



Národní konference s mezinárodní účastí INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

DYNAMICKÉ JEVY V HYDRAULICKÉM LOŽISKU

Pavel Hlavoň¹, Lubomír Houfek²

Abstrakt

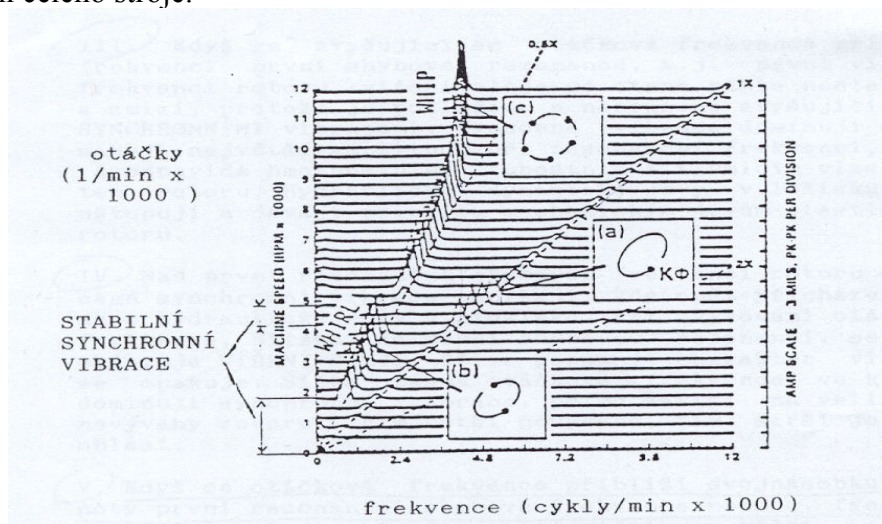
Hydraulická ložiska jsou speciálním typem strojních soustav, která se v praxi poměrně často vyskytují. Na rozdíl od hydrodynamických tlumičů se ve spektru hydraulických ložisek vyskytují významné nestability typu subharmonických vibrací na necelé polovině otáčkové frekvence rotoru, známé jako tlučení oleje a víření oleje. Tento příspěvek je orientován na experimentální analýzu těchto nestabilních vibrací.

Klíčová slova

Hydraulické ložisko, víření oleje, tlučení oleje, Whirl, Whip, spektrum, kaskádový diagram.

Popis dynamických jevů

Dynamické jevy, vyvolané interakcí mezi rotorem a pohybem kapaliny v ložisku nebo v ucpávce byly zjištěny před více než 50 léty. Vibrace hřídele s velkou amplitudou, které mohou přetrvávat v širokém rozmezí provozních otáček dle lit. [1], nejen narušují normální provoz rotačního stroje, ale mohou také způsobit závažné poškození celého stroje.



Obr.1 Víření a tlučení oleje v kaskádovém spektru (dle lit. [1])

¹ Ing. Pavel Hlavoň, VUT FSI Ústav mechaniky těles, Technická 2, Brno, 616 69
hlavon@umtn.fme.vutbr.cz

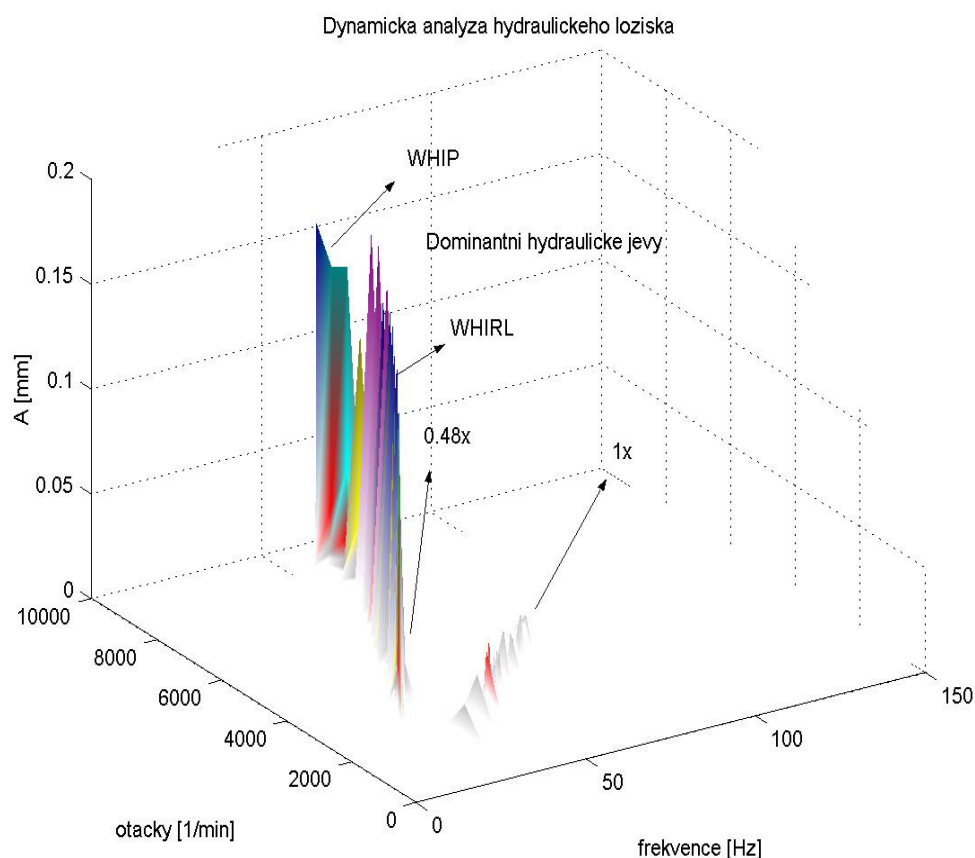
² Ing. Lubomír Houfek PhD., AV ČR Ústav termomechaniky, pobočka Brno, Technická 2, 616 69
houfek@umtn.fme.vutbr.cz

Málo zatížené a mírně nevyvážené symetrické rotory, které jsou uloženy v úplných kapalinou mazaných válcových ložiskách, mají následující dynamické jevy:

1. Když se hřídel začíná otáčet pomalu se zvyšujícími otáčkami, jsou pozorovány synchronní (1x) příčné vibrace s malými amplitudami po celé axiální ose rotoru. Tyto vibrace jsou způsobeny setrvačnými silami od nevyváhy rotoru. Při malých otáčkách jsou tyto vibrace stabilní, impulsní perturbace rotoru způsobí, že rotor má krátkodobý přechodový proces a potom se ustaví stejný průběh vibrací (obr.1,2).
2. Při vyšších otáčkách (obvykle pod první ohybovou rezonanční frekvencí) nejsou synchronní vibrace jediným režimem vibrací. Víření oleje (oil whirl) je název pro příčné souběžné precesní subharmonické vibrace rotoru okolo středu ložiska a to frekvencí, která je blízká polovině otáčkové frekvence. V tomto rozsahu otáček se rotor chová jako tuhé těleso. Amplitudy od víření oleje jsou obvykle mnohem větší než ty, které patří k synchronním vibracím. Jsou však omezeny vůlí v ložisku a hydraulickými nelineárními silami. Při zvyšování otáčkové frekvence zůstává charakter vibrací stabilní. Poloviční frekvence víření oleje sleduje zvyšování otáčkové frekvence a udržuje vůči ní poměr přibližně $\frac{1}{2}$. Amplituda vibrací zůstává přibližně konstantní a obvykle je velká. V ložisku amplituda vibrací může dosáhnout hodnoty téměř celé ložiskové vůle. V uvažovaném rozsahu otáčkové frekvence jasně dominují hydraulické dynamické jevy v ložisku. Vynucené synchronní vibrace představují malý díl dynamické odezvy, jak naznačují spektra (obr.1,2).
3. Když se zvyšující se otáčková frekvence přiblíží frekvenci první ohybové rezonance, tj. první vlastní frekvenci rotoru, víření oleje se stane náhle nestabilní a zmizí, protože je potlačeno a nahrazeno zvyšujícími se synchronními vibracemi. Vynucené vibrace dominují a dosahují největší amplitudy při rezonanční frekvenci, která odpovídá hmotnostním, tuhostním a tlumícím vlastnostem rotoru. Hydraulické dynamické jevy v ložisku nyní ustupují a dávají prioritu mechanickým jevům elastického rotoru.
4. Nad první rezonanční ohybovou frekvencí rotoru vynucené synchronní vibrace rotoru zanikají. Zde opět přicházejí do akce hydraulické síly v ložisku. Při zvyšování otáčkové frekvence, blízko za první ohybovou rezonancí, se opět objevuje víření oleje. Dříve popsany charakter vibrací se opakuje. Šířka pásma otáčkové frekvence, ve kterém dominují synchronní vibrace, přímo závisí na velikosti nevyváhy rotoru. Čím větší nevyváha, tím širší je tato oblast.
5. Když se otáčková frekvence přiblíží dvojnásobku první rezonanční ohybové frekvence rotoru, frekvence víření oleje, která je poloviční, se blíží hodnotě první rezonanční ohybové frekvence – první vlastní frekvence rotoru. Charakter kmitání s vířením oleje je nahrazen tlučením oleje (oil whip) – což jsou příčné souběžné precesní subharmonické vibrace rotoru. Tlučení oleje má konstantní frekvenci. Nezávisle na zvyšování otáčkové frekvence zůstává frekvence tlučení oleje blízko první vlastní frekvence rotoru. V tomto rozsahu vysokých otáčkových frekvencí nemůže být rotor považován za tuhý. Jeho poddajnost způsobuje, že systém rotoru a ložisek je silně vázaný. Parametry rotoru (hmotnost a tuhost) se stávají dominantními dynamickými faktory. Protože neexistuje žádná další vnější síla pro buzení vibrací, je dostatečně zdůvodněné označovat druhý typ vibrací jako samobuzené vibrace, které se objevují v důsledku mechanismu vnitřní zpětné vazby, která přenáší energii otáčení na vibrace. Samobuzené kmitání se nemůže objevit u konzervativní neboli pasivní struktury bez dodávky jakékoliv energie, zejména u

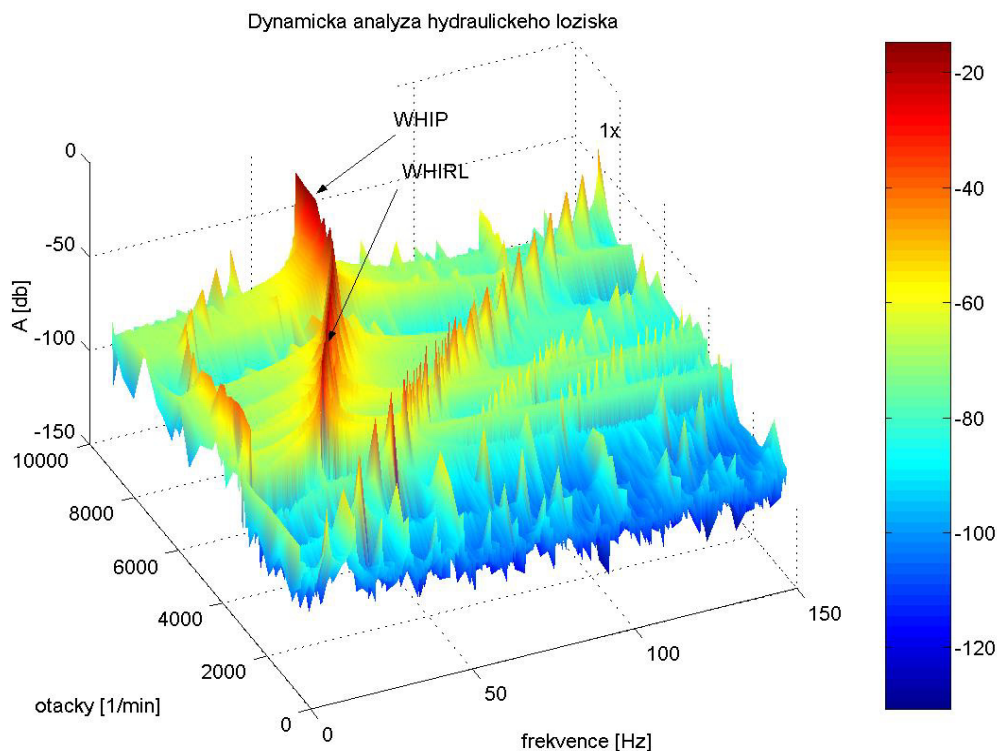
nerotujících systémů. Mezi tyto systémy patří i hydrodynamické tlumiče krátké i dlouhé, kde hřídel s ložiskem uvnitř tlumiče nerotuje, tj. $\Omega = 0$, okolo vlastní osy ložiska, ale koná obecný pohyb a malé kmity více méně kolem střední rovnovážné polohy. Tento jev má za následek že hydrodynamický tlumič se projeví na rotorové soustavě pouze přídavnou hmotností a přídavným tlumením. V kapalinovém samomazném ložisku se projevuje i přídavná tuhost v důsledku rotace čepu v mezikruží.

Výše zmíněné dynamické jevy (Whirl a Whip) u kapalinového ložiska byly experimentálně analyzovány na reálné modelové soustavě ROTORKIT RK4. Pro danou konfiguraci rotorové soustavy a její geometrické uspořádání byl z experimentálních dat v softwarovém prostředí MATLAB odvozen kaskádový diagram, který názorně poukazuje na dominantní hydraulické jevy ve spektru soustavy při daných otáčkách rotoru. Výsledky této analýzy jsou zobrazeny v obr.2, který popisuje závislost amplitudy odezvy na otáčkách a frekvenci.



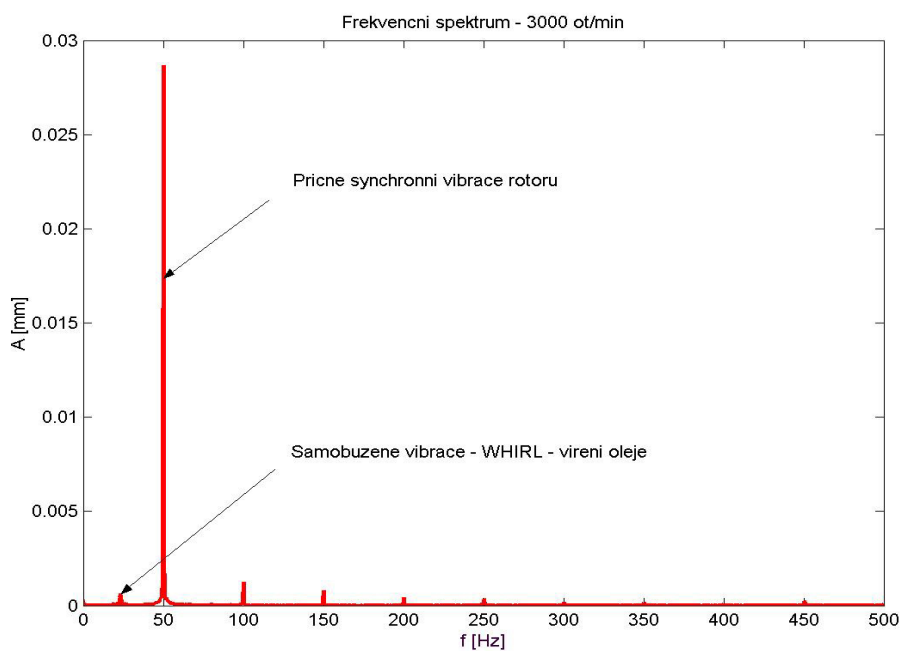
Obr.2 Víření a tlučení oleje v kaskádovém spektru - experiment

Na obr.3 je amplitudové spektrum stejného hydraulického ložiska, přičemž amplituda je v logaritmické stupnici pro zvýraznění jednotlivých násobků otáčkové frekvence.

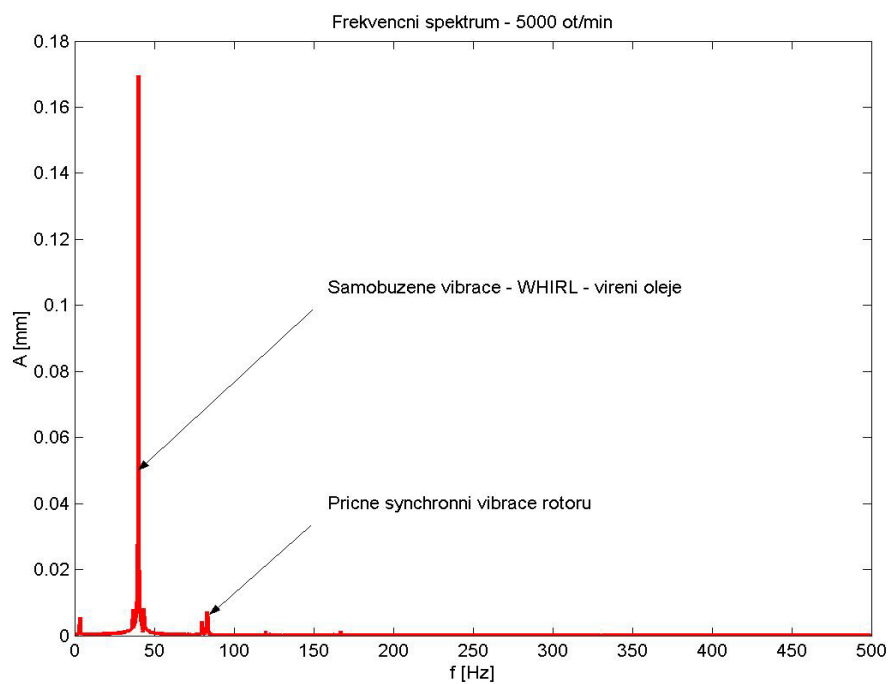


Obr.3 Víření a tlučení oleje v kaskádovém spektru - experiment

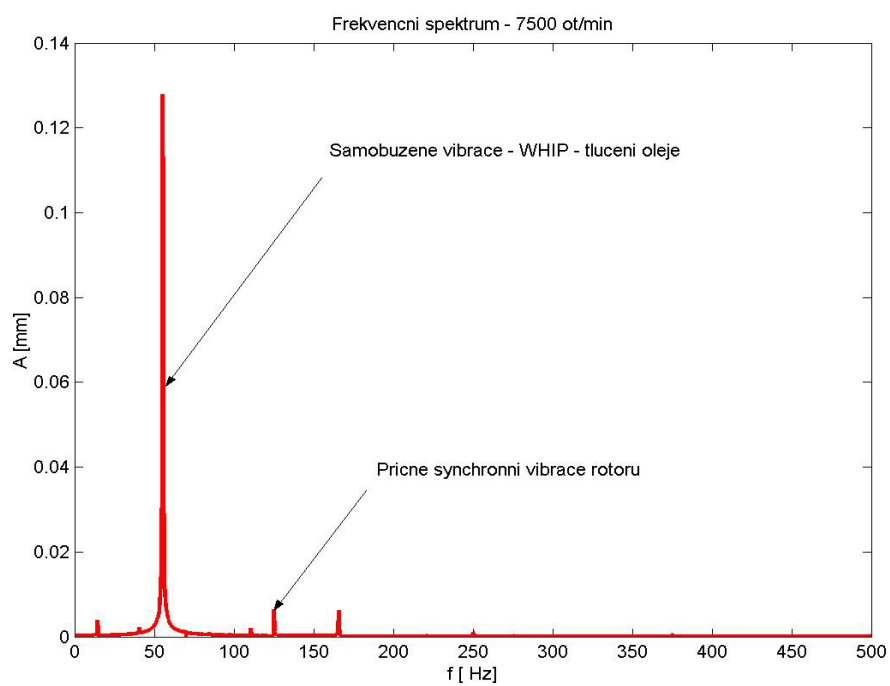
Na dalších obrázcích 4. až 7. jsou uvedena amplitudo-frekvenční spektra pro tři významné oblasti dynamického chování hydraulického ložiska při daných otáčkách. Ve spektrech jsou dobře znatelné amplitudové rozdíly vibrací synchronních u rotoru a vibrací samobuzených od olejového filmu. Víření a tlučení oleje jsou ve spektru amplitudově zcela dominantní. Opačný případ je pouze v oblasti přejezdu kritických otáček soustavy.



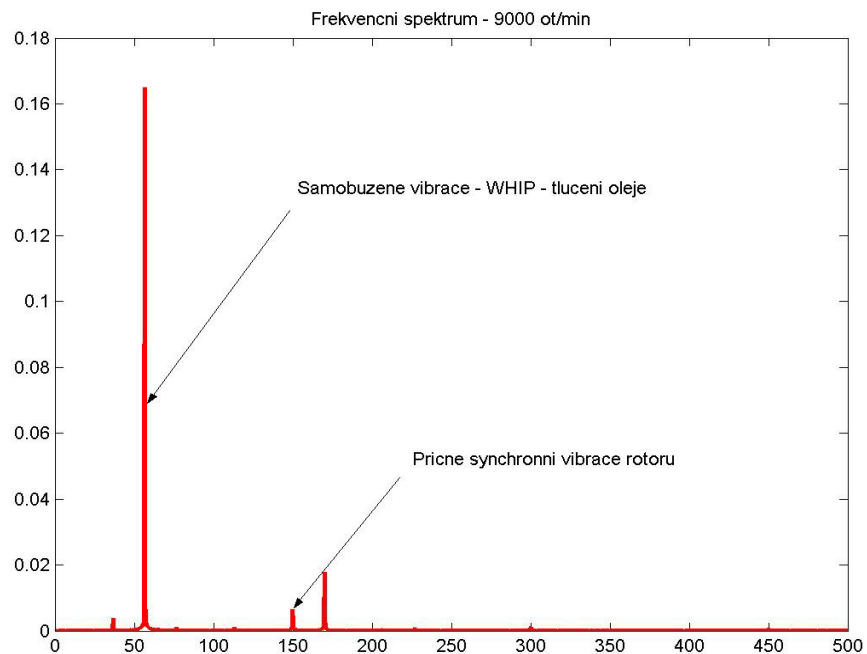
Obr.4 Frekvenční spektrum – 3000 ot/min



Obr.5 Frekvenční spektrum – 5000 ot/min



Obr.6 Frekvenční spektrum – 7500 ot/min



Obr.7 Frekvenční spektrum – 9000 ot/min

Závěr

Experimentálně byl na dané rotorové soustavě analyzován a ověřen dominantní vliv hydraulických jevů v olejovém ložisku na polovině otáčkové frekvence rotoru během rozjezdu soustavy i přejezdu jejich kritických otáček. Uvedených dynamických jevů provázejících chod rotoru se využívá při navrhování olejového ložiska i celé rotorové soustavy.

Literatura

[1] Muszynska, A.: Rotor Instability, Senior Mechanical Engineering Seminar, Bently Nevada Corporation, Carson City, Nevada, June 1984.

Tato práce vznikla v rámci výzkumného záměru č. MSM262100024.