

# SOUVISLOST MEZI TEPLOTOU A VIBRACEMI V DIAGNOSTICE ROTAČNÍCH STROJŮ

Ing. Mečislav HUDECZEK, Ph.D.

Ing. Lucie GABRHELOVÁ

Ing. Jaroslav BRYCHCY, Ph.D.

HUDECZEK SERVICE, s. r. o., Albrechtice

## 1. ÚVOD

Provoz jakéhokoliv rotačního stroje je doprovázen vznikem tepla a vibrací, a to v jeho třecích uzlech, elektromagnetickém obvodu a ventilačním systému. Vznik teplot a vibrací přitom neznamená vždy závadu na stroji. Teploty a vibrace strojů se za normálních podmínek od jeho rozběhu za nějaký čas ustálí a jsou pak provozovány při tzv. provozních podmínkách. Tyto provozní podmínky jsou dány výrobcem stroje nebo jednotlivých komponent stroje, případně normou nebo provozním předpisem stroje.

Dojde-li v průběhu provozu stroje ke změně jeho technického stavu (zhoršené mazání, zvýšené opotřebení, deformace součástí apod.), změní se i jeho teplota a vibrace, případně teplota a vibrace jednotlivých částí stroje. Na základě sledování změn těchto provozních parametrů v čase je možné posoudit technický stav stroje. Hodnota teploty a vibrační přímo ohrožuje bezpečný a spolehlivý chod stroje. Nebezpečí je hlavně v prostorách s nebezpečím výbuchu hořlavých plynů a par, v prostorách s nebezpečím výbuchu výbušnin, v prostorách s nebezpečím požárů nebo výbuchu hořlavých prachů, plynujících a uhlíkových dolech při těžbě a úpravě ropy a zemního plynu a při vrtných a geofyzikálních pracích a při podzemním skladování plynů nebo kapalin.

Tento článek popisuje závislost mezi těmito dvěma veličinami – vibracemi a teplotou. Ačkoliv nesporně existuje mezi těmito veličinami určitá vzájemná vazba, je důležité si uvědomit, která z příčin má za následek změnu teploty a která změnu vibrací. Ne vždy totiž platí, že s rostoucími vibracemi rostou i teploty a naopak, že s rostoucími teplotami rostou vibrace. K tomu působí v provozní praxi další vlivy, které ovlivňují jednu či druhou veličinu, jako je teplota okolí, chlazení stroje, způsob mazání, které mají vliv na měřenou teplotu ložisek, případně uložení stroje (pružné či pevné, nebo provoz v rezonanci), které naopak ovlivňují velikost absolutních vibrací.

## 2. VZNIK A ŠÍŘENÍ TEPLA A VIBRACÍ ROTAČNÍCH STROJŮ

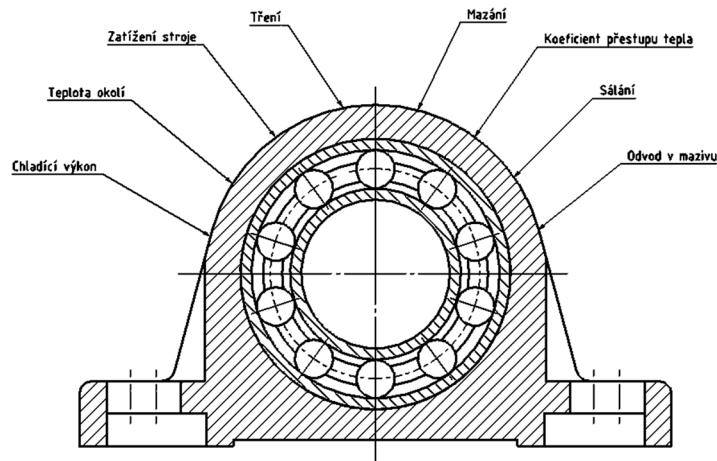
Teplota je jedna z nejdůležitějších termodynamických vlastností, které určují stav hmoty, a objevuje se v mnoha fyzikálních zákonech. Existuje jen velmi málo vlastností látek, které by nebyly teplotně závislé. Ve své podstatě je teplota mírou kinetické energie pohybu molekul a atomů, přičemž molekuly na sebe navzájem narážejí a rychlost jejich pohybu se stále mění v čase. Pokud na hmotu nepůsobí okolní prostředí, je průměrná rychlost pohybu molekul konstantní. Tato průměrná rychlost je závislá na teplotě a termodynamická teplota libovolného tělesa je přímo úměrná kinematické energii molekul neboli přímo úměrná jejich hmotnosti a kvadrátu rychlosti pohybu. Za nejnižší teplotu se pokládá absolutní teplotní nula neboli nula termodynamické stupnice (0 K), během níž veškerý pohyb ustává. Pro stanovení teploty se používá teplotní závislosti jejich fyzikálních veličin. Volí se takové fyzikální jevy, u nichž lze závislost veličiny matematicky vyjádřit teplotní stupnicí.

Vznik teplot a vibrací zmůžeme deklarovat na příkladu valivého ložiska. Valivé ložisko libovolného stroje tvoří klasický třecí uzel, ve kterém vzniká teplo. Například u elektromotorů je přenášena většina vibračních složek z rotačních částí elektromotoru na stator. Na toto ložisko tedy působí několik faktorů, jak ukazuje obrázek 1.

Patří tam především vliv maziva a mazání, provozního zatížení, míry opotřebení, vliv okolního prostředí, vliv vnitřního prostředí stroje, vliv statického a dynamického zatížení.

Pokud budeme chápat ložisko jako součást, kde platí určitá energetická bilance, pro provozní stav ložiska, tj. pro ustálené hodnoty provozní teploty a provozních vibrací musí platit rovnováha mezi celkovou energií vydanou ložiskem a celkovou energií přijatou do ložiska. Pro energetickou tepelnou bilanci ložiska platí, že provozní teplota ložiska je dána rozdílem tepla vzniklého v ložisku a tepla, které ložisko přijímá ze svého bezprostředního a okolního prostředí. Teplo vzniklé v ložisku je převážně dáno třecími procesy mezi valivými tělisky a kroužky

ložiska, třením kovových částí ložiska s mazivem a také dynamickými účinky působícími v ložiscích, čili vibracemi.



Obr. 1: Ložiskový domek

Pro teplo vyzařované na povrchu ložiskového štítu tedy můžeme sestavit energetickou bilanci ve tvaru:

$$Q_p = Q_T + Q_D + Q_S + Q_E - Q_V - Q_O - Q_M$$

kde  $Q_p$  je teplo na povrchu ložiskového štítu

$Q_T$  je teplo vzniklé třecími procesy

$Q_D$  je teplo vzniklé dynamickými účinky v ložisku

$Q_E$  je teplo přijaté ložiskem z ostatních částí elektromotoru

$Q_S$  je teplo vzniklé statickými účinky v ložisku

$Q_V$  je teplo ztracené vedením

$Q_O$  je teplo odebrané okolím

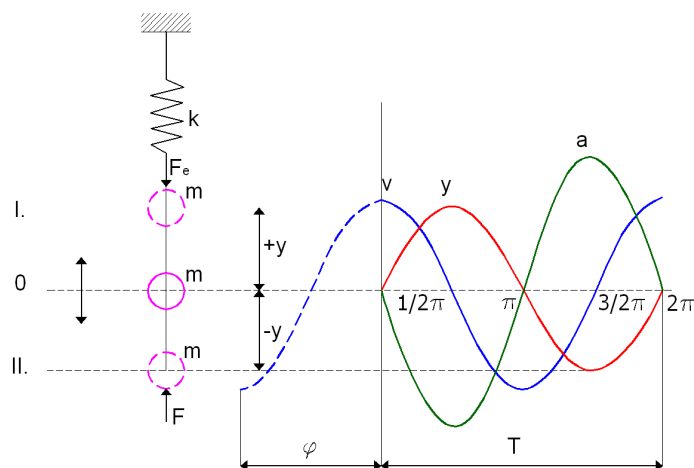
$Q_M$  je teplo odebrané mazivem

Z tohoto vztahu plyne, jak náročné je posoudit jaké množství tepla je způsobeno právě vibracemi přenášenými do ložisek, pokud nejsou známy ostatní teplotní zdroje a spády. Teplotní ohřev, který souvisí pouze s vibracemi, je dán složkou  $Q_T$ , kde vznikají vibrace ve vyšších spektrálních oblastech a složkou  $Q_D$ , kde naopak je teplo způsobováno nízkofrekvenčními dynamickými ději v ložisku. Největší podíl na vzniku tepla mají třecí účinky, čili účinky vyskytující se ve vysokofrekvenčním spektru jako je špatné mazání, opotřebení valivých ploch ložiska, případně znečištěné mazivo. Oproti tomu teplo způsobené dynamickými účinky u dobrého ložiska je menší, neboť se vyskytují na nižších frekvencích. Při postupně se rozvíjejících vadách v ložiscích dochází k postupnému zvyšování obou těchto složek a vzniká tak nadměrné oteplení.

### 3. VZNIK VIBRACÍ A TŘENÍ, MAZÁNÍ

#### Vibrace u rotačních strojů a elektromotorů

Vibrace jsou kmitavými pohyby povrchů těles. Každý kmitavý pohyb je možné charakterizovat třemi veličinami, a to amplitudou  $A$ , periodou  $T$  respektive frekvencí  $f$  případně úhlovou frekvencí  $\omega$  a fází  $\varphi$ . Tyto tři parametry plně charakterizují kmitavý pohyb.

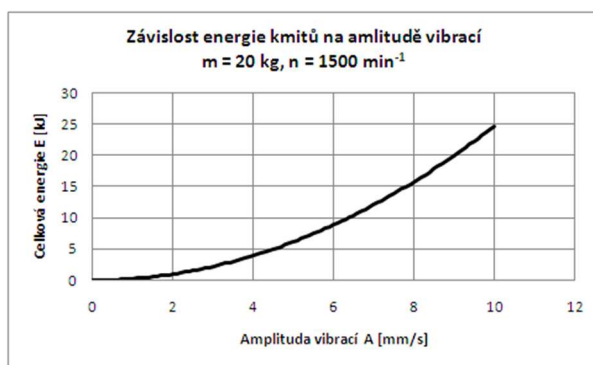


Obr. 2 Popis kmitavého pohybu hmotného bodu

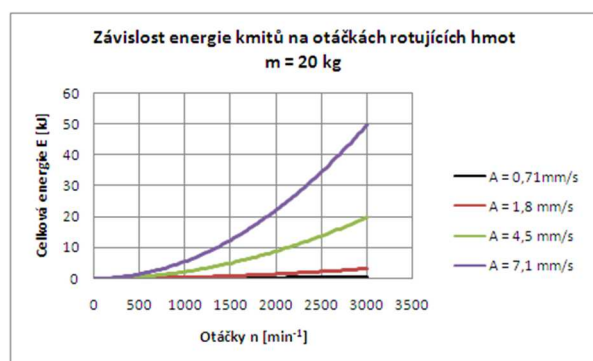
Při kmitavém pohybu vzniká kinetická energie  $E_K$  a potenciální energie  $E_P$ . Pro harmonický průběh můžeme jejich výslednou složku  $E$  vyjádřit ve tvaru:

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot A^2$$

Energie kmitavého pohybu je tedy závislá na hmotnosti kmitající části  $m$ , kvadrátu úhlové frekvence  $\omega$  a kvadrátu amplitudy kmitavého pohybu  $A$ .



Obr. 3 Graf závislosti celkové energie kmitání na amplitudě vibrací



Obr. 4 Graf závislosti celkové energie kmitání na otáčkách rotujících hmot pro jednotlivá pásma vibrací A, B, C, D stroje třídy I. dle ČSN ISO 10816-3

### Tření v ložiscích rotačních strojů

Tření je jev, který vzniká mezi dvěma pohybujícími se plochami. Vznikají při něm třecí síly, které působí proti vzájemnému jejich pohybu. Pro překonání těchto sil je nutné vykonat práci, která se následně mění v teplo. V ložiscích se zpravidla setkáme s klidovým třením, smykovým třením a valivým třením (odporem), dále pak s hydrostatickým a hydrodynamickým třením. Smykové třecí síly mezi jednotlivými částmi ložisek jsou dány vlastnostmi jejich třecích ploch (koeficientem smykového tření) a kolmou zatěžující složkou síly podle vztahu:

$$F_T = f \cdot F_L$$

Teplu vzniklé smykovým třením je pak dáno prací ložiska potřebného k překonání všech třecích sil:

$$Q = W = W_K + W_T + W_O + W_M$$

kde  $W_K$  je práce potřebná k rozběhu stroje

$W_T = F_{TS}$  je práce potřebná k překonání třecích složek v ložisku (prokluzování jednotlivých valivých elementů, tření v ložiskové kleci)

$W_O$  je práce spotřebovaná na překonání valivého odporu

$W_M$  je práce potřebná k překonání odporu maziva (závisí na jeho hustotě, viskozitě, dávkování a čistotě)

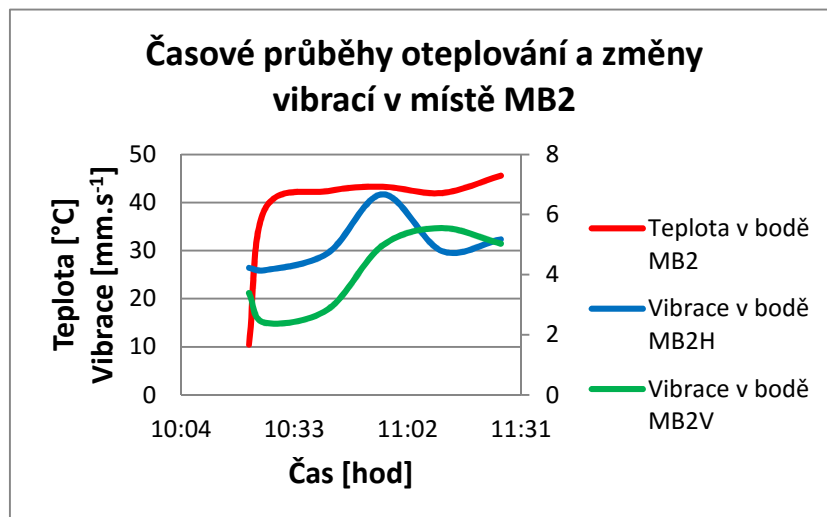
Výsledná práce  $W$  pak vyvolá v ložiskovém systému o hmotnosti  $m$  a měrné tepelné kapacitě  $c$  oteplení  $\Delta T$  podle vztahu:

$$\Delta T = \frac{W}{m \cdot c}$$

### Mazání ložisek

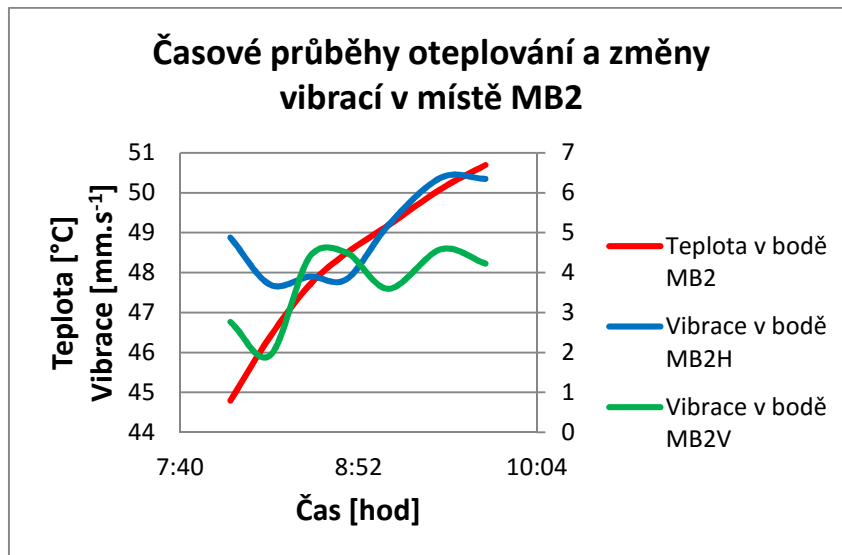
Funkce mazání má v ložiscích několik hlavních úkolů, a to zmenšit tření a opotřebení, odvod tepla případně nečistot a zabránění koroze. Kromě toho je jejich vedlejším účinkem, i když žádoucím, tlumení rázů a vibrací. Je tedy zřejmé, že způsob mazání ložisek má výrazný vliv na přenos vibrací z rotujících částí na nerotující části i na to, jakou teplotu naměříme na povrchu. Toto závisí zejména na druhu mazání a maziva (olejové mazání brodivé rozstříkovací, olejovou mlhou, oběhové mazání, mazání plastickým mazivem, a podobně). Kupříkladu plastická maziva mají větší schopnost utlumit vibrace než maziva olejová. A oběhové olejové mazání zprostředkovává větší odvod tepla než mazání brodivé.

## 4. UKÁZKA DAT Z MĚŘENÍ NA LOŽISKOVÉ JEDNOTCE ZKUŠEBNÍM MODELU



Obr. 5 Časový průběh oteplování a změny vibrací v MB2

Na grafu je vidět, že teplota v čase roste a následně se ustaluje. Zatím co vibrace po ustáleném tepelném stavu klesají.

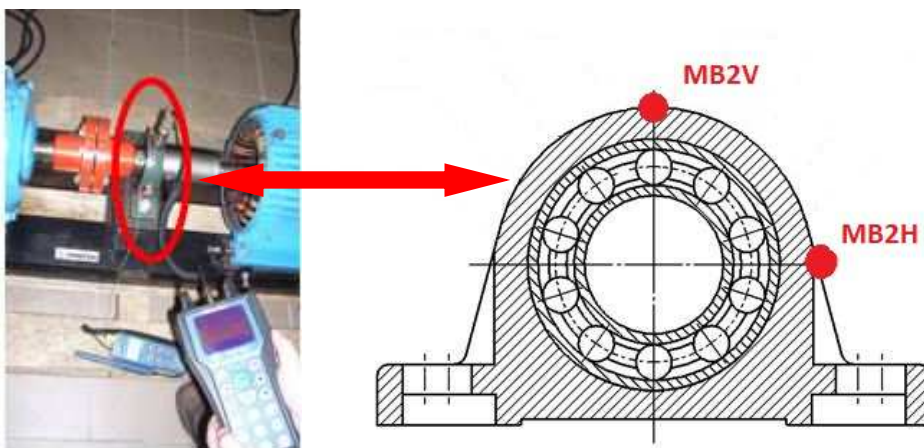


Obr. 6 Časové průběhy oteplování a změny vibrací v místě MB2

Z grafu je patrné, že s rostoucí teplotou se vibrace přímo úměrně zvyšují a při dosažení teploty 50,5°C stroj je prohřátý a vibrace klesají z titulu vymezení vůlí v ložiscích a v magnetickém obvodu elektromotoru.

## 5. ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ

Měřením a následnou analýzou teplot a vibrací na ložiskovém domku bylo zjištěno, že s narůstající teplotou rostou i vibrace do prohřátí stroje a následně klesají.



Obr. Č. 7: Schéma měřících bodů