

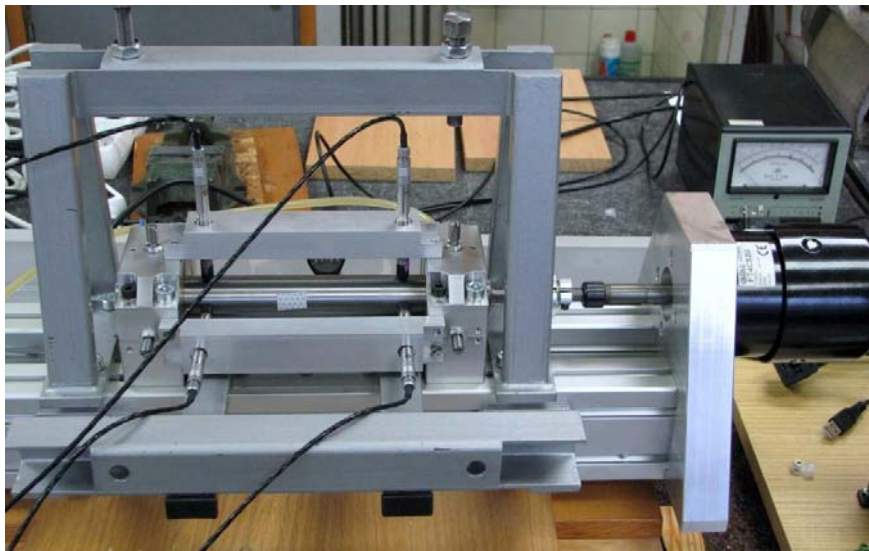
A TEST STAND FOR RESEARCH IN JOURNAL BEARING ACTIVE CONTROL

J. Tůma*, J. Škuta*, R. Klečka*, J. Šimek**

Summary: *The paper deals with the problem of building of the test stand for active control of journal bearing by piezoactuator acting at bushing position inside bearing housing. The goal of active control is to prevent self excited vibration. The topic of the submitted paper is focused on putting the test stand into service. The properties of the individual test stand parts are discussed.*

1. Úvod

Je známo, že kluzná ložiska s olejovým filmem se mohou stát nestabilní, jestliže otáčky překročí jistou mez, která se v některé literatuře označuje jako Bently-Muszynské (Muszynska 1986). Je několik způsobů jak předcházet vzniku nestabilního stavu. Jeden z nich je pokus aktivně řídit pohyby ložiskového pouzdra na základě informací ze sond přiblížení, které snímají polohu ložiska vzhledem k nepohyblivým částem pouzdra. Osa čepu se pohybuje obecně v rovině a proto k snímání její polohy jsou zapotřebí dvě sondy přiblížení pro každé ze dvou ložisek. Obě sondy páru jsou orientovány kolmo na sebe. K aktivnímu řízení polohy vnitřní pohyblivé vložky jsou použity piezoaktuátory. Zkušební stav k testům aktivního řízení je znázorněn na obr. 1.



Obr. 1 Zkušební stav pro aktivní řízení kluzných ložisek

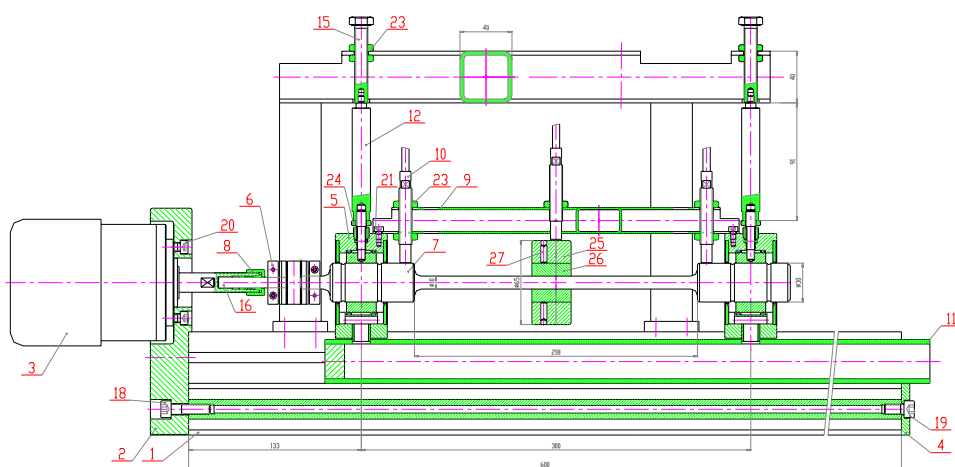
* Prof. Ing. Jiří Tůma, CSc., Ing. Jaromír Škuta, PhD., Ing. Radim Klečka, VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní, 17. Listopadu 15, 708 33 Ostrava Poruba, jiri.tuma@vsb.cz

** Ing. Jiří Šimek, CSc., Techlab s.r.o., Sokolovská 207, 190 00 Praha 9, j.simek@techlab.cz @bumbac.pacr.cz

2. Popis zkušebního stavu ve stávajícím vybavení

Konstrukce zkušebního stavu byla navržena ve firmě TECHLAB s.r.o. Praha (Šimek 2008). Hřídel zkušebního stavu je uložen ve dvou kluzných radiálních ložiscích s pohyblivými pouzdry, která je možno budít pomocí piezoaktuátorů. V současné době je k dispozici dutý tuhý hřídel o průměru 30 mm a tloušťce stěny 5 mm. Vzdálenost ložisek je 200 mm. Původní vůle v ložiscích 50 mikrometrů byla s ohledem na potřebu dosažení maximálních otáček zvětšena přebroušením hřídele na dvojnásobek. Původní hranice pro vznik samobuzeného kmitání byla vypočtena na cca 11.100 min⁻¹, po zvětšení vůle by měla klesnout na cca 9.200 min⁻¹.

Hřídel je poháněn trojfázovým asynchronním motorem, který je napájen z měniče frekvence, jehož rozsah je do 400 Hz, což odpovídá maximálním otáčkám až 23.000 min⁻¹. Měnič je dodávkou firmy Control Techniques typu COMMANDER SE SKA1200075 a motor je výrobkem firmy ATAS Náchod a.s. typu FT4C52G. Výkon motoru je 500 W a maximální výkon měniče je 750 W. Předpokládá se, že otáčky hřídele budou regulovány na konstantní hodnotu nebo budou vzrůstat lineárně v čase (tzv. rampa) libovolnou rychlostí. PLC ovládající měnič frekvence nepracuje se zpětnou vazbou. Výstupní hřídel motoru je spojen se zkušebním hřídelem pružnou dvojmembránovou spojkou Huco s označením FLEX-M 466.33, která má vyrovnat svými dvěma klouby paralelní a úhlovou nesouosost hřídele a motoru do velikosti 0,2 mm. Ložiska jsou mazána tlakovým olejem. V současné době je při zkouškách nastavován tlak 0,25, 0,5, 1 a 1,5 barů.



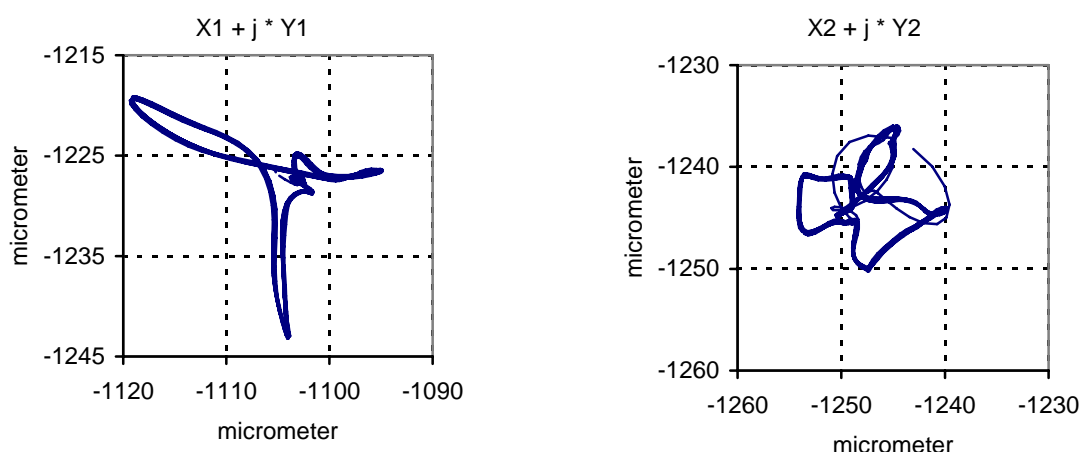
Obr. 2 Modifikace zařízení s pružným hřídelem

Pro možnost testování vlivu aktivního řízení na elastické rotory, byla navržena relativně jednoduchá úprava zařízení, umožňující uložit do stávajících ložisek pružný rotor s jedním nebo více disky (obr. 2). Tytéž disky bez vložek mohou být použity i s tuhým rotorem. Pružný hřídel bylo třeba navrhnut tak, aby se v rozmezí provozních otáček vyskytovaly alespoň jedny ohybové kritické otáčky hřídele. Při hmotnosti jednoho disku 0,5 kg bylo nutno dosáhnout ohybové tuhosti hřídele nižší než 105 N.m⁻¹. Hřídel byl proto v partii mezi ložisky zeslaben, přičemž byl průměr odlehčené části zvolen 10 mm. Při vzdálenosti ložisek 300 mm a délce odlehčené části 218 mm vychází ohybová tuhost hřídele 4,55.105 N.m⁻¹, takže příslušná vlastní frekvence, resp. ohybové kritické otáčky jsou 151 Hz, resp. cca 9.100 min⁻¹. Ohybové kritické otáčky zhruba v polovině otáčkového rozsahu poskytují široké možnosti nastavení parametrů testu. Při použití dvou disků se ohybové kritické otáčky dále snižují.

3. Zprovoznění zkušebního stavu

Přes určité problémy s přehříváním hydraulického agregátu a nastavením měniče frekvence se podařilo zařízení zprovoznit. V důsledku relativně malé vůle a určité nesouososti ložisek byly vůle hřídele v ložiskách velmi malé a pasivní odpory tak byly výrazně větší, než bylo předpokládáno. K vyšší spotřebě energie na pohon hřídele přispěla i skutečnost, že hřídel ani spojka nebyly dostatečně přesně vyváženy. Přestože motor by měl mít podle výpočtu zhruba 5tinásobnou rezervu výkonu, ochrana měniče jej odstavovala z důvodu překročení maximálního proudu již při otáčkách 7.000 až 9.000 min⁻¹. Do těchto otáček se neprojevil ani náznak nestability rotoru, což je zřejmě způsobeno velmi malou skutečnou vůlí hřídele v ložiskách.

První testy zkušebního stavu byly provedeny před přebroušením hřídele. Odhadnutá vůle je asi 30 mikrometrů. Překvapující však byl neobvyklý tvar naměřených trajektorií pohybu (orbitu) čepu v ložisku (viz obr. 3).



Obr. 3: Neobvyklý tvar orbit (X1 a Y1 jsou u ložiska blíže motoru)

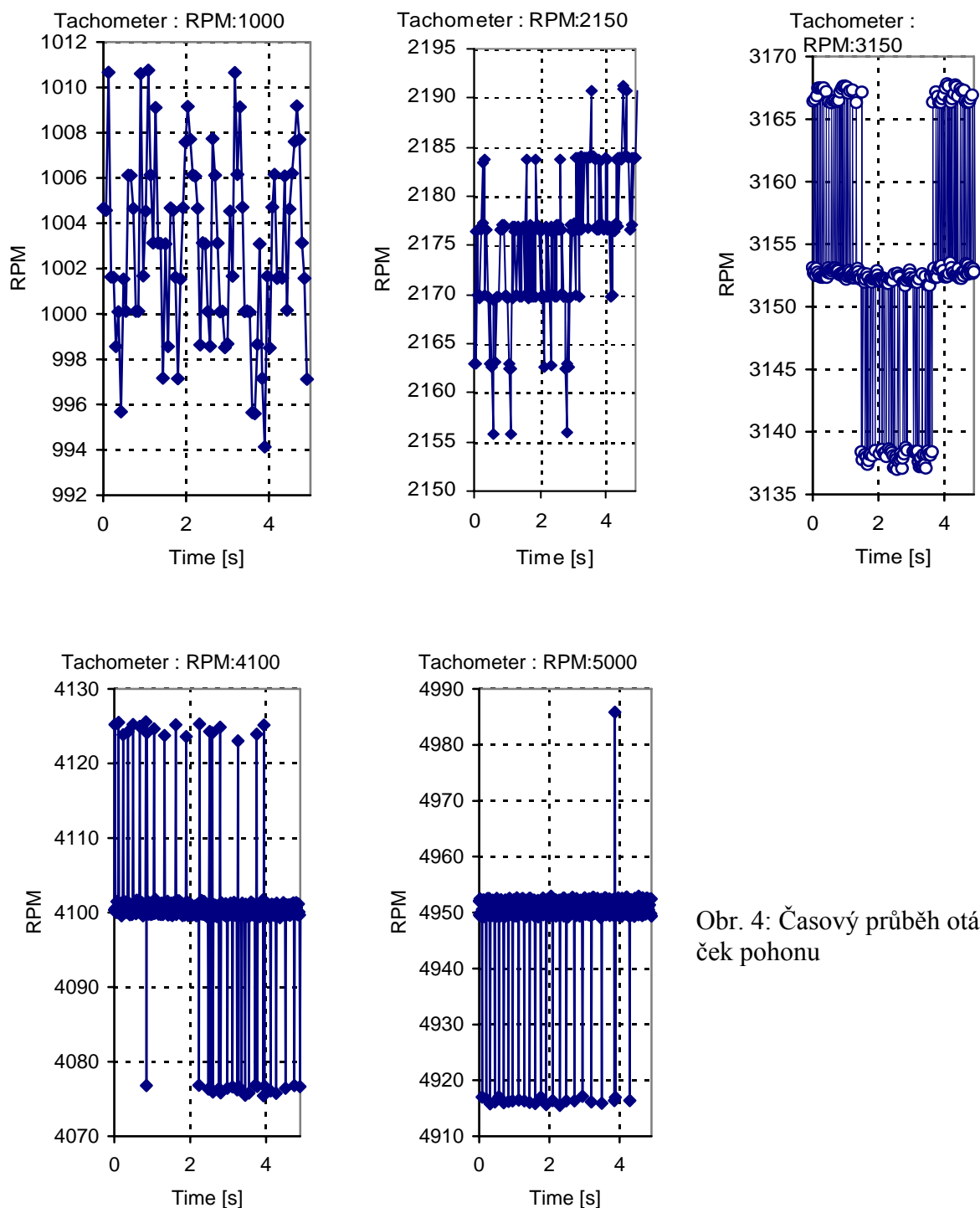
Po přebroušení hřídele se tvar orbitu částečně změnil. Nedosáhl však tvaru kruhu nebo elipsy jako u zkušebního stavu Rotorkit RK 4, který dodala na některé univerzity České republiky firma Bently Nevada. Příčina se hledala v těchto jevech

- rušení signálu výchylky hřídele
- špatná kompenzace nesouososti motoru a hřídele
- úhlové kmity pohonu vlivem nerovnoměrného hnacího momentu.

Zakoupené snímače výchylky mají předepsaný minimální průměr hřídele nad 60 mm, avšak hřídel zkušebního stavu má průměr 30 mm. Místo těchto snímačů byly použity ze zkušebního stavu Rotorkit, u kterého spolehlivě pracují na hřídeli o průměru 20 mm. Zaznamenané orbity mají stejný tvar. Zdá se, že vzájemné rušení snímačů není příčinou deformace tvaru orbitu.

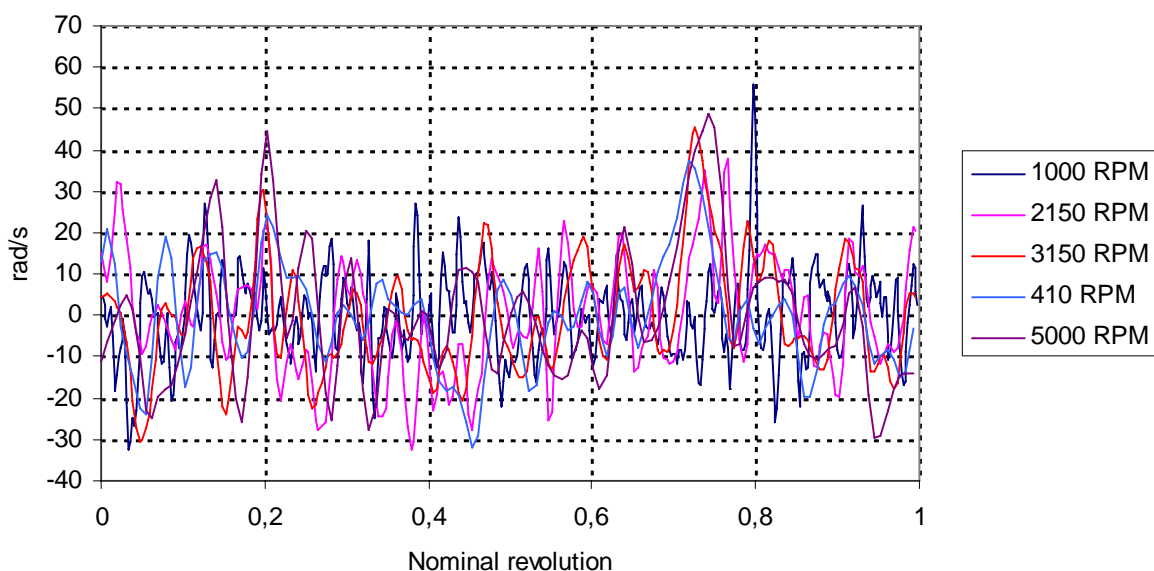
Při zkoumání vlivu kompenzace případné nesouososti motoru a testovacího hřídele byla odzkoušena spojka s dvojnásobnou vzdáleností membrán a také spojení dvou dvoumembránových spojek s vloženou hřídelí o délce asi 120 mm. Toto poslední spojení minimalizovalo případné síly působící na testovací hřídel. Výsledné orbity byly však beze změny.

Po neúspěšných opatřeních započalo testování rovnoměrnosti otáčení pohonu elektrickým motorem s měničem frekvence. K měření otáček byla použita tachosonda, která snímala jeden impuls za otáčku a laserový vibrometr BK 2523 pro měření úhlových kmitů za otáčení. Laser vysílá dva paprsky a k vyhodnocení úhlové rychlosti otáčení používá dva paprsky. Výhodou tohoto měření je nezávislost na kruhovitosti hřídele v místě snímání a na případných kmitech osy hřídele do stran.

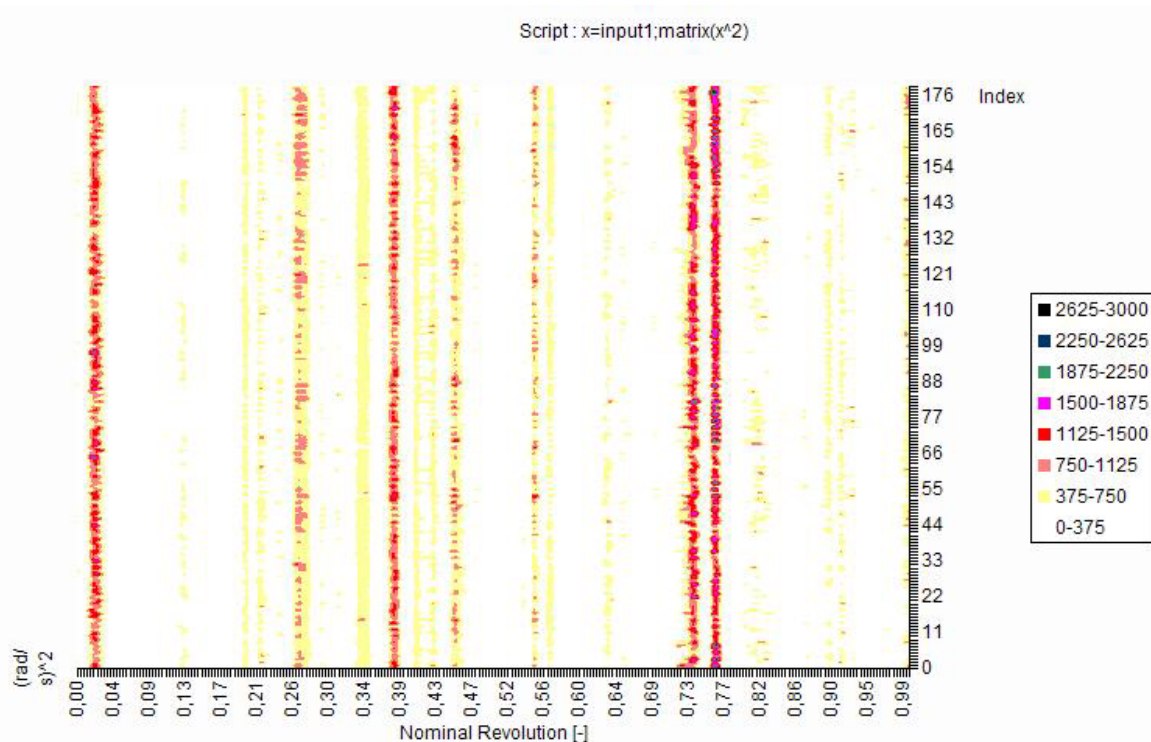


Obr. 4: Časový průběh otáček pohonu

Výsledky měření otáček na předvolených konstantních hodnotách frekvence napájecího napětí měniče frekvence po dobu 5 sekund jsou znázorněny na obr. 4. U všech záznamů je zřetelný schodovitý tvar, kdy se otáčky mění po skocích. Vzorkovací frekvence byla ve všech případech 16384 Hz a neměnila se. Základní otáčky 1000 za minutu byly zvýšeny 5krát na hodnotu 5000 za minutu. Kdyby příčinou zvýšení velikosti skoků otáček bylo vzorkování, pak by zvýšení skoku bylo úměrné násobku velikosti otáček. Přibližně se skoky zvětšují více než je kvadrát násobku otáček.



Obr. 5: Závislost průměrované okamžité úhlové rychlosti na nominálním otočení hřídele

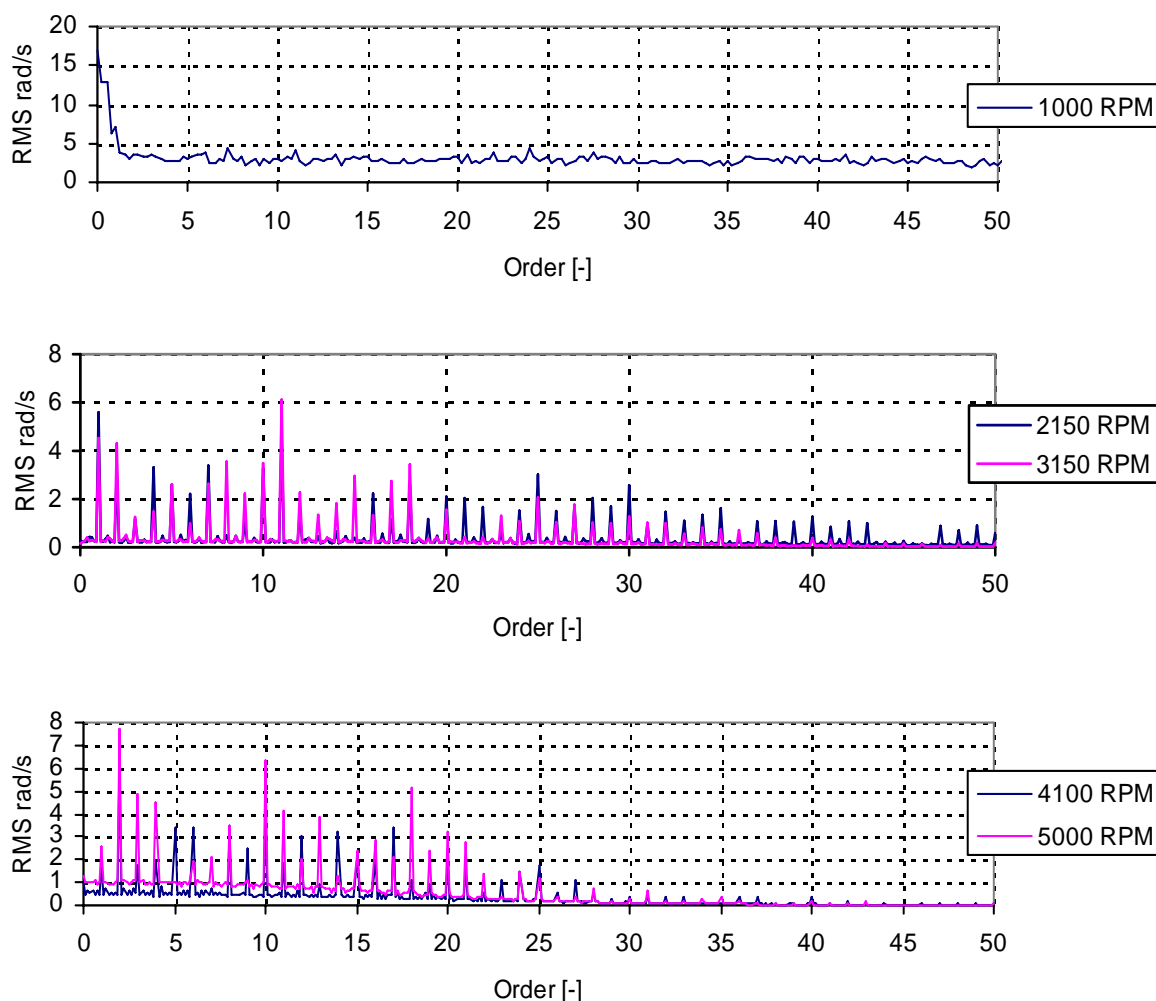


Obr. 6: Závislost kvadrátu okamžité úhlové rychlosti na nominálním otočení při 2150 RPM

Podrobný popis změn okamžité rychlosti otáčení popisují výsledky měření na obr. 4 a 5. Záznam okamžité rychlosti byl převzorkován a synchronně filtrován s frekvencí otáček. Na obr. 5 jsou průměrované záznamy za dobu 5 sekund, které reprezentují jedno otočení hřídeli na různé úrovni otáček, tj. od 1000 do 5000 za minutu. Na všech záznamech je patrné náhlé zvýšení rychlosti při nominálním otočení 0,2 a přibližně při 0,75. Toto poměrné otočení je vzhledem ke značce, která sloužila ke snímání otáček.

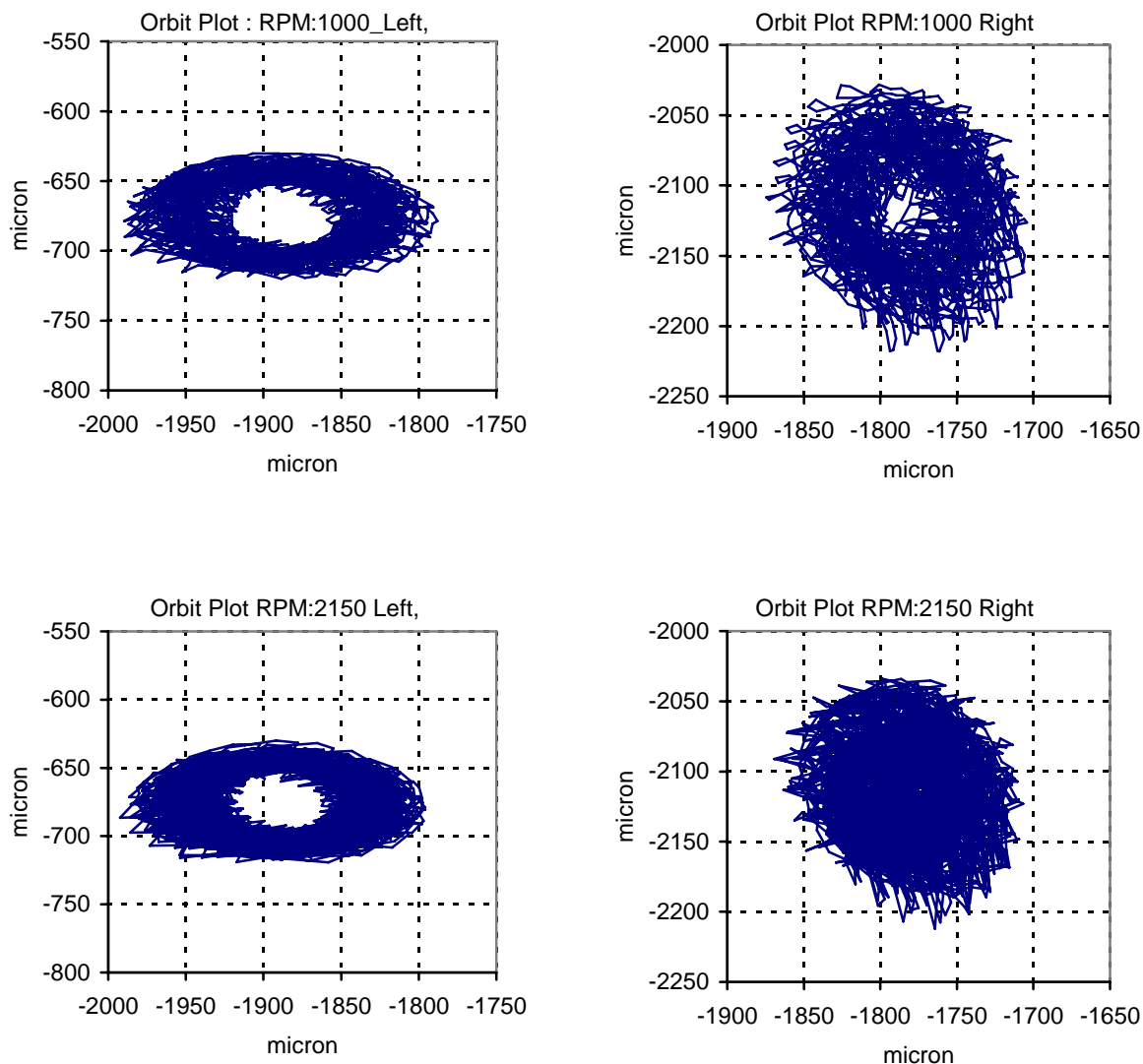
Stabilita skoků v rychlosti otáčení je zřejmá z obr. 6. Místo okamžité úhlové rychlosti je vynesena druhá mocnina této rychlosti, aby byly lépe patrné absolutní hodnoty. K demonstraci je vybráno jedno měření. Obrázek dokumentuje, že prudké změny úhlové rychlosti jsou situovány do stejných poměrných otočení hřídele.

Na obr. 7 jsou znázorněna řádová spektra okamžité úhlové rychlosti. Místo frekvenční osy v Hz je použita osa v násobcích (order) základní frekvence otáčení. Spektra byla průměrovaná z převzorkovaných záznamů a reprezentují úhlové kmitání po dobu 5 sekund. Mimo otáčky 1000 za minutu jsou na zbývajících spektrech zřejmé harmonické základní frekvence, které charakterizují velmi nerovnoměrný časový průběh úhlové rychlosti během otáčení. Při otáčkách 1000 za minutu je úroveň spektra na hladině vrcholů ostatních spekter. Efektivní hodnota kmitů se snižovala se zvyšováním otáček.



Obr. 7: Řádová spektra okamžité úhlové rychlosti

Tvary orbit při konstantní zadané frekvenci napájecího proudu jsou znázorněny na obr. 8. Jak je zřejmé, zvlnění orbit se nezměnilo. Orbyto vlevo (vzdálenější ložisko vzhledem k motoru)) byly měřeny ve směru X stejným snímačem jako u ložiska blíže motoru. Pro směr Y vzdálenějšího ložiska byl použit snímač z Rotorkitu. Ploché tvary je pravděpodobně dán nesprávně nastavenou citlivostí, což pro demonstraci nehladké orbity nevádí.



Obr. 8: Ukázky tvaru orbit

K výsledkům měření je třeba dodat, že hřídel byl bez setrvačníku, aby byla jeho hmotnost co nejnižší, protože se zatížením mez stability roste. Jednalo se v podstatě o trubku se silou stěny 5 mm, vnějším průměrem 30 mm a délkou asi 250 mm. Setrvačník o průměru 65 mm moment setrvačnosti rotujících hmot zvýší více než 3krát, což by mělo nerovnoměrnost otáčení výrazně snížit.

4. Závěr

Referát pojednává o uvádění zkušebního stavu pro testy aktivního řízení kluzných ložisek do provozu. Za současného stavu dohotovení dílů se nepříznivě projevuje proměnlivý hnací moment pohonu, který způsobuje nehladký tvar trajektorií osy hřídele uvnitř ložiska. Provedená opatření se zatím jeví jako neúčinná. Po otestování vlivu setrvačníků na tvar trajektorií bude započato s aktivním řízením.

5. Poděkování

Projekt je řešen za podpory Grantové agentury České republiky. Číslo projektu je 101/07/1345 a jeho název „Aktivní řízení kluzných ložisek s cílem potlačení nestability rotoru“.

6. Reference

Muszynska, A.: Whirl and Whip – Rotor / Bearing Stability Problems. *Journal of Sound and Vibration* (1986) 110 (3), pp 443-462.

Šimek, J. - Tůma, J. - Svoboda, R: Test stand for investigation of external excitation influence on behaviour of rotor supported in sliding journal bearings. *In: Colloquium Dynamics of Machines 2008*, Prague 2008, p.169-174