dobrý, stav přípustný, stav havarijní) pro dané podmínky provozu a daný stroj.
- K určování času do havárie (zbytková životnost) využívat své vlastní zkušenosti, zkušenosti druhých, studovat normy, literaturu a zkoušet výpočty výše uvedené.
- Kvalitu elektromotoru posuzovat z hlediska vibrací a výkonových parametrů a kvality izolace při použití nedestruktivních metod.
- Při vyvažování soustrojí pro zjištění linearity soustavy používat tříbodovou metodu.

Při využívání strojů se složitou kinematikou nutno provést měření vibrací u výrobce, v dílnách provozovatele, na pracovišti po jeho smontování, periodická měření na základě provozních podmínek a také na základě vzniklých potřeb.

10 Pohonné mechanismy a jejich nedostatky

Technická bezdemontážní diagnostika je velmi dobrým nástrojem pro provádění různých druhů kontrolních měření kvality a opotřebení pohonů včetně samotných pracovních mechanismů. Pro provádění těchto měření je nutné, aby pracovníci vykonávající tuto činnost měli vysokou úroveň znalosti s oblasti pohonů, a taktéž musí mít velmi dobré znalosti a zkušenosti z technické bezdemontážní diagnostiky. Na základě dlouhodobých zkušeností z oblasti provádění technické bezdemontážní diagnostiky v průmyslu všeho druhu včetně energetiky a uhelného hornictví lze jednoznačně prohlásit, že základem pro technická bezdemontážní diagnostikování rotačních strojů včetně, elektromotorů je vibrodiagnostika. Dalšími jsou tribotechnika, termografie, diagnostika elektrických izolací, korozivní úbytky atd.

Při řešení technických úkolů u zákazníků se setkávám s těmito nedostatky na nových pohonech, pohonech provozovaných nebo pohonech po opravě včetně pohonů havarovaných:

- poddimenzovaný přívod poháněcí energie,
- při použití elektrické energie regulované střídači, špatná konfigurace sítě,
- nelinearity systému regulace asynchronních elektromotorů s kotvou kroužkovou,
- nedostatečně a nekvalitně provedený základ pod pohon,
- porušený základ pohonu provozováním,
- měkký základový rám pod pohonem,
- neodborně provedená montáž pohonu na základový rám,
- vliv pohonu na prostředí a prostředí na pohon,
- nevyhovující souosost hnacího a hnaného mechanismu pohonu,
- rezonance pohonu,
- výrobní nebo provozní závady na hnacím a hnaném mechanismu.

Při řešení výše uvedených úkolů následně zjišťují chyby, které provedli pracovníci diagnostiky. Mezi chyby při provádění diagnózy patří:

- špatně provedená frekvenční analýza naměřených spekter, v jednotlivých bodech pohonu
- měření provedeno pouze na strojní, nebo elektrické části pohonu,
- konstrukční neznalost diagnostikovaného pohonu.

Popis nedostatků pohonů a diagnóz technických diagnostiků

Při popisu nedostatků pohonů a diagnóz technických diagnostiků jsou zde uváděny vždy příklady, které jsem v technické praxi řešil. Příklady, jsou z let 1982 až 2011.

10.1 Poddimenzovaný přívod poháněcí energie

Většina pohonů je napájena elektrickou energií. V mnoha případech se setkávám s problémem, že silový rozvod elektrické energie je špatně nadimenzovaný. Při provozu poddimenzovaného přívodu energie dochází ke značným úbytkům napětí, přehřívání elektromotoru, nestabilitě momentu a otáček, což vše vede ke ztrátám ve výrobě. Jeden z příkladu řešení je níže uveden. Na důlním podniku došlo v určitém časovém období k poškození přes 100 ks elektromotorů 100 kW, 500 V, 1450 min⁻¹. U elektromotorů bylo poškozeno vinutí rotoru tak, že došlo k vytavení hliníkových rotorových tyčí. Analýzou stavu bylo zjištěno, že chyba je v metodě projektování napájení dobývacích kombajnů. Příčina spočívala ve velkém úbytku napětí při rozběhu elektromotoru, což bylo zapříčiněno malým zdánlivým výkonem napájecího transformátoru pro rozběh elektromotoru kombajnu.

Při dimenzování napájecí sítě pro asynchronní elektromotory, obecně všechny druhy elektromotorů všech výkonů a napětí je nutno dimenzovat napájecí transformátor a napájecí kabel elektromotoru. Transformátor nutno dimenzovat s ohledem na zdánlivý výkon, který potřebuje elektromotor při rozběhu. Kabel je nutno dimenzovat na zkratový proud a na úbytek napětí při rozběhu a jmenovitém chodu. Nedostatečný zkratový výkon na konci vedení může způsobit, že motor bude mít při rozběhu v nepříznivých podmínkách záběrový proud větší než zkratový proud, který je nastavený na jisticích prvcích proti zkratu a obvod bude vypínán. Velký úbytek napětí způsobuje velké oteplení elektromotoru, elektromotor je měkký z hlediska otáček při velkém úbytku napětí a také se nemusí roztočit.

Příklady dimenzování napojení elektromotorů

Při dimenzování transformátorů se vychází z výpočtového zatížení napájeného elektrického rozvodu. Výkon transformátoru je nutno volit také z hlediska spouštění motorů velkých výkonů, neboť nedostatečný výkon transformátoru způsobí:

- přetížení transformátoru a tím značné snížení záběrového momentu spouštěného motoru,
- snížení momentů ostatních motorů napájených ze stejného transformátoru,
- snížení momentu nastává se čtvercem snížení napětí.

Při spouštění asynchronního elektromotoru vzniká ráz činného příkonu. Pro spolehlivé provozování vyprojektované elektrické instalace je zapotřebí zdánlivý výkon cca 6 530 kVA. Z hlediska výhodného součinitele využití je potřebný zdánlivý výkon 2 x 6,3 MVA. Byl zvolen 2 x transformátor

6,3 MVA. Součinitel využití transformátorů $\beta = 0,518$. V případě volby transformátoru 8 MVA - součinitel využití $\beta_T = 0,81625$. Pro napojení elektrické instalace je zapotřebí zdánlivý výkon podružných trafostanic

- 913,7 kVA - pro 0,5 kV
- 650 kVA - pro 1 kV

Rozvod 0,5 kV - volba tří transformátorů 400 kVA, 6,3/0,525 kV - součinitel využití $\beta_T = 0,7614$.

Rozvod 1 kV - volba dvou transformátorů 400 kVA, 6,3/1,05 kV - součinitel využití $\beta_T = 0,8125$.

Kontrolní výpočet potřebného zdánlivého výkonu podružné trafostanice při spouštění asynchronního elektromotoru - rozvod 1 kV.

V předcházející části „výpočtového zatížení pro skupinu spotřebičů“ byl na základě výpočtu určen zdánlivý výkon předsunuté trafostanice pro napojení rozvodu 1 kV o výkonu minimálně 650 kVA. Nejvýkonnější elektromotor v rozvodu 1 kV je elektromotor $P = 200$ kW, $\cos \varphi_n = 0,86$, $\eta = 0,93$, $I_z/I_n = 6$, $\cos \varphi_k = 0,35$. Ráz činného výkonu při spouštění elektromotoru 200 kW: $P_k = P_n I_k \cos \varphi_k / \eta I_n \cos \varphi_n = 200 \cdot 6 \cdot 0,35 / 0,93 \cdot 1 \cdot 0,86 = 525,2$ kW. Potřebný jalový výkon při spouštění elektromotoru 200 kW: $Q_k = P_k \tan \varphi_k = 525,2 \cdot 2,2913 = 1203,4$ kVar

$$S_V = \sqrt{P_V^2 + Q_V^2} = \sqrt{525,2^2 + 1203,4^2} = \sqrt{275835,04 + 1448171,56} = \text{cca } 1313 \text{ kVA}$$

Z důvodu rozběhu největšího elektromotoru je zapotřebí paralelní spojení dvou transformátorů o výkonu 400 kVA. Při rozběhu elektromotoru budou tyto transformátory krátkodobě přetěžovány o 62,7 %. Kontrolní výpočet potřebného zdánlivého výkonu podružné trafostanice při spouštění asynchronního elektromotoru - rozvod 0,5 kV.

V předcházející části „výpočtového zatížení pro skupinu spotřebičů“ byl na základě výpočtu určen zdánlivý výkon podružné trafostanice pro napojení rozvodu 0,5 kV o velikosti 914 kVA. Nejvýkonnější elektromotor v rozvodu 0,5 kV je 100 kW. Rozběh elektromotorů ostatních spotřebičů je méně nepříjemný z hlediska rozběhu z důvodu použití hydraulických spojek, které umožňují, aby elektromotor byl postupně zatěžován. Spouštěný elektromotor: $P=100$ kW, $\cos\varphi_n=0,87$, $\eta = 0,913$, $I_z/I_n=6$, $\cos\varphi_k=0,35$. Ráz činného výkonu při spouštění elektromotoru 100 kW: $P_k=P_n I_k \cos\varphi_k / \eta I_n \cos\varphi_n = 100 \cdot 6 \cdot 0,35 / 0,913 \cdot 1 \cdot 0,87 = 264,4$ kW. Potřebný jalový výkon při spouštění elektromotoru 100 kW $Q_k=P_k \tan\varphi_k = 264,4 \cdot 2,676 = 707,7$ kVar.

$$S_V = \sqrt{P_V^2 + Q_V^2} = \sqrt{264,4^2 + 707,7^2} = \sqrt{69907,36 + 500839,3} = 755,5 \text{ kVA}$$

Největší elektromotor 100 kW bude krátkodobě při rozběhu přetěžovat transformátor 400 kVA o 89 %. Z tohoto důvodu by bylo výhodnější ho napojit z rozvaděče napájeného dvěma paralelně spojenými transforma-

tory 400 kVA. Pro rozvod 500 V se jeví jako nejvýhodnější varianta v trafo-stanici instalovat tři transformátory 400 kVA, z toho jeden transformátor by byl provozován samostatně.

Variantu provozovat všechny tři transformátory paralelně nedoporučuji.

Dimenzování vedení z hlediska úbytků napětí při jmenovitém chodu

Při určování průřezu vodiče musíme přihlížet k úbytku napětí, který vznikne na vedení. Pokles napětí na konci vedení nemá mít nepříznivý vliv na funkci spotřebičů. Rozvod musí být navržen tak, aby napětí na svorkách spotřebiče nepokleslo na hodnotu, kterou udává tabulka č. 14.

1. Dovolенý úbytek napětí stanoví také platné normy.

Tabulka č. 14. 1 Nejnižší přípustný pokles napětí na svorkách spotřebičů

Pol.	Druh spotřebičů	Podmínky	Pokles jmenovitého napětí sítě (%)
------	-----------------	----------	------------------------------------

1	Motory (mimo jeřáby)	při výpočtovém proudu	5
1	Motory (mimo jeřáby)	při záběrovém proudu	neomezen - nesmí však být na závalu bezpečného provozu
2	Motory v důlním provozu	při výpočtovém proudu	Dle ČSN 34 141010
2	Motory v důlním provozu	při záběrovém proudu	Dle ČSN 34 141020 (nemá být větší)
3	Motory jeřábové	při výpočtovém proudu	6
3	Motory jeřábové	při záběrovém proudu	10
4	Relé	vždy	10
5	Elektromagnety stykače	vždy	15
6	Světelné zdroje a) venkovní osvětlení pracovišť a komunikací b) kabelové kanály	při výpočtovém proudu	8
6	Světelné zdroje a) venkovní osvětlení pracovišť a komunikací b) kabelové kanály	při výpočtovém proudu s nárazy od motorů	10
7	Světelné zdroje montované na strojích	při napájení z přívodu pro motor stroje	-
8	Ostatní světelné zdroje	při výpočtovém proudu	3
8	Ostatní světelné zdroje	při výpočtovém proudu s nárazy od motorů	5
9	Tepelné (odporové) spotřebiče	při výpočtovém proudu	5

Výpočtový proud pro elektromotor je jeho jmenovitý proud. Není - li dovolený pokles předepsán, platí zásada, že v místě spotřebiče nemá být pokles napětí větší než 5 % jmenovitého napětí sítě a pro osvětlení 3 %. U třífázového střídavého proudu při $\cos \varphi$ větší než 0,5 stačí počítat úbytek napětí podle vztahu

$$\Delta u_f = (R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi)$$

Procentní úbytek fázového napětí

$$\Delta u_{f\%} = (R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi) \cdot \frac{100}{U_f}$$

Sdružený úbytek napětí

$$\Delta u_S = \sqrt{3} \cdot (R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi)$$

Procentní úbytek sdruženého napětí

$$\Delta u_{S\%} = \sqrt{3} \cdot (R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi) \cdot \frac{100}{U_S}$$

při $\cos \varphi$ menším než 0,5 je nutno počítat úbytek napětí podle vztahu

$$\Delta u_f = R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi + \frac{(R \cdot I \cdot \sin \varphi - X \cdot I \cdot \cos \varphi)^2}{2 \cdot U_f}$$

Procentní úbytek fázového napětí

$$\Delta u_f \% = \left[R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi + \frac{(R \cdot I \cdot \sin \varphi - X \cdot I \cdot \cos \varphi)^2}{2 \cdot U_f} \right] \cdot \frac{100}{U_f}$$

Sdružený úbytek napětí

$$\Delta u_S = \sqrt{3} \cdot u_f$$

$$\Delta u_S = \sqrt{3} \left[R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi + \frac{(R \cdot I \cdot \sin \varphi - X \cdot I \cdot \cos \varphi)^2}{2 \cdot U_f} \right]$$

Procentní úbytek sdruženého napětí

$$\Delta u_{S\%} = \sqrt{3} \left[R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi + \frac{(R \cdot I \cdot \sin \varphi - X \cdot I \cdot \cos \varphi)^2}{2 \cdot U_f} \right] \cdot \frac{100}{U_S}$$

U jednofázového střídavého proudu při $\cos \varphi$ větší než 0,5 stačí počítat úbytek napětí podle vztahu

$$\Delta u_f = 2 \cdot (R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi)$$

při $\cos \varphi$ menším než 0,5 je nutno počítat úbytek napětí podle vztahu

$$\Delta u_f = 2 \cdot \left[R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi + \frac{(R \cdot I \cdot \sin \varphi - X \cdot I \cdot \cos \varphi)^2}{2 \cdot U_f} \right]$$

Procentní úbytek napětí při $\cos \varphi$ větším než 0,5

$$\Delta u_{f\%} = 2 \cdot (R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi) \cdot \frac{100}{U_f}$$

při $\cos \varphi$ menším než 0,5

$$\Delta u_{f\%} = 2 \cdot \left[R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi + \frac{(R \cdot I \cdot \sin \varphi - X \cdot I \cdot \cos \varphi)^2}{2 \cdot U_f} \right] \cdot \frac{100}{U_f}$$

Úbytek stejnosměrného napětí

$$\Delta u = 2 \cdot R \cdot I$$

Procentní úbytek stejnosměrného napětí

$$\Delta u_{\%} = 2 \cdot R \cdot I \cdot \frac{100}{U}$$

$$U_0 = \sqrt{\Delta U_0^2 - \Delta U_2^2} = \frac{\Delta U_2^2}{2U_0}$$

R - činný odpor ve fázi jednotlivých úseků vedení při max. provozní teplotě. Výpočty prováděny při teplotě 80°C

X - reaktance ve fázi jednotlivých úseků vedení

I - proud v jednotlivých úsecích vedení (A) se dosazuje za I buď hodnota I_p - výpočtové zatížení, nebo I_n - jmenovitý proud, případně I_z - záběrový proud

Při kontrole úbytku napětí u vedení do průřezu 16 mm² se může indukční reaktance zanedbat. Při kontrole úbytku napětí se počítá s provozní teplotou dle skutečného zatížení, nebo s teplotou 80°C (pro jednot výpočtu).

Dimenzování vedení z hlediska úbytků napětí při spouštění elektro-motorů

Z provozních důvodů a z hlediska požadavků ČSN je nutno kontrolovat úbytek napětí při spouštění elektromotorů. Moment asynchronního elektromotoru klesá se čtvercem úbytku napětí. To znamená, že při úbytku napětí na svorkách elektromotoru o 10 %, bude svorkové napětí elektro-motoru $0,9 U_n$ a tím výkon i moment elektromotoru bude $P'_n \approx M'_n = 0,9^2 \cdot M_n = 0,81 \cdot M_n$ - snížení výkonu a momentu o 19 %.

Při úbytku napětí při rozběhu elektromotoru o 20 %, je svorkové napětí elektromotoru $0,8 U_n$ a záběrový moment elektromotoru $M'_Z = 0,8^2 \cdot M_Z = 0,64 M_Z$, tento úbytek napětí představuje snížení výkonu a záběrového momentu o 36 %.

Úbytek napětí při rozběhu nesmí být na závadu hladkému rozběhu motoru, tj. nesmí klesnout záběrný moment motoru pod záběrný moment pracovního stroje. V opačném případě by se elektromotor nerozběhl.

Při rozběhu je u motorů s kotvou nakrátko záběrový proud asi 5krát až 7krát větší než proud jmenovitý a účinník při rozběhu je 0,1 až 0,35.

Velký úbytek napětí má za následek proudové přetížení indukčních motorů, protože motory představují proměnlivou impedanci, závislou na zatížení. S klesajícím napětím stoupá proud motoru, jenž způsobí zvětšení zkrat v mědi vinutí Joulovým teplem a rychlejší stárnutí izolace. Při rozběhu elektromotoru je účinník velmi malý, proto nutno počítat s přesným vztahem. Pro úbytek napětí při záběru asynchronního elektromotoru platí základní vztah:

$$\Delta U_Z = \sqrt{3} \cdot \left[R \cdot I_Z \cdot \cos \varphi_Z + X \cdot I_Z \cdot \sin \varphi_Z + \frac{(R \cdot I_Z \cdot \sin \varphi_Z - X \cdot I_Z \cdot \cos \varphi_Z)^2}{2 \cdot U_f} \right]$$

Procentní úbytek sdruženého napětí

$$\Delta U_{Z\%} = \sqrt{3} \cdot \left[R \cdot I_Z \cdot \cos \varphi_Z + X \cdot I_Z \cdot \sin \varphi_Z + \frac{(R \cdot I_Z \cdot \sin \varphi_Z - X \cdot I_Z \cdot \cos \varphi_Z)^2}{2 \cdot U_f} \right] \cdot \frac{100}{U_s}$$

Při respektování vlivu impedance sítě na příkon motoru se provádí výpočet dle vztahu

$$\Delta u_{Z\%} = \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{I_Z \cdot R}{U_f} + \cos \varphi_Z \right)^2 + \left(\frac{I_Z \cdot X}{U_f} + \sin \varphi_Z \right)^2}} \right] \cdot 100$$

Δu_Z	úbytek napětí při spouštění motoru v případě, že přívodním kabelem je napájen pouze spouštěný motor - [V]
$\Delta u_{Z\%}$	úbytek napětí při spouštění motoru v případě, že přívodním kabelem je napájen pouze spouštěný motor - [%]
I_Z	záběrový proud motoru udávaný výrobcem (při jmenovitém napětí na svorkách motoru) - [A]
R, X	parametry jedné fáze napájecí sítě mezi ideálním zdrojem a svorkami motoru - [Ω]
$\cos \varphi_Z, \sin \varphi_Z$	hodnoty nakrátko (při záběru)
U_f	fázové napětí zdroje - [V]
U_s	Sdružené napětí zdroje - [V]

Příklad

Vypočet úbytku napětí na transformátoru 6/0,525 kV při záběru elektromotoru: 100 kW, $I_n = 142$ A, $\frac{I_Z}{I_n} = 5,5$, $\cos \varphi_Z = 0,35$, $U_n = 500$ V,

ohmický odpor transformátoru $R_T = 0,005469 \Omega$, reaktance transformátoru $X_T = 0,026313 \Omega$ Pro úbytek napětí platí základní vztah:

$$\Delta u_Z = \sqrt{3} \cdot \left[R \cdot I_Z \cdot \cos \varphi_Z + X \cdot I_Z \cdot \sin \varphi_Z + \frac{(R \cdot I_Z \cdot \sin \varphi_Z - X \cdot I_Z \cdot \cos \varphi_Z)^2}{2 \cdot U_f} \right]$$

$$\Delta u_Z = \sqrt{3} \cdot \left[0,005469 \cdot 781 \cdot 0,35 + 0,026313 \cdot 781 \cdot 0,9367 + \frac{(0,005469 \cdot 781 \cdot 0,9367 - 0,026313 \cdot 781 \cdot 0,35)^2}{2 \cdot \frac{500}{\sqrt{3}}} \right]$$

$$\Delta u_Z = \sqrt{3} \cdot \left[1,49495 + 19,2496 + \frac{(4,0 - 7,192659)^2}{2 \cdot \frac{500}{\sqrt{3}}} \right] = 1,73 \cdot \left[20,74455 + \frac{10,19307 \cdot 1,73}{1000} \right] \cong 35,9 \text{ V}$$

Procentní úbytek sdruženého napětí

$$\Delta u_{Z\%} = \Delta u_Z \cdot \frac{100}{U_s} = 35,92 \cdot \frac{100}{500} = 7,2 \quad \%$$

Procentní úbytek napětí při rozběhu elektromotoru při respektování vlivu impedance sítě na příkon elektromotoru

$$\Delta u_{Z\%} = \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{I_Z \cdot R}{U_f} + \cos \varphi_Z \right)^2 + \left(\frac{I_Z \cdot X}{U_f} + \sin \varphi_Z \right)^2}} \right] \cdot 100 =$$

$$\Delta u_{Z\%} = \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{781 \cdot 0,005469 \cdot \sqrt{3}}{500} + 0,35 \right)^2 + \left(\frac{781 \cdot 0,026313 \cdot \sqrt{3}}{500} + 0,936749699 \right)^2}} \right] \cdot 100$$

$$\Delta u_{Z\%} = \left[1 - \frac{1}{\sqrt{0,133076252 + 1,01594}} \right] \cdot 100 = (1 - 0,932903857) \cdot 100 = 6,71 \%$$

Úbytek napětí na transformátoru při rozběhu elektromotoru je 6,71 %.

Výpočet změny činného odporu v závislosti na teplotě

Při výpočtu úbytků napětí se vychází ze zatížení a parametrů obvodu. Jeden z parametrů, který určuje obvod je činný odpor. Tato hodnota se mění se zatížením (s teplotou vodiče). Aby výpočet byl přesný nutno na tento aspekt brát zřetel.

Výrobce kabelů udává hodnoty odporů při teplotě 20⁰C. Tento odpor je při přesném výpočtu nutno přepočíst na teplotu, kterou vodič (kabel) může maximálně za provozu mít, nebo skutečně má.

Výpočet se provede dle vztahu (platí vztah pro přepočet rezistence dle teploty):

$$R_L = \left[1 + 0,004 \cdot \frac{1}{0C} \cdot (t_k - 20^0C) \right] \cdot R_{L20}$$

R_{L20} je rezistence při teplotě 20°C

t_k je konečná teplota

R_L je rezistence při konečné teplotě

Změna rezistence při zvýšení teploty kabelu (vodiče) na 80 °C.

$$R_L = \left[1 + 0,004 \cdot \frac{1}{0C} \cdot (t_k - 20^0C) \right] \cdot R_{L20} = [1 + 0,004 \cdot (80 - 20)] \cdot R_{L20} = 1,24 \cdot R_{L20}$$

10.2 Při použití elektrické energie regulované střídači, síť je špatně nedostatečně navržena

Na základě objednávky z jisté organizace bylo provedeno firmou HUDECZEK SERVICE, s. r. o. diagnostické měření vertikálního čerpadla 350-NVJW-450-85 včetně elektromotoru 250 kW, 400V, 990 min⁻¹. Analýza naměřených hodnot a návrh na opatření je ve firmě HUDECZEK SERVICE, s. r. o. vedena pod zakázkovým číslem HU – S 070206. Předmětem měření bylo stanovení příčin nadměrného chvění a oteplení elektromotoru při jeho chodu v provozních podmínkách.

Elektromotor o výkonu 250 kW, 400 V byl provozován při provozních otáčkách 1 230 min⁻¹. Jmenovité otáčky elektromotoru jsou zvýšeny z 990 min⁻¹ na 1 230 min⁻¹ prostřednictvím zvýšení frekvence na frekvenčním měniči, přes který je elektromotor napojen. Podle informací provozovatele výrobce elektromotoru neměl námitek, aby tento elektromotor byl provozován s těmito zvýšenými otáčkami.

Štítkové údaje elektromotoru a čerpadla jsou uvedeny níže.

Elektromotor: napájecí síť 50 Hz, výkon 250 kW, jmenovité napětí D/Y 400/690 V, D/Y 433/251 A, Cos φ 0,88, jmenovité otáčky 990 min⁻¹, axiální ložisko NU322 C3, radiální ložisko 7322 C3.

Čerpadlo: otáčky 1230 min⁻¹, dopravní výška 38 m, výkon 191 kW, průměr oběžného kola 470 mm, axiální ložisko NU2224.2, radiální ložisko 7320 CB.

Pro zjištění anomálií na elektromotoru byly sledovány tyto parametry:

- teplota ložiska elektromotoru,

- teplota ložiska čerpadla,
- vibrace na ložiscích elektromotoru,
- vibrace na ložiscích čerpadla,
- napájecí napětí elektromotoru,
- odebíraný proud elektromotorem,
- byla provedená analýza proudu a napětí z hlediska obsahu vyšších harmonických,
- byla posouzena předložená technická dokumentace z hlediska dimenzování jednotlivých částí napájecího obvodu soustrojí elektromotor čerpadlo,
- byl posouzen způsob mechanického uložení a provedení konstrukce pro spojení elektromotor a čerpadlo.

Měření elektromotoru a čerpadla bylo provedeno od studeného stavu tj., stroje měly teplotu okolí. Čerpadlo bylo zatíženo na plný výkon, který je nutný pro běžné čerpání vod.

Rozmístění měřících bodů

Sledování teplot ložisek bylo provedeno odporovými teploměrnými čidly vyvedenými do velínu čerpací stanice. Měření vibrací bylo provedeno v horizontální a axiální rovině ve čtyřech místech na ložiscích elektromotoru a čerpadla. Viz obrázek č. 14. 2 a č. 14 .3.



Obr. 14. 2: Vyznačení měřících bodů na elektromotoru

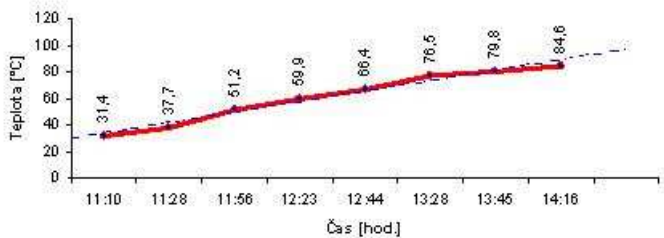


Obr. 14. 3: Vyznačení měřících bodů na čerpadle

Průběh oteplení sledovaných ložisek

Axiální ložisko elektromotoru NU 322 bod M1

Průběh oteplení ložiska elektromotoru



Obrázek č. 14. 4: Průběh oteplení axiálního ložiska elektromotoru NU 322 bod M1

Měřením teploty na ložisku NU 322 elektromotoru byl prokázán lineární průběh oteplení ložiska. Teplotní charakteristika ohřevu ložiska nemá tendenci ke stabilizaci teploty. Teplota ložiska elektromotoru roste s dobou provozování.



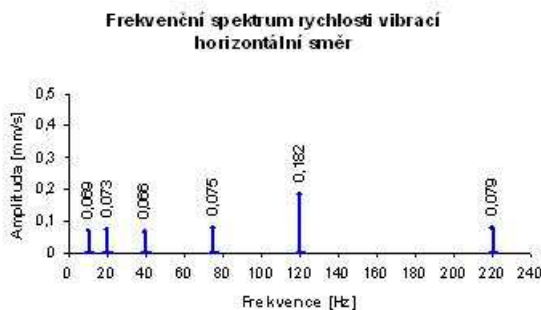
Obrázek č. 14 .5: Průběh oteplení ložiska čerpadla NU2224 bod C1

Teplotní charakteristika oteplení ložiska NU2224 bod C1 čerpadla má lineární charakter. Po dovršení 50°C teplota ložiska se stabilizovala a nena-růstala.

Frekvenční analýza vibrací

Na soustrojí elektromotor – čerpadlo byly měřeny vibrace v hodnotách efektivní rychlosti a zrychlení amplitud. Pomocí rychlé Fourierovy transformace byla vytvořena frekvenční spektra. Byly sledovány změny amplitud ve frekvenčních spektrech s ohledem na oteplení elektromotoru. Frekvenční spektra rychlosti vibrací elektromotoru na začátku zkoušky:

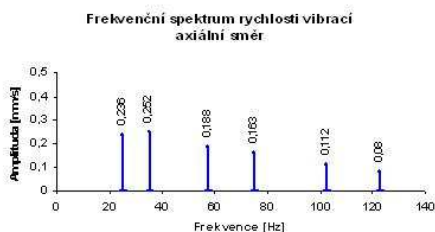
Měřicí bod M1H



Obrázek č. 14. 6: Frekvenční spektrum rychlosti vibrací v měřícím bodě M1H

Ve frekvenčním spektru je dominantní amplituda na frekvenci 122,5 Hz. Zvýšení vibrací na této amplitudě je způsobeno nesymetrickým elektromagnetickým polem. V průběhu dalších měření se amplituda na této frekvenci výrazně nemění. Hodnoty vibrací na 1x a 2x otáčkové frekvenci jsou nízké.

Měřící bod M1A



Obr. 14. 7: Frekvenční spektrum rychlosti vibrací v měřícím bodě M1A

V axiálním směru měření byly detekovány vyšší hodnoty amplitud rychlosti vibrací na frekvenci 25 Hz a 35 Hz. Hodnoty vibrací nejsou vysoké.

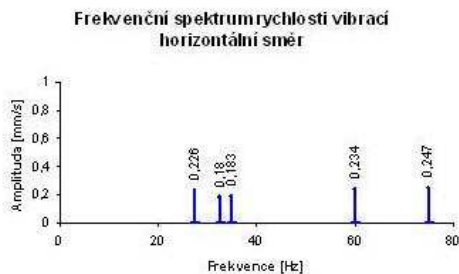
Měřící bod M2H



Obr. 14. 8: Frekvenční spektrum rychlosti vibrací v měřícím bodě M2H

Ve frekvenčním spektru rychlostí vibrací je patrný vyšší nárůst amplitud vibrací na všech významných frekvenčních složkách. To je příčinou nižší tuhosti horní části elektromotoru. Amplitudy nejsou alarmující.

Měřící bod M2A

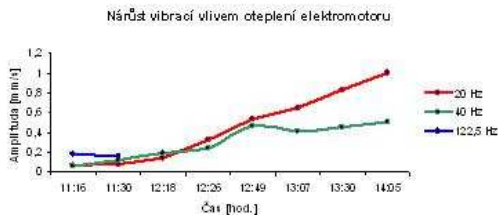


Obr. 14. 9: Frekvenční spektrum rychlosti vibrací v měřícím bodě M2A

Ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací v měřícím bodě M2A nebyly zjištěny žádné projevy závad.

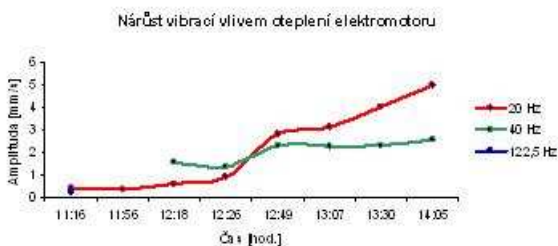
Průběh nárůstu hodnot amplitud vibrací vzhledem k oteplení elektromotoru

Měřící bod M1H



Obrázek č. 14. 10: Nárůst amplitud rychlosti vibrací provozovaného elektromotoru v bodě M1H

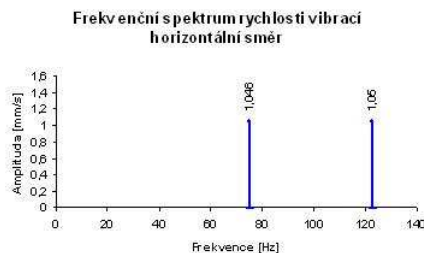
Měřící bod M2H



Obrázek č. 14. 11: Nárůst amplitud rychlosti vibrací na provozovaném elektromotoru v bodě M2H

Frekvenční spektra rychlosti vibrací čerpadla na začátku zkoušky

Měřicí bod C1H



Obrázek č. 14. 12: Frekvenční spektrum rychlosti vibrací měřených v bodě C1H

Ve frekvenčním spektru jsou patrné vysoké vibrace na frekvencích 75 Hz a 122,5 Hz. Jedná se o přenos vibrací z elektromotoru. Hodnoty jsou v časovém trendu stabilizovány.

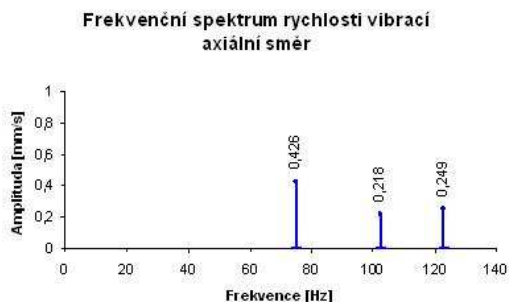
Měřicí bod C2H



Obrázek č. 14. 13: Frekvenční spektrum rychlosti vibrací měřených v bodě C1H

Ve frekvenčním spektru jsou patrné amplitudy rovněž na frekvencích 75 Hz a 122,5 Hz. Pravděpodobně přenos vibrací z výše uvedeného zdroje.

Měřicí bod C2A



Obr. 14. 14: Frekvenční spektrum rychlosti vibrací měřeném v bodě C2A

Ve frekvenčním spektru jsou detekovány dominantní amplitudy na frekvenci 75 Hz, 102,5 Hz a 122,5 Hz. Amplitudy nejsou alarmující. V časovém trendu jsou stabilizovány.

Elektromotor

Sledováním teplotního pole na statoru elektromotoru byl zjištěn nadměrný ohřev uprostřed statoru, tj. v oblasti statorového a rotorového vinutí. V oblasti ložisek byly teploty mnohem nižší. Ve frekvenčních spektrech v měřicím místě M1H je patrný vysoký nárůst amplitud rychlostí vibrací na frekvenčních složkách 20 Hz a 40 Hz již po 1 hodině provozu stroje. Po 2 hodinách provozu dosáhla hodnota amplitud chvění na 20 Hz nepřijatelné hodnoty. V měřicím místě M2H je rovněž alarmující nárůst rychlosti vibrací jak na frekvenci 20 Hz tak i 40 Hz. Zde dosáhly hodnoty přijatelných mezí již při 1 hodině provozu stroje.

Obecným jevem elektromotorů napojených přes frekvenční měniče je skutečnost, že elektromotory se více oteplují a také více vibrují. Musí být věnováno více pozornosti projektování a navrhování výkonových parametrů pohonu, jeho chlazení, uložení a způsobu napojení na zdroj elektrické energie.

Kontrolou uložení a provedení spojení elektromotor a čerpadlo bylo zjištěno, že spodní ložisko elektromotoru není chlazeno nuceným oběhem vzduchu, ale pouze vedením tepla v konstrukci. Tento způsob chlazení ložiska je nedostatečný.

Kontrolou předložené technické dokumentace elektrického napojení bylo zjištěno, že v projektu je uvedeno napojení elektromotoru pomocí dvou paralelních měděných kabelů o průřezu 120 mm^2 . Ve skutečnosti elektromotor je napojen dvěma paralelními měděnými kabely každý o průřezu 95 mm^2 . V dokumentaci není zaznamenána změna projektu projektantem. Odborníky firmy HUDECZEK SERVICE, s. r. o. byl v průběhu prohlídky proveden přepočít napojení elektromotoru s výsledkem, který také připouští napojení elektromotoru pomocí měděných kabelů o průřezu 95 mm^2 . Pro spolehlivější provoz je výhodnější napojit elektromotor pomocí dvou paralelních měděných kabelů o průřezu 120 mm^2 .

Napájecí délka kabelu elektromotoru předmětného čerpadla je podle technické dokumentace 55 m. Výkon elektromotoru je 250 kW při napájecím napětí 400 V. Pohon je regulován pomocí frekvenčního měniče bez výstupních tlumivek a vstupních filtrů. Při tomto výkonu a délce napájecího kabelu je tato konfigurace nevhodná pro zabezpečení spolehlivého chodu pohonu.

Čerpadlo je poháněno elektromotorem 250kW s jmenovitými otáčkami 990 min^{-1} při napětí 400 V a frekvenci napájecího napětí 50 Hz. Pro dosažení potřebných otáček je na poháněném čerpadle frekvence napájecího napětí elektromotoru pomocí frekvenčního měniče zvednuta na cca 61 Hz. Motor pracuje s otáčkami 1200 min^{-1} a čerpadlo je využito na plný výkon. Zvednutím jmenovitých otáček elektromotoru daných výrobcem tj. 990 min^{-1} na 1200 min^{-1} dochází ke snížení momentu elektromotoru. Tato skutečnost je dána momentovou charakteristikou asynchronních elektromotorů obecně. Při zachování potřebného momentu na čerpadle dochází ke zvětšení proudu v rotoru elektromotoru. Zvýšený proud vytváří s jeho kvadrátem větší teplo, na které konstrukce elektromotoru není dimenzována a neumí toto teplo v potřebné krátké době odvést a snížit na provozní přijatelnou teplotu. Zvyšování otáček poháněcího elektromotoru čerpadla je nevhodné.

Fenomén zvyšování chvění při postupném oteplování elektromotoru lze vysvětlit tím, že elektromotor ve studeném stavu má určitý vnitřní činný

odpor, indukčnost a kapacitu. Totéž platí i pro napájecí kabel. Odpor, indukčnost a kapacita mají za studena určité hodnoty, které tvoří pro vyšší harmonické, kterými je elektromotor napájen, filtr a kompenzátor. Motor se při provozu ve studeném stavu je klidný což bylo potvrzeno měřením. Při postupném zahřívání dochází ke změně těchto základních parametrů napájecí sítě a elektromotoru a efekt filtrace a kompenzace vyšších harmonických ustupuje a elektromotor nadměrně vibruje.

Čerpadlo

Měřením a analýzou frekvenčních spekter na ložiscích čerpadla byly detekovány zvýšené amplitudy na frekvencích 75 Hz a 122,5 Hz, které jsou dané vibracemi kardanového hřídele v místě spojky čerpadla. Hodnoty těchto amplitud se v časovém trendu výrazně neliší, takže můžeme vyloučit jakýkoliv vliv oteplení elektromotoru na vibrace čerpadla.

Závěr měření in situ a návrh na opatření

Závěrem nutno zdůraznit, že při vyhlášení výběrového řízení a následném projektování a schvalování provozovatelem bylo velmi málo času věnováno výše uvedeným skutečnostem a především chyběly zkušenosti při výstavbě a provozování pohonů značných výkonů napájených z frekvenčních měničů. Výsledek je patrný z provozních problémů. Pro odstranění těchto problémů a zajištění bezpečného a spolehlivého chodu předmětného čerpadla jsem navrhnul:

- čerpadlo pohánět čtyřpólovým elektromotorem a otáčky snižovat, pomocí frekvenčního měniče na otáčky potřebné pro čerpadlo,
- provést výpočet a projekt cizího chlazení elektromotoru. Původní ventilátor elektromotoru demontovat, mohlo by docházet při cizím chlazení elektromotoru ke snížení účinnosti,
- provést úpravu ukotvení elektromotoru tak aby bylo možné pomocí cizího nuceného větrného proudu chladit intenzivně i spodní ložiska elektromotoru,
- samotný frekvenční měnič umístit do zvláštního rozvaděče a vybavit ho vnitřní rozváděčovou klimatizací a filtry chránící napájecí síť, rozvaděč s frekvenčním měničem umístit do těsné blízkosti elektromotoru tak aby napájecí kabel z rozvaděče frekvenčního měniče nebyl delší než maximálně 3 m,
- průřez napájecího kabelu volit Cu 240 mm²,

- celý systém napájení dořešit z hlediska elektromagnetické kompatibility (doposud také není řešen),

Jsou možná i jiná řešení, ale dle mých zkušeností jsou dalšími kroky metody pokus - omyl. Bude to mnohem nákladnější než řešení výše uvedené.

Realizace navržených opatření

Provozovatel provedl na základě výše uvedených doporučení výměnu elektromotoru se jmenovitými otáčkami 990 min^{-1} při napětí 400 V na elektromotor se jmenovitými otáčkami $1\,489 \text{ min}^{-1}$ při napětí 400 V a otáčky snižoval pomocí frekvenčního měniče na potřebné otáčky $1\,200 \text{ min}^{-1}$. Tím byl zachován potřebný moment. Dále byla provedena úprava nosného rámu elektromotoru tak aby bylo přirozeným větrným tahem chlazeno dolní ložisko elektromotoru.

10.3 Nelinearity systému regulace otáček asynchronních elektromotorů s kotvou kroužkovou

Nelinearita systému regulace otáček asynchronních elektromotorů s kotvou kroužkovou se projevuje tím, že elektromotor má nadměrné vibrace v lepším případě a v horším případě dochází k elektrickým průrazům ve statorovém vinutí. Tento fenomén nastává u elektromotorů a větších výkonů na napětí 6 kV. V průběhu mé praxe jsem řešil třikrát tyto poruchy. Nejvýraznější byla na asynchronním elektromotoru s kotvou kroužkovou o výkonu 2 000 kW, napětí 6 kV a otáčky 750 min^{-1} v soustavě IT. Elektrický motor poháněl stejnosměrné dynamo v systému Ward - Leonardova soustrojí. Elektrický motor byl spouštěn vodním spouštěčem. Na elektromotoru došlo k průrazu na statorovém vinutí. Po opravě byl elektromotor spuštěn a opět došlo k elektrickému průrazu vinutí. Před uvedením do provozu byla provedena napěťová zkouška a opravené vinutí vyhovělo. Vinutí bylo opět opraveno a taktéž byla provedena napěťová zkouška s kladným výsledkem. Než, byl elektromotor uveden do provozu, jsem nařídil důkladnou prohlídku a měření izolačního stavu všech dílčích komponentů elektromotoru včetně spouštěče. Na vodním spouštěči bylo zjištěno, že izolátor má podstatně snížený izolační stav v jedné fázi. Izolátor byl vyměněn za nový a elektromotor byl bez problému uveden do provozu.

Nesymetrie izolačního stavu izolátorů na spouštěči způsobovala tento významný problém ničení vinutí statoru. Podstata problému je v tom, že nesymetrický stav izolačního odporu izolátorů způsoboval nesymetrii celého napájecího systému elektromotoru a při rozjezdu docházelo až dvojnásobkům napětí v napájecí síti, což vinutí nevydrželo. Níže je vysvětlena podstata nesymetrie v izolované síti (IT).

Druhý případ byl stejný ale na jiném stroji a třetí případ na odporovém spouštěči olejem chlazeným kde došlo k propálení odporů, které následně vyzkratovaly část odporníku, a tím došlo k nesymetrii systému.

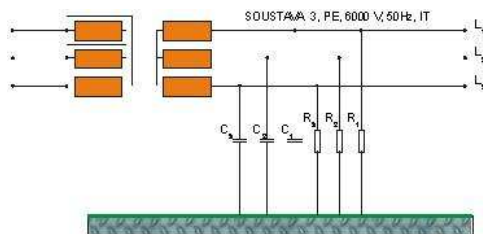
Soustava s izolovaným nulovým bodem

Soustava s izolovaným nulovým bodem je charakterizována tím, že nulový bod napájecího transformátoru je odizolován od země. Veškeré neživé části elektrických zařízení jsou přímo uzemněny do země nebo je veden společný uzemňovací vodič, na který jsou vodivě spojeny veškeré neživé části elektrické soustavy a samotný uzemňovací vodič je uzemněn v jednom nebo více místech. V různých prostředích jsou nařízeny různé hodnoty odporu uzemnění. Totéž platí o trvalé kontrole izolačního stavu elektrické sítě a jejího vypnutí při poklesu izolačního stavu pod určitou mez. Vypnutí dvojpólových a třípólových spojení z hlediska času odpojení poškozeného místa je také závislé na prostředí a napětí.

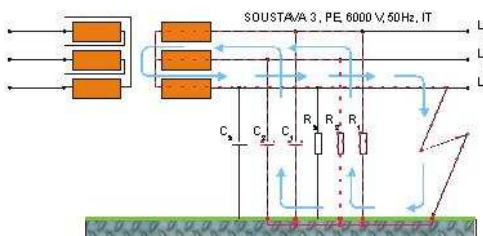
Stanovení cesty toku poruchového proudu při jednopólovém zemním spojení včetně dvojpólového a třípólového v izolované soustavě

Na obrázku č. 14.15 je nakreslena symetrická izolovaná soustava v ustáleném stavu. Každý s krajních vodičů má vůči zemi kapacitu a odpory, které charakterizují izolační stav soustavy. Při této konfiguraci, symetrii a dobrém izolačním stavu sítě netečou vůči zemi téměř žádné proudy.

Na obrázku č. 14.16 je izolovaná soustava a při jednopólovém zemním spojení ve fázi L_3 . Tok proudu v soustavě je označen čárkovaně - červeně a taktéž modrými šipkami. Poruchový kapacitní proud teče do místa jednopólového spojení se zemí, dále dvěma nepoškozenými fázemi L_1 a L_2 do zdroje transformátoru a následně poškozeným fázovým vodičem do místa spojení. Tím je uzavřen proudový obvod a lze dále vyšetřovat působení poruchového proudu.



Obrázek č. 14. 15: Symetrická izolovaná soustava v ustáleném stavu

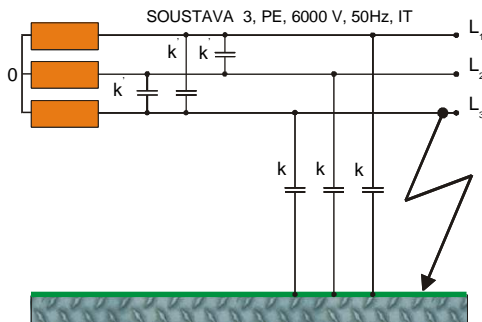


Obrázek č. 14. 16: Jednopolové zemní spojení v symetrické izolované soustavě

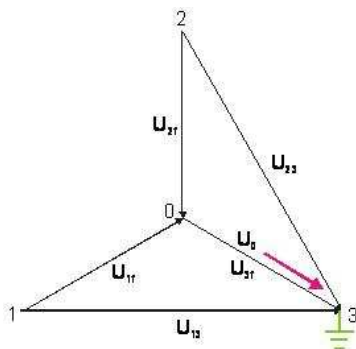
Stanovení hodnoty poruchového proudu v izolované soustavě

Zemním proudem se rozumí proud, který prochází místem zemního spojení při uzemnění vodiče jedné fáze elektrické soustavy s izolovanou nulou. Opět je nutné rozlišovat mezi souměrným a nesouměrným uspořádáním vodičů vedení.

Souměrné uspořádání vodičů u třívodičového kabelu nebo krouceného vrchního vedení vykazuje pouze dvě různé dílčí kapacity k a k' (obr. 14. 17.). O napěťovém systému zdroje předpokládáme, že je souměrný (obr. 14. 18.). Spojí-li se fáze 3 se zemí, bude její potenciál roven nule, takže napětí ostatních dvou zdravých fází proti zemi stoupne na hodnotu napětí sdružené.



Obrázek č. 14. 17: Symetrická izolovaná soustava při jedнопólovém zemním spojení



Obrázek č. 14. 18: Fázový diagram při jedнопólovém zemním spojení

Pro fázory kapacitních proudů a jejich součet platí vztah

$$\sum_{k=1}^3 I_{ck} = j\omega \sum_{k=1}^3 Q_k = 0$$

$$Q_1 = kU_2 + k'(U_1 - U_2) + k'(U_1 - U_3) = (k + 2k')U_1 + k'U_2$$

$$U_2 = U_{23} = U_{2f} - U_{3f}$$

$$Q_1 = kU_2 + k'(U_1 - U_2) + k'(U_1 - U_3) = (k + 2k')U_1 + k'U_2$$

$$Q_2 = kU_2 + k'(U_2 - U_1) + k'(U_2 - U_3) = (k + 2k')U_2 + k'U_1$$

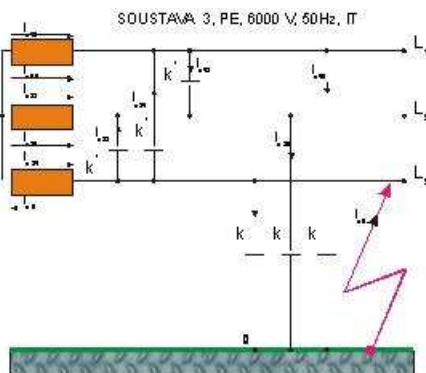
$$Q_3 = kU_3 + k'(U_3 - U_1) + k'(U_3 - U_2) = k'(U_1 + U_2)$$

a pro zdroj v zemi platí rovnice

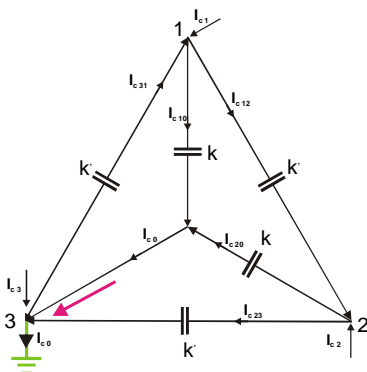
$$Q_0 = -(Q_1 + Q_2 + Q_3) = -k(U_1 + U_2) = -k(U_{1f} + U_{2f} - 2U_{3f}) = 3kU_{3f}$$

Pro fázory kapacitních proudů a jejich součet platí vztah

$$\sum_{k=1}^3 I_{ck} = j\omega \sum_{k=1}^3 Q_k = 0$$



Obrázek č. 14. 19: Kapacitní proudy



Obrázek č. 14. 20: Fázory kapacitních proudů

Pro kapacitní poměry na vedení se zemním spojením lze kreslit kapacitní schéma (obr. č. 14. 19.), v němž platí pro jednotlivé kapacitní proudy (obr. č. 14. 20.) rovnice

$$I_{c1} = I_{c10} + I_{c12} - I_{c31}$$

$$I_{c2} = I_{c20} + I_{c23} - I_{c12}$$

$$I_{c3} = I_{c31} - I_{c23}$$

$$I_{c0} = I_{c0}$$

takže jejich součet

$$\sum_{k=0}^3 I_{ck} = I_{c0} + I_{c10} - I_{c20} = 0$$

čili

$$-I_{c0} = I_{c10} + I_{c20}$$

příčemž

$$I_{c10} = j\omega\omega k_1 I_{c20} + I_{c20} = j\omega\omega k_2$$

takže zemní proud

$$I_{c0} = -j\omega\omega (U_1 + U_2) = 3j\omega j\omega_{30}$$

Jak je zřejmé, že fázor zemního proudu předbíhá o 90° fázor napětí uzemněné fáze 3 a má hodnotu rovnou trojnásobku nabíjecího proudu vedení.

Nabíjecí výkon vedení s izolovanou nulou je při jednopólovém zemním (kovovém) spojení dán celkovou kapacitou vedení, které je připojeno na sdružené napětí U_s , tj.

$$P_c = U_s (I_{c10} + I_{c20} + I_{c23} + I_{c12} + I_{c31})$$

kde

$$I_{c10} = I_{c20} = \omega k U_s I_{c12} + I_{c23} + I_{c31} = \omega'' U_s$$

potom nabíjecí výkon

$$P_c = \omega (2k + 3k') U_s^2$$

Při zemním spojení je tedy nabíjecí výkon vedení větší.

10.4 Nedostatečně a nekvalitně provedený základ pod pohon

S nedostatečně a nekvalitně provedeným základem pod nosným rámem soustrojí se lze v posledním desetiletí hodně často setkat. Tento negativní technický jev se především vyskytuje u strojů, které jsou podrobeny opravě nebo modernizaci při, které dochází ke změnám gabaritních rozměrů stroje. Systém výběrových řízení tlačí montážní firmy k nízkým cenám a tím se neprovádí analýza základů a jejich oprava nebo komplexní obnova. Stroje se montují na původní základové rámy, což při uvádění do provozu a následného provozování způsobuje značné technické problémy, které se především projevují značnými vibracemi, nadměrnou provozní teplotou jednotlivých uzlů soustrojí, poruchovostí atd. Pro bezpečný a spolehlivý chod stacionárních strojů nutno při výstavbě, opravě a rekonstrukci dodržet níže uvedené technické zásady.

Jako příklad uvádím fotografie základů a základového rámu oběhového čerpadla na teplárně. Elektromotor čerpadla je napojen přes frekvenční měnič. Čerpadlo má úlohu regulátoru podle potřeb spotřebitelů. Parametry elektromotoru jsou:

Elektromotor

- Jmenovitý výkon 6,5 – 315 kW
- Napájecí frekvence 15 – 50 Hz
- Jmenovité otáčky 898,6 – 2974 min⁻¹
- Jmenovité napětí 400 V
- Jmenovitý proud 530 A

Obrázek č. 14. 21 zobrazuje betonový podstavec čerpadla po vytrhání základového rámu. Na struktuře betonu je vidět, že beton byl technologicky nesprávně lit do konstrukce. Ocelové kapsy v rámu nebyly opatřeny odvětrávacími místy, čímž se vytvořily vzduchové polštáře a beton nevyplnil celý prostor konstrukce. Beton při lití nebyl odvibrován. Na obrázku č. 14. 22. je zobrazen základový rám a je vidět podle map vytvořených betonem o nekvalitním provedení základů.



Obrázek č. 14. 21: Betonový základ po demontáži základového rámu soustrojí elektromotor – čerpadlo



Obrázek č. 14. 22: Demontovaný základový rám soustrojí elektromotor – čerpadlo

Typy samostatných základů točivých strojů

Podle způsobů vytvoření konstrukce základů točivého stroje se rozeznávají:

- Tuhé základy točivých strojů jsou betonové armované základy dělené do zámezní hloubky oddělené od okolní zeminy izolační vrstvou a me-zi stroji zeminou, která je zde tlumičem rázů a také podpěrou tuhých základů. Upevnění strojů k základu je provedeno pomocí kotevních šroubů.
- Plovoucí základy točivých strojů jsou realizovány u rotujících soustrojí v patrech budov a podobně. Rotující soustrojí je připevněno k základové desce, která je pružně uložena vůči desce betonové, tzn. musí být provedena izolace vibrací od podlahy a stěn budovy, kde je soustrojí uloženo.
- Rámové nebo stěnové základy točivých strojů jsou obvykle sestaveny z horní desky, která může být tvořena příčnými a podélnými trámy, ze sloupů, stěn a spodní základové desky, nebo jiných základových konstrukcí.

Projektové podklady

Při návrhu základů se vychází zejména z těchto strojních projektových podkladů:

- výpočtovou a výkresovou technickou dokumentaci zatížení s označením míst, na kterých bude stroj nebo zařízení namontováno,
- místa obsluhy a jejich chvění,
- charakteristické parametry zařízení včetně provozních a kritických otáček a údajů o rozběhu a doběhu stroje za předpokladu tuhého uložení stojanů,
- údaje o statickém i dynamickém zatížení,
- umístění a tuhost částí, kterými je stroj spojen s okolím (potrubí, kabely apod.),
- mezní hodnoty určujících veličin kmitání, které ještě neohrozí správnou funkci zařízení v rozhodujících místech základu,
- mezní přetvoření úložné plochy stroje,
- charakteristiky požadované přesnosti provedení.

Konstrukční pokyny

Základy točivých strojů mají být navrženy jako konstrukce s přehledným konstrukčním systémem, kterým je zajištěn jednoduchý a co nejkratší přenos zatížení do základové spáry. Blokové základy je třeba podle možnosti navrhnout jako souměrné, souměrně zatížené.

Železobetonové konstrukce základů

V projektu musí být určena skupina betonářských prací a případně všechny mimořádné požadavky na vlastnosti konstrukce a betonu. Aby nevznikly v železobetonových konstrukcích trhliny, musí se konstrukce základu vždy vyztužit ve všech třech osách v prostoru i když to podle výpočtů není nutné.

U konstrukcí základu z montovaného železobetonu a oceli je nutné věnovat mimořádnou péči návrhu styků tak, aby spolehlivě zajišťovaly spojení, spolupůsobení a tuhost konstrukce, popř. jejich částí i při dynamickém zatížení.

Vyrovnávací a podkladní beton pod dlažbu na povrchu horní části základu musí být navrhován tenčí než 50 mm. Je-li třeba navrhnout větší tloušťku, musí se vyrovnávací beton svázat s konstrukcí základů soustavou trnu a vyztužit konstrukční sítí ze slabších vyztužených vložek nebo svařovanou sítí.

Ocelové konstrukce základů

Při návrhu ocelové konstrukce se musí přihlížet k dynamickému charakteru zatížení a řešit uspořádání konstrukce tak, aby se omezil vliv konstrukčních i technologických vrubů. Doporučuje se používat uzavřené průřezy, konstrukce a styky svařované a pro styky případně VP šrouby. Ocelové konstrukce základů strojů musí mít protikorozi úpravu a musí být opatřeny protipožární izolací.

Pružné uložení stroje a zařízení

Nosné konstrukce pro uložení izolátorů chvění mají být konstrukčně spojeny s nosným systémem budovy tak, aby bylo dosaženo maximálních úspor.

Při použití izolátorů a tlumičů je nutno navrhnout taková konstrukční uspořádání, aby byla umožněna:

- přístupová cesta ke všem izolátorům chvění a tlumičům,
- výměna jednotlivých izolátorů chvění nebo tlumičů,
- potřebná úprava izolátorů chvění (aretace, jejich podložení podložkami atd.) a úložného prostoru (čištění),
- prostor, kde jsou umístěny izolátory chvění a tlumiče musí být zabezpečen proti nadměrnému znečišťování, zatékání apod., které by mohly ohrozit správnou funkci těchto izolátorů chvění.

Zakládání

Pro volbu způsobu založení je nutný speciální průzkum základové půdy, který je zaměřen i na dynamické účinky základů. Ve zvláštních případech (zvláště nepříznivé geologické podmínky) je třeba pamatovat na možnost rektifikace konstrukce, které se nejlépe dosáhne použitím vhodných izolátorů chvění. Zvláštní pozornost je nutno věnovat možnosti přenosu vibrací do okolí podloží, zejména při výskytu podzemní vody.

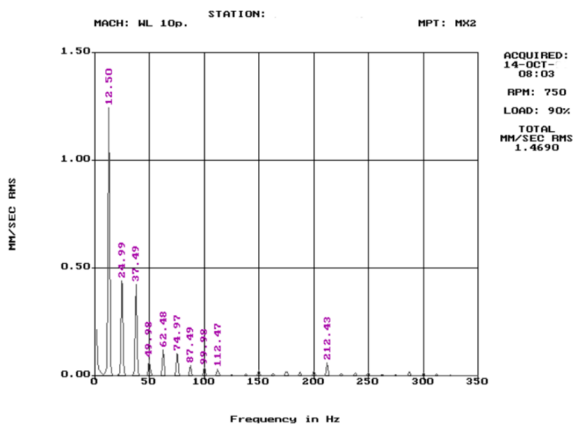
Dilatační spára mezi konstrukcí a základem

Konstrukce základů, a to horní část i základová deska mají být odděleny od okolních konstrukcí průběžnou dilatační spárou. Úprava spáry v úrovni povrchu horní části musí dovolovat vodorovný a svislý pohyb. Je nutno volit takové konstrukční řešení, které by zamezilo zanášení spáry nečistotami vzniklými při provozu stroje. V nevyhnutelných případech, kdy je nutno na konstrukci základů strojů uložit ostatní konstrukce, je nutno toto uložení přiměřeně upravit tak, aby nedocházelo k přenosu chvění. Navržená řešení se musí posoudit výpočtem.

10.5 Porušený základ pohonu provozováním

Jako příklad destrukce základů opotřeбенím provozováním a havárie stroje uvádím fotografie z prohlídky a opravy.

Mechanická a elektrická zařízení na povrchu dolu jsou ohrožena důlními otřesy. Naše organizace byla vyzvána k provedení měření vibrací Ward - Leonardova soustrojí (dále jen WL), které vyrábí stejnosměrnou energii pro těžní stroj. Místní ohledání bylo svoláno zástupci dolu na základě zjištěných nadměrných chvění soustrojí, které byly pozorovány obsluhou pouhým sluchovým a zrakovým vjemem. V průběhu ohledání bylo proměřeno chvění soustrojí a taktéž bylo zkontrolováno soustrojí bez jeho demontáže.



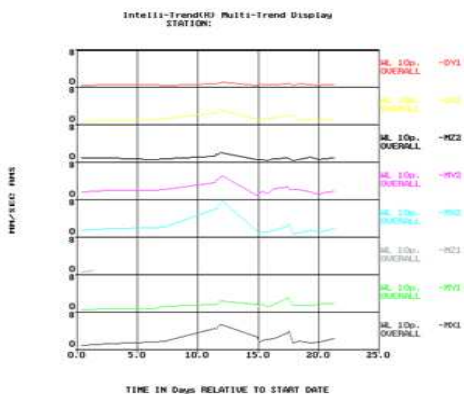
Obr. č. 14. 23: Vibrace WL soustrojí při prvním měření

Měření chvění vykazovalo zvýše hodnoty oproti normálu, které ještě nejsou v mezích havarijních. Také bylo zjištěno, že základový rám pod dynamem je uvolněn z betonového základu. Toto bylo možno zjistit pouhým pohledem a dotekem. Bylo nutno ihned zahájit opravu soustrojí s uvolněným základovým rámem, při prvním výroku jsme konstatovali, že je provozování je nepřijatelné a může způsobit poškození rotoru, statoru včetně komutátoru dynama.

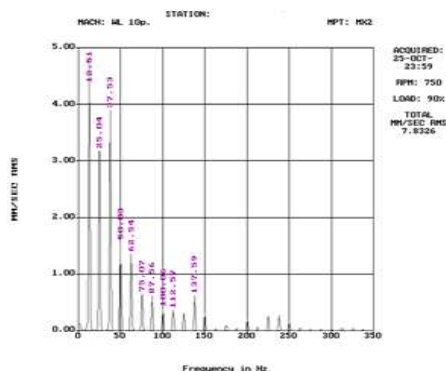
Provozovatel s ohledem na situaci v podzemí dolu potřeboval nutně tento stroj provozovat. Prováděli jsme měření chvění předmětného WL soustrojí ve 48 hodinových intervalech. Bylo provedeno měření chvění budovy, při kterém se ukázala jako dominantní amplituda s hodnotou 24 Hz.

Dále bylo dohodnuto, že provedeme za plného provozu zesílení nosného rámu a během tří dnů uděláme revizi celého soustrojí a zjistíme příčiny nadměrného chvění. Taktéž bylo dohodnuto se zástupci provozovatele, že provedou na vlastní náklady kontrolu budovy a základu WL soustrojí.

Po následujících 10 dní bylo provozování soustrojí beze změn (obr. č. 14. 24). V jedenáctém dni došlo k nadměrnému chvění, které bylo možno rozpoznat poslechem. Po proměření vibrací jsme zjistili, že chvění 2 – 3 krát narostlo a tento stav jsme prohlásili za kritický a doporučili jsme stroj zastavit a opravit. Jelikož stav podzemí dolu vyžadoval další chod stroje bylo rozhodnuto zástupci dolu stroj provozovat a my jsme chvění měřili ve tříhodinových intervalech. Kritický stav chvění byl stanoven na hodnotu 8 mm s^{-1} .



Obr. č. 14. 24: Trendy změn hodnot vibrací



Obrázek č. 14. 25: Spektrum hodnot vibrací

Chvění narostlo na hodnotu $7,2 \text{ mms}^{-1}$ a nařídil jsem, že stav chvění se bude monitorovat v hodinových intervalech a moji kolegové se budou trvale zdržovat u stroje. Kolegy mi bylo oznámeno, že je cítit zápach po pálení barvy okamžitě jsem nařídil zastavit stroj.

Naši pracovníci nastupovali na opravu WL soustrojí. Byl vytažen stator a ro-tor motoru ze základu. Ohledáním bylo zjištěno, že došlo k zadření rotoru o stator motoru WL. Konstatoval jsem, že je nutno motor opravit nebo nahradit novým.



Obrázek č. 14. 26: Demontáž elektromotoru

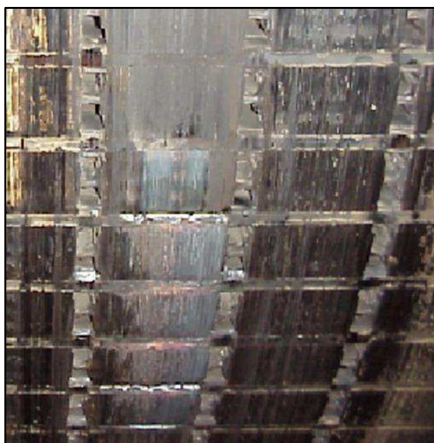
Kontrolou bylo dodatečně zjištěno na seizmické stanici, že když zaregistrovala otřesy, výrazně vzrostly také vibrace na WL soustrojí. Původem otřesu byl odstřel staré ventilační stanice, která stála ve vzdálenosti 100 m od jámy, u které je předmětné WL soustrojí.

Štítkové údaje soustrojí

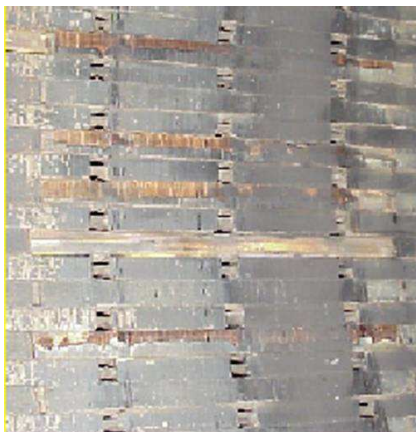
- dynamo: výkon – 2 200 kW, napětí – 650 V, otáčky – 750 ot/min, rok výroby – 1963
- motor: výkon – 2500 kW, napětí – 6 kV, otáčky – 750 ot/min, rok výroby – 1963

Nález poškození WL soustrojí

Po okamžité demontáži dynama a motoru jsme zjistili, že rotor se dotýkal statoru a obě části se poškodily. Viz obr. č. 14. 27 a 14. 28.



Obrázek č. 14. 27: Poškozený rotor



Obrázek. č. 14. 28: Poškozený rotor

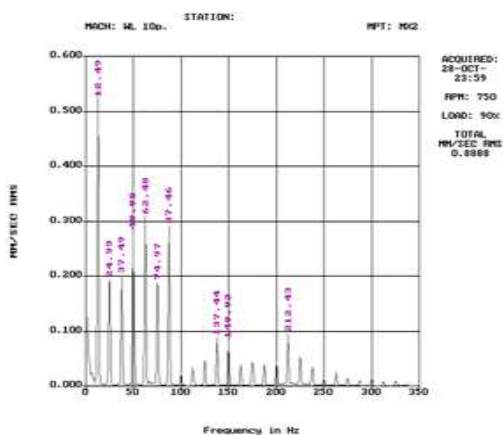
Z provozních důvodů bylo nutno urychleně opravit WL soustrojí. Provozovatelům se podařilo zapůjčit identický motor ze sousední šachty. Mezi tím byl zpevněn rám - obrázku č. 14. 29 a 14. 30. Kotvení základového rámu celého soustrojí k původnímu betonovému základu bylo nově uchyceno pomocí samolepicích svorníků $\Phi 24$, které byly do vyvrtaných otvorů v betonu zasunuty, a zalepeny k betonu viz obrázek níže.



Obrázek č. 14. 29: Doplňkové připevnění rámu k základu šrouby



Obrázek č. 14. 30: Doplnkové připevnění rámu k základu šrouby



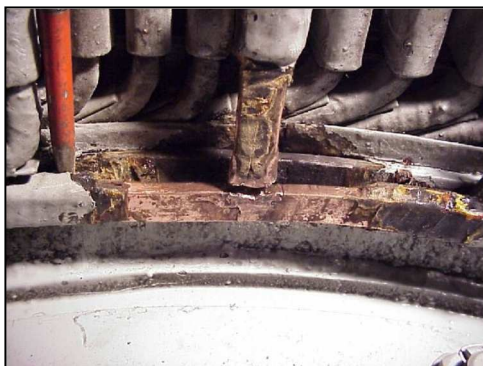
Obrázek č. 14. 31: Spektrum vibrací WL soustrojí

Před uvedením soustrojí do provozu provedl geodet důkladná měření budovy, základu i rámu a potvrdil, že jsou vodorovné, v tolerancích 1 ± 2 mm. Firma Hudeczek provedla laserové ustavení soustrojí. WL bylo uvedeno do provozu.

Provoz WL soustrojí

Po uvedení vyměněného motoru do provozu bylo provedeno měření chvění a stroj vibroval v úrovni hodnot stavu dobrého. Bylo prováděno pravidelné měření chvění. Vibrace stroje měly tendence nárůstu a to především na I. harmonické, což ukazuje na nevyváženost. (Viz obrázek č. 14. 31). Ze strany opravárenské organizace byl vznesen požadavek na zastavení stroje za účelem jeho dynamického vyvážení přímo na místě.

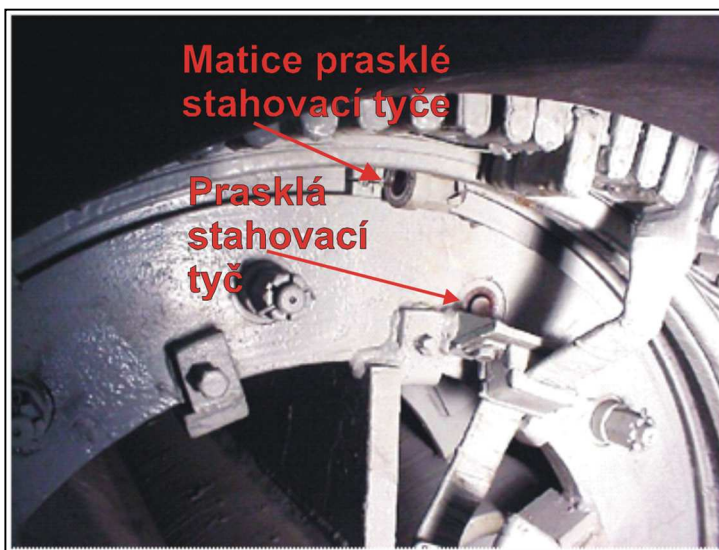
Při pravidelném měření stavu stroje jsem zjistil, že je ve strojovně cítit pálení barvy. Kontrolou bylo zjištěno, že zdrojem zápachu je motor W-L. Stroj byl zastaven. Vzniknul přechodový odpor na vyvedení jedné fáze vinutí do rotorového kruhu – nula (obrázek č. 9.). Zárodek možné velké havárie byl zjištěn včas.



Obrázek č. 14. 32: Příprava vinutí pro naletování vývodu na kruh stříbrnou pájkou

Závada byla odstraněna a soustrojí opět uvedeno do provozu. Po dalších hodinách provozu nám oznámili zástupci dolu, že při dojíždění těžního stroje do koncových poloh dochází v motoru WL k rázům. Nařídil jsem stroj zastavit a provést kontrolu stroje. Kontrolou bylo zjištěno, že došlo k prasknutí 1 z 12 stahovacích tyčí na rotoru a ulomený šroub, v přechodu závitu na tyč, se zachytil o spojovací nulový kruh a nosné čelo rotoru. Nedošlo k poškození vinutí rotoru ani statoru. Tento problém jsem konzultoval s konstruktérem tohoto stroje telefonicky s panem Ing. Jaroslavem Kopeckým. Pracovníci firmy Hudeczek mezi tím prováděli kontrolu ostatních stahovacích tyčí a zjistili další prasklou tyč. Dále bylo

zjištěno, že podložky pod maticemi ze strany kroužků rotoru nebyly přivařeny. Ing. Kopecký povolil krátkodobý provoz stroje bez dvou stahovacích tyčí. Původní záměr opravy byl takový, že budou vytaženy dvě protilehlé tyče tak, aby byl rotor vyvážen. Při vytahování byla jedna z tyčí vysunuta pouze o cca 10 cm a dál kladla tuhý kovový odpor. Rozhodnul jsem, že tyče zůstanou na původních místech a šrouby k nim budou přivařeny pouze z hlediska nerozvážení rotoru. Byla provedena kontrola dotažení ostatních šroubů – šrouby byly dotaženy o 1 – 2 otáčky. Veškeré podložky a matice na stahovacích tyčích byly přivařeny k sobě a ke stahovacím kruhům, podle doporučení konstruktéra. Při opravě byly zkontrolovány namátkově stahovací šrouby rámu. Kontrola dotažení byla provedena pomocí násobiče momentu a 1,5 m dlouhé tyče. Šrouby nejevily známky povolení. Viz obrázek č. 14. 33, 14. 34.



Obrázek č. 14. 33: Ulomený šroub zachycený o nuloý kruh



Obr. č. 14. 34: Prasklé šrouby

Závěr a doporučení provozovateli

Soustrojí bylo vyváženo a bez záruky opětovně uvedeno do provozu. Měření chvění bylo prováděno ve 24 hodinových intervalech, ve kterých se potvrdilo, že gradient nárůstu vibrací je stejný jako před havárií. Upozornil jsem vedení dolu, že v průběhu 24 hodin může nastat havárie. Na rotoru musí být provedena generální oprava. Další možností je výroba zcela nového rotoru. Po 100 hodin provozu WL soustrojí havarovalo.

Poučení

Elektrické stroje, které za sebou mají dlouhou dobu provozování, není možné vždy opravit. Oprava takových strojů je riziková a nezaručuje jejich spolehlivý provoz, když se opraví pouze ta část, která je poškozena (např. jen vinutí). Nikdo také neposkytne záruku např. na hřídele, stahovací šrouby, atd.

10.6 Měkký základový rám pod pohonem

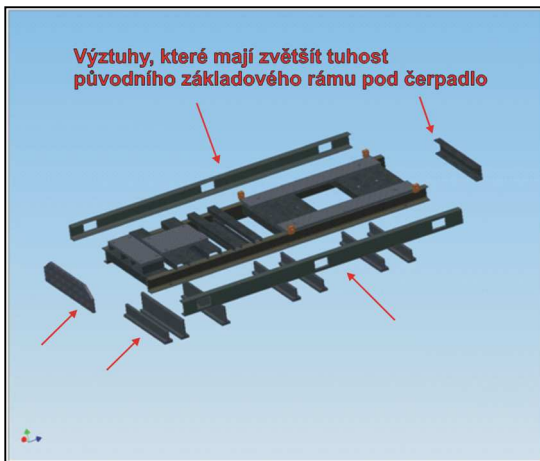
Při hledání příčin nadměrných vibrací na dříve zmiňovaném stroji byla zjištěna nedostatečná tuhost základového rámu z důvodu špatné konstrukce a nevyhovujícímu postupu při zalévání do betonu. Měkkost základového rámu se projevila chvěním s odlišnou frekvencí oproti jeho ostatním prvkům. Chvění mělo největší amplitudu na úrovni předních patek čerpadla. Při demontáži bylo dále zjištěno, že se mezi konstrukcí

a betonem, vytvořily při vylévání základů vzduchové kapsy, které měly nepříznivý dopad na tuhost rámu. Bylo proto nutné provést úpravu tohoto rámu. Tyto úpravy měly zabezpečit jednak zvýšení tuhosti samotného základového rámu a také zabezpečit požadovanou tuhost zalitím do betonu.



Obrázek č. 14. 35: Demontovaný měkký základový rám

Pro zabezpečení správného ukotvení základového rámu v betonovém podloží byly vytvořené výfukové otvory v kritických místech základového rámu. Po zalití základového rámu betonovou směsí se vzduch z uzavřených prostor vytlačí a základový rám je homogenně zalit. Na základě zjištěných nedostatků byla navržena rekonstrukce rámu viz obrázek č. 14. 36. Byly přidány vyztužovací prvky, které zajistily potřebnou tuhost a kotvící prvky, které garantovaly ještě lepší spojení s betonovým podkladem.



Obrázek č. 14. 36: Ideový návrh vyztužení základového rámu

Po úpravě základového rámu a jeho osazení do betonové vyzdívky byly na soustrojí opět proměřeny vibrace. Měřením vibrací bylo zjištěno, že došlo k poklesu kmitání v průměru o 13 %, to však bylo stále nevyhovující a musela být provedena další opatření.

10.7 Neodborně provedená montáž pohonu na základový rám

Jak již bylo řečeno v posledním období se zapomíná na základní montážní zákonitosti při montování a uvádění strojů do provozu. Základový rám bývá největší problém. Rámy jsou měkké a svařované. Po svařování základové rámy nejsou horizontálně srovnány. Při položení stroje na základový rám (hnačí a hnané části) vznikají mezery pod jednotlivými patkami. V lepším případě montéři mezery vypodloží nekvalitními podkládacími plechy, kterých je v mnoha případech 10 mm po jednom milimetru viz obrázek č. 14.37. Takto vytvořená vyrovnávací podkládací vrstva je zdrojem nelinearity celého soustrojí. Osobně tomu říkám „harmonika“, která způsobuje velké vibrace a stroj není možné uvést do harmonického stavu. Stroj vydává zvuky jak špatně naladěná kytara. Podkládacích plechů pod jednotlivými patkami může být maximálně do 1 mm a to z plechů z kvalitní oceli, které jsou běžně na trhu.



Obrázek č. 14.37: Ukázka špatných podkladacích plechů pod patky elektromotoru a taktéž silné vrstvy zvané „harmonika“



Obrázek č. 14.38: Ukázka špatně podložené patky čerpadla



Obrázek č. 14.39: Přesné podložky

Přesné podložky viz obrázek č. 14.39 jsou v prodeji v pěti základních velikostech dle velikosti patek stroje, v různých tloušťkách, vhodné pro většinu strojů. Výrobky jsou z velmi kvalitní nerezové oceli, odolné korozi v kyselém i zásaditém prostředí. Variabilní tloušťky, proto k dosažení požadované korekce obvykle není třeba více než tři podložky. Tím se předchází příznaku „listového pera“, který vzniká při podložení patky větším množstvím podložek. Jsou perfektně rovné, tím zajistí stabilitu patek stroje po celé ploše. Každá podložka je popsána informací o tloušťce a rozměrech. Za perforovaný úchyt lze podložky snadno vložit i vyjmout.

V horším případě, když montéři zjistí nerovnosti, všechny patky dotáhnou, v mnoha případech přes značně dlouhou páku nebo násobič momentů a je vše v naprostém pořádku. Při spuštění stroje, vykazuje stroj značné vibrace a nelze ho uvést do harmonického stavu. Opět špatně naladěná kytara. Špatně provedená montáž může způsobit zničení elektromotoru tím, že dotáhnutím patek dojde k vyosení statoru vůči rotoru elektromotoru. Toto vyosení má za následek nelinearitu magnetického pole elektromotoru a opět stroj maximálně vibruje a je neopravitelný. Táto zkáza, může nastat i pro čerpadla nebo ložiskové domky ventilátorů. Tím způsobem zničené stroje se musí nahradit novými.

10.8 Vliv pohonu na prostředí a prostředí na pohon

O vzájemném vlivu pohonu na prostředí a prostředí na pohon bylo napsáno mnoho. Vždy se o tom všichni zmiňují, pokud dojde k vyřešení záhady při provozu strojů a zařízení. Nikdy nikdo nebere při řešení anomálií na strojích v úvahu vzájemné spolupůsobení těchto dvou složitostí. Každý vymýšlí složité a především vědecké postupy. Při vyřešení problému jde ve většině případů o triviální technickou záležitost, lehce odborníkem technické diagnostiky vyřešitelnou. Při hledání závad na strojích vždy musíme mít na paměti vzájemné spolupůsobení dvou subjektů, strojů a prostředí.

Velkou zkušenost jsem zažil při řešení problému hluku, v jednom městě kde právě v jeho centru, dlouhá léta byla v chodu teplárna. Teplárna svým hlukem obtěžovala celé město. Někteří občané si stále stěžovali na hluk na všech možných institucích včetně u hlavního hygienika České republiky. Teplárenská organizace teplárnu odhlučnila dle mého názoru a následných měření přímo skvěle. Jednalo se o němý objekt zabalený do protihlukových plášťů.

Naším úkolem bylo provést měření hluku a posoudit kvalitu provedených prací při odhlučňování teplárenského komplexu. Po provedených měřeních a důkladné vizuální kontrole jsme došli k závěru, že teplárna je dobře odhlučněná a naměřené výsledky hluku jsou v mezích stavu velmi dobrého. Protokol jsme odevzdali objednateli, obdrželi za práci peníze a domnívali se, že všem stížnostem je konec a vše je v naprostém pořádku.

Pravý opak byl pravdou. V této věci se spojil se mnou osobně sám Hlavní hygienik České republiky a sdělil mi, že opět jistý obyvatel předmětného města si stěžuje na hlučnost, která jde z teplárny a nemůže vůbec v nočních hodinách spát. Také mě poprosil, abych udělal vše pro odhalení této anomálie. Stěžovatelé si stěžovali výš a výš.

Obdrželi jsme adresy bydliště stěžovatele a celou činnost jsme prováděli ze zorného úhlu místa bydliště poškozeného. Měření jsme prováděli v nočních i denních hodinách. Nebylo zjištěno nic, co by prozradilo příčinu stížnosti občana. Ze zoufalství jsme se utábořili na celou noc v těsné blízkosti bydliště stěžovatele. V průběhu této noci jsme zjistili, že když jde vítr od teplárny lze slyšet u činžáku lehký šum, který jak jsme později zjistili, uniká z vrcholu teplárenského komína. Vyústění komínu nešlo lépe technicky zaizolovat proti rušení okolí. Z druhé strany zjištěný lehký šum nemohl občana budit a nedovolit mu spát. Na základě tohoto jsme oficiálně požádali stěžovatele o spolupráci a provedli jsme měření hluku přímo v jeho bytě. Šum unikající z teplárenského komína nebyl absolutně měřitelný v bytě stěžovatele. Opět velký neúspěch.

Jak je v takových případech pravidlem, náhoda vyřešila celý problém. Další strávená noc při měřeních vedle bytu stěžovatele odhalila pravdu. Kolem třetí hodiny ranní v těsné blízkosti činžáku nastal silný rámus po dobu 20 až 30 vteřin. V ranních hodinách jsme zahájili pátrání po zdroji nadměrného hluku. Zdroj jsme našli ve výměňkové stanici vedle předmětné budovy, mimo jiné čerpadlo kondenzátu ve značně opotřebovaném stavu. Chod čerpadla byl nepravidelný. Čerpadlo nebylo vůbec ustaveno ani podle pravítka. Proto ten značný hluk. Čerpadlo jsme opravili a tím bylo všemu konec. Stěžovatel byl vždy zbuzen ze snu poškozeným čerpadlem kondenzátu, které bylo v chodu jen krátkou dobu. Po zastavení čerpadla se stěžovatel probral a následně z otevřeného okna slyšel lehký šum pozadí. Tak se domníval, že ho budí topárna. Budilo ho čerpadlo kondenzátu ve výměňkové stanici. Po odstranění vad na čerpadle kondenzátu stěžování skončilo. Je klid asi 18 let. Na tomto příkladu je vidět jak složitá je vzájemná interakce strojů a prostředí.

10.9 Nevyhovující souosost hnacího a hnaného mechanismu pohonu

Na nesouososti strojů jsem v podstatě zavedl technickou diagnostiku do všedního života údržby důlního podniku. Jako odpovědná osoba za montáž a údržbu strojů v podzemí dolu jsem zjišťoval, že při montáži důlních pásových dopravníků (ničím se neliší od pasových dopravníků v ostatním průmyslu; jde pouze o elektromotor, který je nevýbušný) nikdo nenese odpovědnost za mechanické spojení elektromotoru a převodové skříně pásového dopravníku. Elektrikáři tvrdí, že spojku mají na starosti strojaři a strojaři říkají, to je věc elektrikářů. O ustavování tohoto soustrojí nebyla ani řeč. Samozřejmě na pásových dopravnících byla značná poruchovost. Po zavedení spojkového a ustavovacího režimu, se stav okamžitě změnil a poruchovost se zmenšila na nulu.

Mezi spojkový a ustavovací režim patřilo:

- při znovupoužití spojek, spojka musela projít renovací (osoustružením, opravou povrchu při chybějící hmotě atd.),
- spojky nesměly být nabíjeny kladivem (při zjištění, byla udělena finanční pokuta),

- spojky musely být montovaný na elektromotor nebo převodovou skříň na povrchu za tepla,
- soustrojí muselo být ustavováno pomocí měrek.

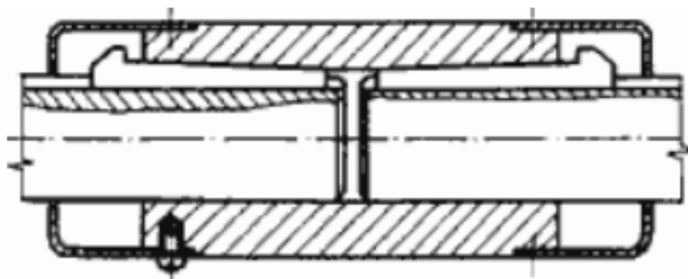
Tento režim byl zaveden v 80. letech minulého století.

Pro spolehlivý a bezpečný chod soustrojí elektromotor a poháněný mechanismus jsou nutné kvalitní a vhodné spojky.

Podle konstrukce rozdělujeme spojky na:

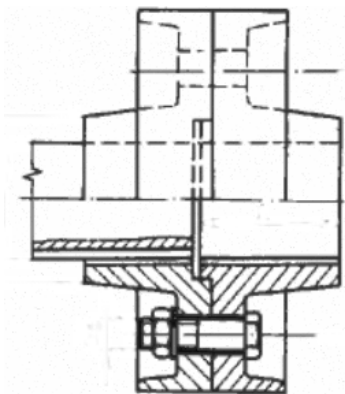
- tuhé
- poddajné
- pružné
- výsuvné
- zvláštní

Tuhé spojky spojují pevně dvě sousední hřídele. Trubková spojka je vlastně jednodílná tlustostěnná trubka s drážkou pro dva klíny.



Obrázek č. 14.40: Trubková spojka

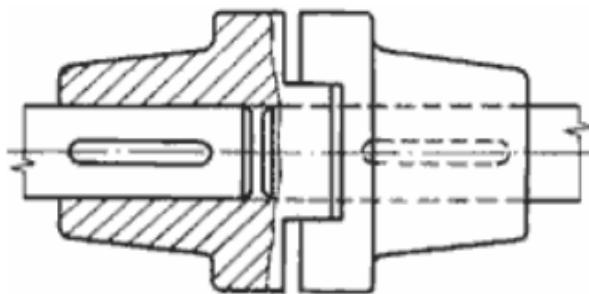
Kotoučová spojka se skládá ze dvou kotoučů do sebe zapuštěných a spojených šrouby.



Obrázek č. 14.41: Kotoučová spojka

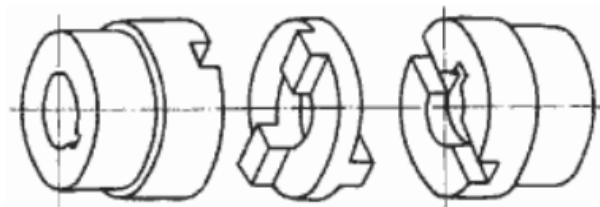
Poddajné spojky dovolují spojeným hřídelím určitý osový (axiální) posuv, mají měkký záběr a umožňují přenos točivého momentu s potřebnou vůlí pro spojení různoběžných (nesouosých) hřídelí.

Nejjednodušší poddajnou spojkou je dilatační zubová spojka. Skládá se ze dvou částí, které do sebe svými zuby zapadají. Zub jedné poloviny zapadá do drážky druhé poloviny. Mezi nimi však musí být osová vůle. Souosost spojky je zajištěna buď vloženým kroužkem (zasahuje do obou polovin vnitřní části spojky), nebo tím, že konec jednoho hřídele zasahuje do druhé poloviny spojky.



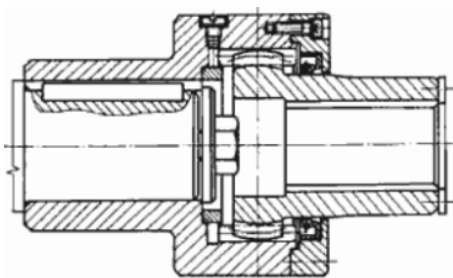
Obrázek č. 14.42: Dilatační zubová spojka

Křížová spojka umožňuje kromě axiálního posuvu i menší nesouosost hřídelí. Skládá se z hnací a hnané části, které bývají z oceli a středního křížového kusu z oceli nebo plastu.



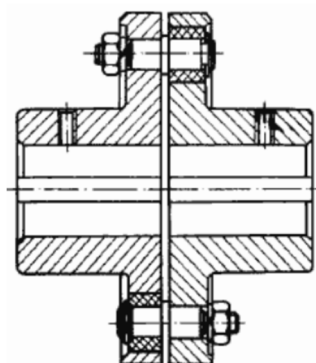
Obrázek č. 14.43: Křížová spojka

Zubová naklápěcí spojka umožňuje vychýlení hřídele v nábojích. Výhodou této spojky je malá hmotnost, malý moment setrvačnosti a snadná údržba.



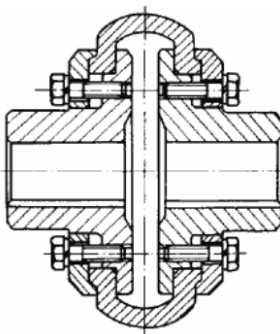
Obrázek č. 14.44: Zubová naklápěcí spojka

Čepová spojka má v jedné polovině ocelové čepy, které se o druhou polovinu opírají pryžovými pouzdry, jež nejen pruží, ale i elektricky izolují.



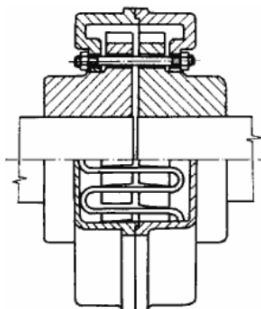
Obrázek č. 14.45: Čepová spojka

Pružná spojka s pryžovým věncem je velmi jednoduchá, odolná proti prachu a vlhku, dovoluje odchylku os hřídelí o 2° až 6° , výška přesazení až 3 mm a axiální posun hřídelí až 8 mm.



Obrázek č. 14.46: Pružná spojka s pryžovým věncem

Spojka s vinutou plochou pružinou je vhodná pro spojování hřídelí přenášejících malé i velké točivé momenty za nejnepříznivějších provozních podmínek. Spojka dovoluje menší nesouosost hřídelí, malou dilataci v axiálním směru, tlumí rázy a kmity, má velkou životnost. Pružina je mazána mazacím tukem, aby se zmenšilo její opotřebení.

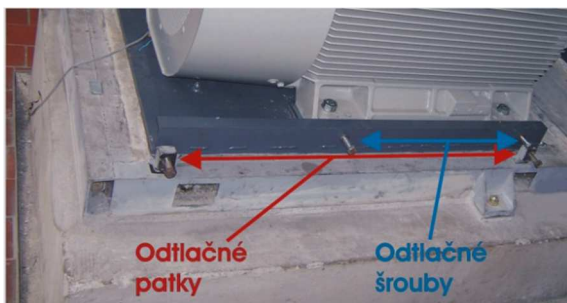


Obrázek č. 14.47: Spojka s vinutou plochou pružinou

Pro ustavování strojů musí být dodrženo pár zásad, aby byl úspěch stoprocentní. Mezi tyto zásady patří:

- Celý základ včetně rámu musí být 10 x těžší než stroje, který je na něm umístěn.
- Základový rám musí být pevný a rovný.
- U kotvicích šroubů stroje k rámu musí být pomocné nastavovací šrouby polohy celého stroje.
- Nikdy se stroje nesmí ustavovat boucháním do patek stroje 10 kg kladivem.
- První krok ustavování musí být proveden nahrubo pravítky.
- V druhém kroku provedeme ustavení stroje pomocí laseru.
- Přesnost ustavení se snažíme docílit maximální, minimálně však takovou, která je stanovena v doporučeních příslušné laserové techniky pro stroj určitých parametrů.

Takto ustavený stroj bude pracovat bez poruch a provozovatel nedá na něj nikomu sáhnout kromě vás. Takovou zkušenost už jsme zažili.



Obrázek č. 14.48: Odtlačné patky šrouby na frémě elektromotoru

Z obrázku č. 14.49 je patrna kontrola ustavení generátoru s převodovou skříní. Generátor má výkon 44 MW, 6 kV, 1 500 min⁻¹ otáček, převodová skříně má převod. Kontrola byla prováděna po opravě převodové skříně. Bylo zjištěno, že ustavení neodpovídá požadované přesnosti a pomocí laserového paprsku bylo soustrojí ustaveno na požadované parametry. Na obrázku č. 14.50 je prováděno ustavení elektromotoru a vodního čerpadla. Vodní čerpadlo zhavarovalo a bylo dodáno nové.



Obrázek č. 14.49: Kontrola ustavení generátoru s převodovou skříní



Obrázek č. 14.50: Ustavení elektromotoru a vodního čerpadla

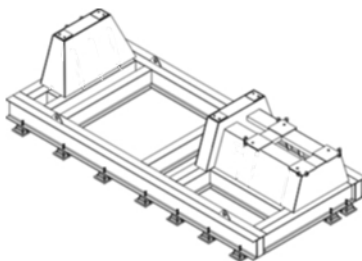
10.10 Rezonance pohonu

V průběhu mého vzdělávání, jsem mnohokrát na všech stupních studia slyšel slovo rezonance. Přednášející vždy vysvětlovali, že je to nejhorší co v elektrotechnice nebo strojírenství může nastat. Je tomu tak. To jsem pochopil v pozdějším věku při jedné činnosti, kterou níže uvedu.

V průběhu mých marketingových aktivit jsem se snažil, proniknout do jedné organizace. Bylo mi řečeno, že technickou diagnostiku již realizují dodavatelsky, tak se mnou nemůžou uzavřít smlouvu. Také mi sdělili, že mají jeden problém na kouřovém ventilátoru a nikdo doposud ho nevyřešil. Jednalo se o ventilátor o výkonu elektromotoru 36 kW, 400 V. Celý stroj byl posazen na základovém rámu, který byl odizolován od podlahy pružinovými izolátory.

Po provedení měření vibrací a vyhodnocení spekter jsem zjistil, že stroj je značně nevyvážený. Vibrace dosahovaly hodnot přes 8 mms^{-1} . Začal jsem vyvažovat a po vyvážení hodnota vibrací se snížila na 5 mms^{-1} což, stále bylo hodně. Po každém vyvažovacím procesu byla hodnota vyšší než 5 mms^{-1} . Byl jsem z toho šilený. V určitém momentu mě napadlo, že všechny teorie o rezonanci jsou pravdivé a já jsem se s tím setkal na tom ventilátoru. Věděl jsem, že celou soustavu musím přeladit do jiné vlastní frekvence než je vlastní frekvence elektromotoru, který rezonační soustavu budil. Jak jsem již uvedl, celý ventilátor byl uložen na pružinových

izolátorech. Použil jsem klíč číslo 24 a pružiny pod elektromotorem jsem dotáhnul. Stal se rázem zázrak a ventilátor přestal vibrovat. Maximální vibrace se pohybovaly kolem $1,5 \text{ mms}^{-1}$. Dotažením pružin, vlastní rezonační frekvence na rámu ventilátoru byly o hodně nižší než na elektromotoru. Soustava se stala tužší. Mnoho let jsem v této organizaci vykonával bezdemontážní technickou diagnostiku dodavatelským způsobem.



Obrázek č. 14.51: Ideové schéma základového rámu pod ventilátor pružinovými izolátory vibrací

Na obrázku č. 14.51 je zobrazeno ideové schéma frémy pod ventilátor. Konstrukce je umístěna na pružinových izolátorech vibrací.



Obrázek č. 14.52: Izolátor ISTAKO s viskózním tlumením kmitů řady PVT

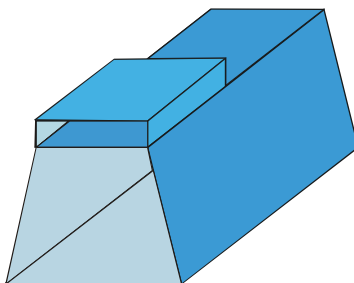
Na obrázku č. 14.52 je izolátor ISTAKO je to podstavný izolátor umožňující tlumení vibrací pomocí ocelových pružin, jejichž účinnost je zvyšována využitím viskózní kapaliny. Jsou vhodné pro uložení různých druhů strojů. Díky svým vlastnostem se dají použít v oblasti se seizmickými událostmi.



Obrázek č. 14.53: Izolátory chvění ISTAKO typu P 70 a P 80

Izolátory chvění ISTAKO typu P 70 a P 80 obrázek č. 14.53 s několika ocelo-vými pružinami slouží k pružnému ustavování ventilátorů, kompresorů, čerpadel, dmychadel, motorů, dieselagregátů, turbín, drtičů, šicích, tiskařských a různých dalších strojů, které jsou zdroji vibrací a nebo je potřebu-jeme před vibracemi chránit.

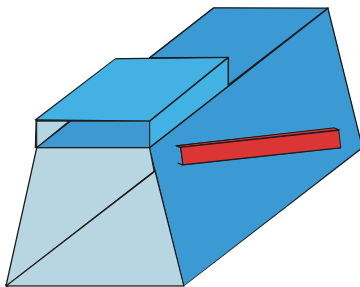
Několikrát jsem zjistil rezonanci na ventilátorech, které měly nosnou konstrukci zhotovenou z plechu. Tyto plechové frémy měly tendenci rezonovat. Ve většině případů ventilátory byly zakotveny do betonové podlahy bez vibračních izolátorů jakéhokoliv typu viz obrázek č. 14.54.



Obrázek č. 14.54: Ideový výkres nosné konstrukce elektromotoru a ventilátoru plechového typu

Vibrace ventilátorů a elektromotoru měly značné hodnoty a byly velmi hlučné. Tyto nosné konstrukce se daly lehce přeladit do nižších frekvencí tak, že na jejich delší bok z každé strany a do kříže bylo přivařeno U č. 80

nebo 100. Po tomto zákroku rázem došlo ke zklidnění soustrojí a bylo možné ventilátor vyvážit dynamicky přímo na místě. Většinou celé soustrojí nemělo vibrace větší jak 2 mms^{-1} . Upravená fréma viz obrázek č. 14.55.



Obrázek č. 14.55: Ideový výkres nosné konstrukce elektromotoru a ventilátoru plechového typu přeladěný na nižší frekvenci

S rezonancí budov a strojů jsem se setkal při uvádění těžního stroje do provozu na jednom z dolů v Karviné. Jednalo se o skipovou betonovou věž o výšce 104 m. Na úrovni 90 m byly instalovány dva těžní stroje každý o hmotnosti kolem 100 tun. Projektovaná rychlost pohybu skipových nádob v jámě byla 20 ms^{-1} což odpovídalo otáčkám soustrojí motor a třecí kotouč těžního stroje kolem 60 min^{-1} . Při funkčních zkouškách prvního namyto-vaného stroje se zkoušela průjezdnost jámy s postupně zvyšující se rychlostí. Při dovršení rychlosti nádob 16 ms^{-1} došlo ke kolébavému pohybu věže. Tento efekt všechny zděsil a já jsem měl pocit, že jsem na mořské lodi v době bouřky a dostal jsem málem mořskou nemoc. Po snížení nebo překročení této rychlosti nepříjemný pohyb věže ustal. Pro prezentaci toho efektu bylo namontováno v kabině strojníka jednoho ze strojů raménko, o délce asi 50 mm a zavěšeno volně na hřídelce. Při normálním stavu raménko kolmo viselo dolů. Při rozkmitání skipové věže, raménko mělo výkyv asi 15° na každou stranu. Problém se vyřešil tak, že byla na něm povelena rychlost $15,5 \text{ ms}^{-1}$. Stroj je provozován 30 let bez větších problémů.

Je to ukázka toho jak projektanti stavby nekontrolují vlastní frekvence budov. Problém se dá také změřit jednotkovým rázem do budovy. Je technicky nemožné provést. Muselo by se na velký a dlouhý jeřáb zavěsit

kouli o velké hmotnosti, koulí udeřit do budovy a současně měřit vibrace. Tím by se zjistila vlastní rezonanci budovy.

Další problém, který jsem řešil s rezonancí, byl při rekonstrukci jedné teplárny. Na původní stanoviště turbíny a generátoru měla být vytvořena nová nosná deska soustrojí a na něm namontováno soustrojí nové o větším výkonu. Na této stavbě jsem vykonával funkci kontrolora prací v oblasti elektrotechniky a točivých strojů. Pro základovou desku nebyly vypočteny rezonační frekvence. Výpočet se provedl dodatečně a bylo zjištěno, že vlastní frekvence základové desky a soustrojí se liší pouze o 5 %. Minimální frekvenční rozestup mezi dvěma systémy má být 10 %. Projekt základové desky byl přepracován a frekvenční rozestup mezi deskou a soustrojím činil 15 %. Deska byla vyrobena a přes 10 let soustrojí pracuje bez závad a ano-málií.

10.11 Výrobní nebo provozní závady na hnacím a hnaném mechanismu

Mnohokrát se stává, že je namontováno zařízení a po uvedení do zkušebního provozu nemá sjednané parametry. Je z toho vždy trochu dobře okořeněný guláš, protože se nikdo nehlásí k problému. Jsou to samozřejmě náklady, které zúčastněným organizacím za odstranění technických problémů nikdo nezaplatí. Takový jeden skutečný případ, který jsem řešil až na samém konci všech zúčastněných odborníků uvádím níže. Příklad jsem vyřešil ke zdárnému konci. Ve zkrácené formě uvedu, oč vlastně šlo.

Na základě objednávky technické pomoci firmou XYZ ze dne 25. ledna 2006 bylo ve dnech 2. února 2006 a následně 8. února 2006 firmou HUDECZEK SERVICE, s. r. o. u objednatele provedeno měření vibrací na oběžném čerpadle OČ XX. Protokoly o této činnosti jsou uloženy v archivu firmy.

Předmětem technické pomoci bylo posouzení technického stavu soustrojí sestávající se z horizontálního čerpadla a elektromotoru. Oběžné čerpadlo bylo plynule regulovatelné frekvenčním měničem.

Elektromotor měl jmenovitý výkon 6,5 – 315 kW, napájecí frekvence 15 – 50 Hz, jmenovité otáčky 898,6 – 2 974 min⁻¹, jmenovité napětí 400 V.

Oběžné čerpadlo mělo tyto parametry: P/t 25/120, počet lopatek N8, průměr lopatek D313 mm.

Po podepsání všech obchodních formalit, jsme se začali zabývat problémem, který máme řešit. Mezi jinými jsme obdrželi k nahlédnutí a posouzení protokoly a zprávy od jiných firem, které navrhovaly řešení jak závadu odstranit.

Čerpadlo asynchronním elektromotorem bylo uvedeno do zkušebního pro-vozu v září 2003. Dále na tomto soustrojí následovaly tyto poruchy:

- 2/2004, došlo k poškození ucpávky OČXX. Byla provedená demontáž, servis, montáž, ustavení, uvedení do provozu
- 12/2004, poškozená ucpávka OČXX, zničené ložiska, poškozený ložiskový domek. Byla provedena výměna ložisek a ložiskového domku, demontáž, ustavení, uvedení do provozu
- 3/2005, čerpadlo stále vibruje, demontáž čerpadla, odvoz do servisní dílny, výměna ložisek za ložiska z vyšší přesností,
- 3/2005, výměna ložisek elektromotoru,
- 6/2005, "Vypálená" svorkovnice elektromotoru,
- 5/2005, zjišťování příčiny chvění, úprava čerpadla,
- 11/2005, poškozený ložiskový domek, demontáž čerpadla, dodávka nového čerpadla. Provedení zkoušky - výměna pozic OČXX1 x OČXX2, měření chvění, montáž OČXX1 a OČXX2 zpět na pozice, ustavení, uvedení do provozu, čerpadlo stále chvěje.
- 2/2006, Firma HUDECZEK SERVICE, s. r. o., Albrechtice provedla měření chvění a analýzu měření, zjistila závadu na elektromotoru.

Závadou byla nesymetrie elektromagnetického pole elektromotoru. Elektromotor byl špatně vyroben:

- 5/2006 do 8/2006 měření chvění na nedokonalé vyrobeném elektromotoru ve výrobním závodě a nezávislé zkušebně,
- 5/2006 do 6/2006, úprava a vyztužení základů pro možnost použití s původním motorem,
- 3/2007 do 5/2007 Výroba a montáž nového základového rámu pro ukotvení nového elektromotoru

Stav viz níže protokol firmy HUDECZEK SERVICE, s. r. o., Albrechtice

Níže je uvedený protokol jisté renomované firmy, která provedla měření čerpadla přímo v provozu a také na svém pracovišti. Pro zajímavost uvádím některé výsledky tohoto protokolu.

Předmět měření

Předmětem měření bylo horizontální čerpadlo. Jedná se o jednostupňové spirální čerpadlo (axiální sání DN 200, výtlak T-O DN 150), rotor utěsněn mechanickou ucpávkou. Parametry čerpadla: $Q = 550 \text{ t/h}$, $H = 112 \text{ m}$, $n = 2980 \text{ min}^{-1}$.

Realizovaná měření vibrací

Při proměnných otáčkách zkušebního motoru byly snímány celkové hodnoty vibrací čerpadla (10-1000 Hz) v místě ložiska u spojky v horizontálním a vertikálním směru $v_{ef} [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$

Ve shodných měřicích místech a shodných otáčkách byly dále realizovány záznamy spektra vibrací. Byla snímána efektivní rychlost vibrací ve frekvenčním pásmu 10-500 Hz.

V horizontálním směru měření byly realizovány "track" analýzy - záznamy amplitudy a fáze (amplitudy 1., 2. a 4. řádu) při ustálených otáčkách a při rozběhu a doběhu soustrojí.

Dále byly zjišťovány vlastní amplitudofázové charakteristiky – tzv. "TRANS" analýza, kdy je sledována odezva neprovozovaného systému, který je vybuzen sinusovou silou z externího budiče. Touto zkouškou mohou být zjišťovány jednotlivé vlastní (rezonanční) frekvence a při nastavení budiče na rezonanční frekvenci také tzv. tvar kmitu.

Zkušební stand

Pohon byl zajišťován elektromotorem zkušebny 330 kW, 2960 ot/min. k přenosu kroutícího momentu byla použita hřídelová spojka zkušebny. Potřebná hladina tlaku na sání byla zajištěna podávacím čerpadlem. K měření průtoku bylo použito indukčního průtokoměru zabudovaného v pře-váděcím potrubí mezi podávacím a měřeným čerpadlem.

Shrnutí výsledků zjištěných na zkušebně

- po provedené úpravě hydrauliky čerpadla se celkové vibrace snížily na max. $3,4 \text{ mms}^{-1}$ v horizontálním směru
- složka otáčkové frekvence ve spektru nepřevyší hodnotu cca $0,5 \text{ mms}^{-1}$
- složka na lopatkové frekvenci (8. řád) a i 4. řád jsou po provedených úpravách nevýrazné
- v záznamech spektra vibrací (při max. provozních otáčkách) zůstávají významné složky na vysokých frekvencích, a to cca 150 a 290 Hz, které souvisejí s vlastními frekvencemi sestavy ve zkušebním uspořádání. Nejvýraznější je vliv zkušební spojky (vlastní frekvence $\sim 302 \text{ Hz}$), rotoru (oběžného kola) čerpadla ($\sim 157 \text{ Hz}$) a vliv uchycení čerpadla k podlaze zkušebny ($\sim 225 \text{ Hz}$). Odezvy za provozu při těchto vlastních frekvencích jsou pak odpovídajícím způsobem zesilovány budícími silami, tj. otáčením rotoru nebo lopatkovou frekvencí, v pásmu, které je ovlivněno regulačním rozsahu (změny otáček)
- z toho důvodu bylo doporučeno pro provoz na díle aplikovat max. tuhé spojení oběžného kola a hřídelové spojky na rotor, aby se shora zjišťované vlivy co nejvíce omezily. Pro částečné zvýšení dopravní výšky bylo doporučeno provést podpilování výstupní konců lopatek

Pozice čerpadla na teplárně

Čerpadlo je v technologii teplárny provozováno jako oběhové s plynulou regulací otáček.

Výsledky měření vibrací na stanovišti čerpadla.

analýzy spektra:

- nejvýraznější složka vibrací je vázána na otáčkovou frekvenci, další složky v rozkladu spektra jsou z hlediska hodnocení celkových hodnot vibrací nevýznamné.

Při měření na čerpadle bylo provozovatelem upozorněno na výskyt nadměrných vibrací na svorkovnici elektromotoru.

Výsledky "trans" analýzy

Vzhledem k rozdílným výsledkům skladby spektra vibrací měřeného na zkušebně a na místě provozu byly zjišťovány opět rezonanční frekvence při použití externího budiče síly, síla byla zaváděna do různých míst sestavy. Významný vliv byl zjištěn na sacím potrubí v horizontální rovině. Z realizovaných měření je významná rezonanční frekvence sacího potrubí (~40 Hz) v horizontálním směru kolmo na osu.

Shrnutí výsledků vibrací na stavbě

- *ve spektru vibrací na čerpadle je patrná pouze složka otáčkové frekvence, amplituda na této frekvenci byla $3,7 \text{ mms}^{-1}$ při otáčkách 48,6 Hz*
- *tato skladba vibrací je naprosto odlišná od spektra zjištěného na zkušebně, při měření zde je složka na otáčkové frekvenci minimální,*
- *z těchto důvodů a s přihlédnutím ke zjištěné hodnotě vlastní frekvence je možno konstatovat, že jde opět o problém vybuzení rezonance. Charakter vibrací zjišťovaný při měření čerpadla na stavbě nesouvisí přímo s jeho stavem (kvalitou výrobního provedení), ale je výrazně ovlivněn vlastnostmi celého dynamického systému,*
- *příčina vibrací svorkovnice elektromotoru v místě blízkém kabelové vývodky je opět vybuzení rezonance, samovybuzení je způsobeno dvojnásobkem frekvence otáčení motoru.*

Doporučení opatření

Snížení vibrací čerpadla by bylo možno s velkou pravděpodobností dosáhnout dostatečným oddálením rezonanční frekvence od provozní oblasti (s rezervou alespoň 20 %). V daném případě by bylo zřejmě nutno upevnit sací potrubí v horizontálním směru tak, aby vlastní frekvence tohoto uložení byla dostatečně vzdálena od maxima provozních otáček tj. na cca 60 Hz. Tato úprava by byla zřejmě značně komplikovaná, její realizace by byla spojena s nutností vynaložení značných nákladů při určité míře nejistoty dosažení dobrých výsledků. Z tohoto důvodu je v tomto případě doporučováno ponechat projekční uspořádání beze změn a pro-vádět průběžné monitorování stavu vibrací.

Toto doporučení je podloženo skutečností, že zjišťované vibrace nejsou nijak zvlášť vysoké a také proto, že je možno provádět hodnocení vibrací i na základě jejich změny. Vibrace je možno obecně hodnotit dle dvou kritérií tj. sledováním velikosti vibrací respektive sledováním změny velikosti vibra-cí. Ve druhém případě lze posuzovat změny vibrací vzhledem k předem stanovené referenční hodnotě. Tato referenční hodnota by mohla být dána právě výsledky měření, jež jsou výše uvedeny, neboť bylo možno na základě provedených šetření konstatovat, že vlastní čerpadlo je vyhovující. Problém vibrací krytu elektromotoru je možno označit jako velice významný, v krajním případě by mohlo dojít k ohrožení obsluhy, došlo-li by k poškození izolace kabelu. Bylo doporučeno problém řešit ve spolupráci s výrobcem elektromotoru.

Přípustné meze vibrací pro čerpadla

Měřené čerpadlo je možné dle zjištěných výsledků zařadit do třídy mohutnosti vibrací $< 4,5 \text{ mms}^{-1}$. Vzhledem k přenášeným výkonům a typu čerpadla je možné vibrace považovat za uspokojivé, které nebudou mít při setrvalém stavu vliv na provozuschopnost čerpadla.

Závěr protokolu

Měření mechanického kmitání posuzovaného čerpadla bylo realizováno jednak na zkušebně a také při provozu na díle.

Charakter vibrací byl při obou měření zcela odlišný. Zatímco na zkušebně převažovaly ve spektru složky vysokých frekvencí, na stavbě byla dominant-ní složka na otáčkové frekvenci.

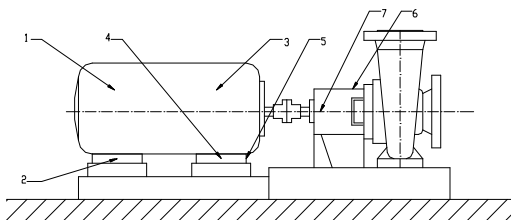
Při bližším šetření vibrací na stavbě byla zjištěna vlastní frekvence potrubního řádu na sání v horizontálním směru, jejíž hodnota je na počátku pracovní oblasti čerpadla ($\sim 40 \text{ Hz}$). Zvýšené vibrace čerpadla na otáčkové frekvenci pak pravděpodobně vznikají vlivem jejich rezonančního zesílení.

Vzhledem k tomu, že nejvyšší měřená hodnota vibrací v horizontálním směru nepřesáhla mez $4,5 \text{ mms}^{-1}$, je doporučováno čerpadlo ponechat v trvalém provozu, zavést režim průběžného monitorování a sledovat jeho změny.

Odstranění problému vibrací svorkovnice elektromotoru je nutno řešit neprodleně, zřejmě změnou tuhosti krytu.

Výňatky z protokolu měření firmy HUDECZEK SERVICE, s. r. o., Albrechtice ze dne 26. 2. 2006.

Měření vibrací proběhlo na předem zvolených měřících bodech dle obrázku č. 14. 56 ve třech etapách:



Obrázek č. 14. 56: Umístění měřících míst na oběžném čerpadle

I etapa – měření zatíženého soustrojí

V bodech (1) a (2) jsou dominantní amplitudové špičky na 1x a 2x harmonické složce vibrací s velikostí nepřesahující $v_{ef} = 0,73 \text{ mms}^{-1}$.

V místě (3) byla pozorována dominantní složka s velikostí $v_{ef} = 0,37 \text{ mms}^{-1}$ na frekvenci 166 Hz a v místě (6) na frekvenci 366 Hz dosahovala velikosti $0,42 \text{ mms}^{-1}$. Tyto složky odpovídají 2x a 4x lopátkové frekvence oběžného čerpadla při frekvenci 41,6 Hz.

V místě (7) byla rovněž detekována velmi vysoká amplituda o velikosti $v_{ef} = 2,37 \text{ mms}^{-1}$ na 1. harmonické frekvenci otáčení.

II etapa – Měření motoru naprázdno

Na základě výše uvedených měření byl učiněn závěr, že je pravděpodobně vadný asynchronní elektromotor a pro potvrzení tohoto výroku bylo nutné odpojit elektromotor od zátěže (rozpojit spojku). Při měření nezatíženého motoru byly naměřeny následující hodnoty vibrací ve spektru vibrací:

V místech (1), (2) a (4) jsou na frekvenci 50 Hz výrazně zvýšené amplitudy vibrací. Tyto složky odpovídají frekvenci otáček elektromotoru. V bodě (1) a (5) jsou na frekvenci 100 Hz dvojnásobně zvýšené hodnoty vibrací, což je nepřípustné a svědčí o nesymetrickém elektromagnetickém poli elektro-motoru, který ve své podstatě způsobuje zvýšené chvění při zatížení elektromotoru čerpadlem. Zvýšené chvění se projevuje především na čerpadle.

III etapa – Měření motoru naprázdno s eliminací vlivu frekvenčního měniče

Při přemostění frekvenčního měniče vykazoval elektromotor stejné hodnoty vibrací jako ve II etapě. Vliv frekvenčního měniče na zvýšené kmitání je tedy zanedbatelný a není důvodem k dalšímu posuzování.

Zjištěné montážní závady a nedostatky na soustrojí:

Na zařízení bylo zjištěno několik nedostatků souvisejících s montáží a ustavením zařízení. Tyto nedostatky způsobují nesprávný chod celého zařízení a musí být odstraněny pro zajištění chodu čerpadla ve stanovených vibračních limitech. Jedná se zejména o:

- Nevhodné podložky kotevních šroubů na čerpadle a elektromotoru,
- doporučujeme použití silnějších podložek, případně předepnutých podložek.
- Nekvalitní vymežovací plechy pod patkami elektromotoru jsou z běžné oceli.
- Nesprávná montáž vymežovacích plechů pod patkami elektromotoru, vymežovací plechy jsou nevhodně umístěny (nezabírají celou plochu patky).
 - při použití většího počtu plechů umístěných na sobě se doporučuje použít stejnou velikost plechů
 - zdvojování plechů by nemělo být provedeno jejich zahnutím

- Slabá konstrukce frémy pod soustrojím konstrukce frémy neodpovídá požadavkům pro použití jako nosného prvku pro dané zařízení; doporučujeme proto stávající frému vyztužit nebo vyrobit novou.

Závěr

Při chodu zatíženého motoru byly detekovány zvýšené amplitudy vibrací v radiálním směru na frekvenci 50 Hz, což odpovídá otáčkové frekvenci elektromotoru. V bodě (1) a (5) jsou na frekvenci 100 Hz dvojnásobně zvýšené hodnoty vibrací, což je nepřípustné a svědčí o nesymetrickém elektromagnetickém poli elektromotoru, který ve své podstatě způsobuje zvýšené chvění při zatížení elektromotoru čerpadlem. Zvýšené chvění se projevuje především na čerpadle.

Při provozu nezatíženého elektromotoru s vyřazeným frekvenčním měničem (motor byl napojen přímo na rozvodnou síť) byly detekovány zvýšené amplitudy vibrací v radiálním směru na patkách elektromotoru a to na frekvenci 50 Hz a 100 Hz. Touto zkouškou byly eliminovány jakékoliv vlivy působení frekvenčního měniče nebo vliv oběžného čerpadla na chod elektromotoru.

Z dříve uvedených měření a poznatků je stanoven závěr, že zvýšené vibrace vyskytující se na čerpadle jsou způsobeny především nesymetrií elektro-magnetického pole elektromotoru a zároveň jsou také způsobeny nedokonalostí základového rámu celého soustrojí elektromotor – čerpadlo. Základový rám je nedostatečně tuhý. Poddajnost rámu pod čerpadlem lze zjistit pouhým dotykem prstu při zatíženém čerpadle.

Po měření oběhového čerpadla firmou HUDECZEK SERVICE, s. r. o., odběra-telé žádali po dodavateli ztuzit základový rám čerpadla a dodat nový elektromotor, který bude předem firmou HUDECZEK SERVICE, s. r. o., pro-měřen za účelem zjištění, zda opět není vadný.

V prvním kole byl vyztužen základový rám a opět provedeno měření chvění. V inkriminovaných bodech celkové chvění pokleslo pouze o 15 %. Tento pokles nevyhovoval hodnotě vibrací, kterou měly strany sjednanou při přejímce.

V druhém kole byl vyměněn elektromotor za nový. Této výměně předcházelo měření původního elektromotoru na dvou nezávislých zkušebnách. Všude se výsledek firmy HUDECZEK SERVICE, s. r. o., potvrdil.

Dne 10. 5. 2007 bylo provedeno měření vibrací na soustrojí oběžného čerpadla OČXX. Důvodem měření je zjištění vibrací soustrojí po výměně vadného motoru a po úpravách základového rámu.

Měření vibrací elektromotoru a čerpadla bylo provedeno na předem určených místech dle přiloženého schématu v horizontální, vertikální a axiální rovině. Proběhlo v zatíženém stavu při 50 % a jmenovitém výkonu elektromotoru, tj. při konstantních otáčkách elektromotoru $1\,500\text{ min}^{-1}$

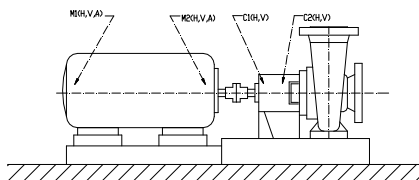
a $2\,850\text{ min}^{-1}$. Naměřené hodnoty jsou udány v mm s^{-1} efektivní rychlosti vibrací. Frekvenční rozsah měření mohutnosti vibrací je $0 - 1\,000\text{ Hz}$.

Následně byla provedena frekvenční analýza spektra vibrací a mohutnosti vibrací. Vibrace mechanických částí strojů jsou hodnoceny dle následujících stupňů:

DOBŘÝ stav – bez příznaku mechanického poškození

USPOKOJIVÝ stav – je nutno sledovat konkrétní uvedené ložisko (převod) v kratších periodách. Toto zajišťuje oddělení vibrodiagnostiky. Je nutný současně zvýšený provozní dozor.

NEUSPOKOJIVÝ stav – ložisko (převod) jsou poškozené; připravit jeho výměnu.



Obrázek č. 14. 57: Umístění měřících bodů sestavy oběžného čerpadla

Analýza frekvenčních spekter vibrací a celkových vibrací při jmenovitém zatížení

Ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací měřených v bodě M1H jsou dominantní amplitudy na otáčkové frekvenci 47,5 Hz a na druhé harmonické frekvenční složce 95 Hz. Nárůst vibrací na těchto složkách je dán zvýšením provozního zatížení na jmenovitý výkon elektromotoru. Hodnoty amplitud jsou přípustné.

Ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací v měřicím bodě M1V jsou patrné amplitudy vibrací na 1. a 2. harmonické složce a na frekvenci průchodu lopatek čerpadla. Hodnoty amplitud nejsou alarmující.

Ve frekvenčním spektru nebyly rychlosti vibrací měřených v bodě M1A detekovány žádné mechanické problémy. Hodnoty amplitud jsou malé.

Analýzou frekvenčního spektra rychlosti vibrací v bodě M2H byly detekovány vyšší amplitudy na 1. a 2. harmonické složce vibrací, související se zvýšením zatížení elektromotoru. Hodnoty amplitud nejsou alarmující.

Ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací měřených v bodě M2V je dominantní amplituda vibrací na frekvenci 37,5 Hz (otáčková frekvence elektromotoru). Amplituda není alarmující.

Ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací měřených v bodě M2A v axiálním směru jsou dominantní amplitudy na frekvencích 37,5 Hz a 150 Hz. Hodnoty amplitud vibrací nejsou alarmující.

Analýzou frekvenčního spektra rychlosti vibrací měřených v bodě C1H čerpadla v horizontálním směru byla detekována zvýšená amplituda na otáčkové frekvenci 47,5 Hz v horizontálním směru, která pravděpodobně souvisí s působením odstředivých sil od zbytkového nevývážku na spojce nebo lopatkách čerpadla ve směru s nižší tuhostí čerpadla. Zároveň se zde vyskytuje vyšší amplituda na lopátkové frekvenci čerpadla. Nárůst je zapříčiněn zvýšením provozního zatížení lopatek čerpadla. Hodnoty nejsou bezprostředně alarmující.

Analýzou frekvenčního spektra v bodě C1V nebyly zjištěny žádné mechanické poruchy na čerpadle. Amplitudy ve spektru nejsou alarmující.

Ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací měřených v bodě C2H je opět dominantní složka na otáčkové frekvenci 47,5 Hz, vzniklá působením nevývážnosti rotoru čerpadla. Hodnota amplitud není alarmující.

Ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací C2V je patrná vyšší amplituda na lopatkové frekvenci čerpadla 377,5 Hz s výskytem oblasti s postranními pásmy kolem této frekvence. To je pravděpodobně způsobeno hydrodynamickými účinky na lopatky čerpadla. Amplituda není alarmující.

Závěr:

Měřením vibrací a analýzou frekvenčních spekter na elektromotoru při jeho jmenovitém zatížení byly hodnoty vibrací ve většině sledovaných oblastí na hodnotách amplitud úměrných počtu otáček a přenášenému výkonu.

Výraznější zvýšení amplitud bylo detekováno na druhé harmonické složce otáček převážně v horizontálním směru, kdy hodnoty amplitud dosahují dvojnásobné hodnoty otáčkové frekvence.

Hodnoty celkových vibrací na elektromotoru byly v pásmu DOBRÝ.

Analýzou frekvenčního spektra rychlostí vibrací měřených v bodě C1 čerpadla v horizontálním směru byly detekovány zvýšené amplitudy na otáčkové frekvenci 47,5 Hz. Na této frekvenci se obvykle projevuje nevyváženost rotoru. Vzhledem k tomu, že hodnota amplitud na této frekvenci ve vertikálním směru téhož místa je znatelně menší, usuzuji na sníženou tuhost čerpadla v horizontálním směru.

10.12 Špatně provedená frekvenční analýza naměřených spekter v jednotlivých bodech pohonu

Mnoho technických diagnostiků považuje za měření vibrací, měření celkové hodnoty chvění. V podstatě, je nezajímá frekvenční analýza naměřených spekter a určení příčiny poškození stroje. Dle mého názoru to dělají ti odborníci, kteří ovládají metody diagnostikování a taktéž ovládají měřicí techniku. To co naměří, je až tak dalece nezajímá, v horším případě naměřeným výsledkům nerozumí. Čím lepší mají přístrojovou techniku, tím více jsou zajímavější v očích odběratele. Většinou dodavatelská firma, která jim prodala drahé přístrojové vybavení, a ještě dražší programové vybavení, je vyškolí, dle mé zkušenosti k měření ložisek, a jejich závěry také směřují ve většině případů, že jsou vadná ložiska. Omlouvám se všem, kteří to dělají jinak. Musím také zdůraznit, že doba kdy přístroje prodávali zkušení odborníci v technické diagnostice, je za námi. Dnes to jsou především odborníci, kteří chtějí - musí prodat přístroje za každou cenu jinak nebudou živí.

Jeden takový případ, který jsem uváděl na pravou míru, po takzvaných odbornících níže popisuji. Byl jsem pozván do jedné organizace k posouzení stavu stroje, který poháněl asynchronního elektromotoru s kotvou kroužkovou o těchto parametrech:

- výrobce MEZ Drásov
- asynchronní 3f motor střídavý
- typ 1V6 7104-8
- IM 1001
- výrobní číslo 140 637
- 630 kW, S1
- stator 6 KV, 74,8 A
- rotor 1 kV, 389 A
- otáčky 743 ot/min
- třída izolace F
- hmotnost 5 790 kg
- rok výroby 1981

Po zjištění stavu přímo u provozovatele a podpisu nezbytných obchodních formalit, jsme přistoupili k posouzení celkového stavu.

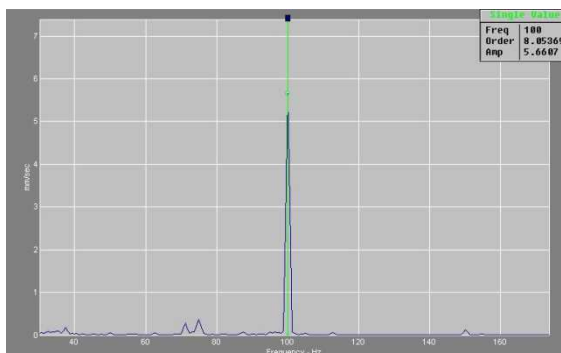
Obdrželi jsme výsledky měření po dvou po sobě opakujících se závadách od předchozí firmy, která na předmětném stroji prováděla technickou diagnostiku. Ve svých protokolech po provedeném měření na prvním poškozeném elektromotoru jednoznačně uvedla, že na elektromotoru jsou vadná ložiska. Elektromotor byl vyměněn za náhradní, který organizace měla k dispozici. Jednalo se totiž o stroj první důležitosti. Při jeho zastavení stála celá firma. Poškozený stroj byl odeslán do opravy.

Po výměně elektromotoru byl stroj uveden do provozu a provedeno opět stejnou diagnostickou firmou měření. Chod stroje dle výpovědi provozovatele byl stejný jak v předchozím případě a výsledek protokolu opět stejný jak v předchozím. Ložiska elektromotoru jsou vadná. Na obrázku č. 14.58 je frekvenční spektrum jednoho z měřících bodů špatně diagnostikovaného elektromotoru. Frekvenční spektrum je v rozsahu od 0 do 1 000 Hz. Vibrace jsou měřeny v efektivní hodnotě RMS. V celém rozsahu frekvenčního spektra není ani jedna amplituda, kterou by bylo možno přiřadit k vadě ložiska.



Obrázek č. 14.58: Frekvenční spektrum jednoho z měřících bodů špatně diagnostikovaného elektromotoru

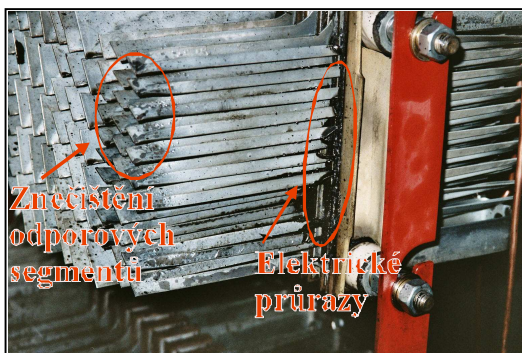
Na obrázku č. 14.59 je frekvenční spektrum jednoho z měřících bodů špatně diagnostikovaného elektromotoru. Frekvenční spektrum je v rozsahu od 0 do 2 00 Hz. Vibrace jsou měřeny v efektivní hodnotě RMS. Frekvenční spektrum má jednoznačně maximální amplitudu na 100 Hz z čehož lze jednoznačně usuzovat o nesymetrii elektromagnetického pole elektromotoru.



Obrázek č. 14.59: Frekvenční spektrum jednoho z měřících bodů špatně diagnostikovaného elektromotoru

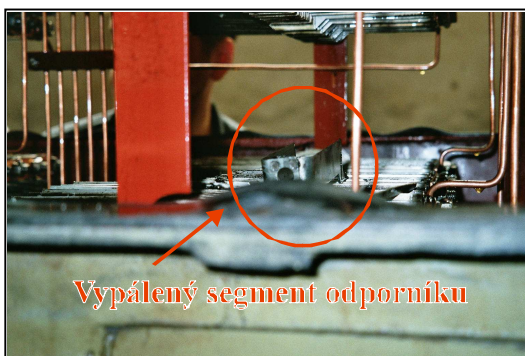
Po těchto zjištěních jsme začali na vyměněném elektromotoru hledat příčiny tak velké elektromagnetické nesymetrie. Proměření základních elektrických parametrů statoru a rotoru elektromotoru jsme nic nezjistili. Výsledky měření byly dobré. V následném kroku jsme přistoupili k proměření odporového spouštěče, který byl chlazený izolačním olejem.

Objevili jsme opět Ameriku. Odporový spouštěč byl tou pravou příčinou problému s elektromotorem a dvakrát po sobě opakovanou jeho výměnou. Provedli jsme analýzu izolačního oleje. Olej byl v celém rozsahu kontrolovaných izolačních parametrů nevyhovující. V důsledku nízké izolační hladiny došlo k vypálení odporníku.



Obrázek č. 14.60.: Odporové segmenty spouštěče

Na obrázku č. 14.60 jsou odporové segmenty spouštěče, které jsou značně znečištěné od propáleného izolačního oleje. K propalování oleje docházelo při spouštění elektromotoru, kde při samotném startu elektromotoru v okamžiku $t = 0$ docházelo k elektrickým průrazům v důsledku zemního spojení.



Obrázek č. 14.61.: Odporové segmenty spouštěče

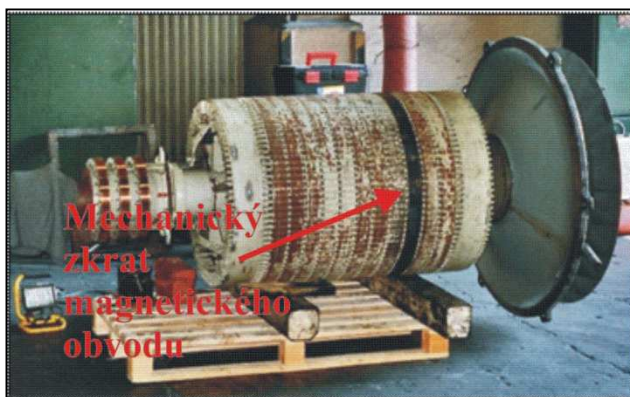
Na obrázku č 14.61 je vidět upálený odporový segment spouštěče, který upadl na další řadu odporů, tím způsobil další vyřazení odporu s celkové hodnoty spouštěče. Tím vznikla značná nesymetrie napětí a proudu při rozjždění elektromotoru.



Obrázek č. 14.62: Vypálené odporové segmenty spouštěče

Na obrázku č. 14.62 jsou vypálené odporové segmenty spouštěče. Dle rozsahu působení zkratového proudu a dalších následků je neuvěřitelné, že příslušné obsluhy stroje to nepostřehly a taktéž, že údržbáři při kontrolách nic nezpozorovali.

Po těchto zjištěních jsme doporučili odběrateli provést demontáž elektromotoru včetně vytažení rotoru a provést důkladnou kontrolu magnetických obvodů včetně vinutí a drážkové izolace a jednotlivých drážkových klínů. Odběratel na to přistoupil.



Obrázek č. 14.63: Poškozený magnetický obvod rotoru

Po vytažení rotoru ze statoru kontrolovaného elektromotoru jsme zjistili, že po celém obvodu v jedné sekci rotorových magnetických plechů nastalo mechanické dření nějakého uvolněného elementu. Viz obrázek č. 14.63.



Obrázek č. 14.64: Poškozený magnetický obvod statoru

Na obrázku č. 14.64 je poškozený magnetický obvod statoru. Kontrolou jsme nezjistili příčinu tohoto poškození. Vysvětlení je jednoduché, při poruše spouštěče došlo k vytvoření značné nesymetrie proudu a napětí a k následnému průrazu magnetického obvodu a část vystřeleného kovu způsobila degradaci elektromotoru.

Po těchto zjištěních odběratel rozhodl dle našeho návrhu, že odporový spouštěč bude nahrazen spouštěčem novým a to elektronickým. Elektromotor byl odvezen do opravy a následně nasazen do provozu.

Díky tomu, že odborníci technické diagnostiky určili špatnou diagnózu, měl majitel továrny značné náklady způsobené novou investicí elektronického spouštěče, opravou dvou kusů elektromotorů nemalého výkonu, šestitýdenním zastavením továrny, protože se jednalo o primární stroj, nedodržení smluvních vztahů zákazníků a možná i ztrátu některých klientů.

10.13 Měření provedeno pouze na strojní nebo elektrické části pohonu

Před napsáním této kapitoly požádal mě jeden odpovědný vedoucí pracovník velké organizace o konzultaci ve věci problémů na čerpadle užitkové vody, kterou je zásobován objekt poslední úpravy výrobku před jeho prodejem. Jedná se o čerpadlo první důležitosti. Problém, o kterém jsem chtěl psát v této kapitole je stále důležitý i v roce 2011 proto ho zde popisuji, jako nadále aktuální chyby technických diagnostiků.

Organizace má svou vlastní technickou diagnostiku. Výše uvedené čerpadlo má doposud (v době kdy to píši, problém není odstraněn) velmi vysoké hodnoty vibrací na základní harmonické. Při rozhovorech s odpovědným vedoucím pracovníkem jsem zjistil, že čerpadlo bylo již vyměněno za nové a vibrace jsou stále stejně velké. Na dotaz jak velké chvění má elektromotor, bylo mi odpovězeno, že nebyl změřen z hlediska vibrací. Taktéž nebyla věnována žádná pozornost základům tohoto čerpadla. Moje rada zněla: změřit vibrace elektromotoru a taktéž ať prověřit tuhost základového rámu. Doposud neznám výsledky jejich měření a možná, že měření provedeme my.

Jednoznačnou příčinou těchto problémů je skutečnost, že nikdo s diagnostiků této organizace nemá příslušné elektrotechnické vzdělání a nezabývá se problematikou elektromotorů.

10.14 Konstrukční neznalost diagnostikovaného pohonu

Mnoho krát jsem se setkal s tím, že protokol o provedené diagnostické kontrole byl technickým nesmyslem. Diagnostici provedli měření ložisek na daném stroji, prohlásili, že ložiska jsou dobrá a stroj nadále vykazoval anomálie. Takovýto závěr měl příčinu v hrubé neznalosti stroje, měření nebylo připraveno podle zásad, které jsem uváděl v předchozích kapitolách. Pro diagnostická měření není dostačující znát zásady počítačové

techniky, digitálních měření, přenosu dat, ale je nutné znát fyzikální podstaty dějů probíhajících v technice, je nutná znalost základů elektrotechniky, základů strojírenství, nutno mít velmi dobré znalosti o pohonech a jejich regulaci atd. Pokud tyto znalosti diagnostici nemají, škodí technické diagnostice a nejsou přínosem pro její šíření do každodenní technické praxe.

