

# POSKOKY A TŘEPOTÁNÍ SEGMENTŮ – NEŽÁDOUCÍ JEVY PŘI PROVOZU KLUZNÝCH LOŽISEK S NAKLÁPĚCÍMI SEGMENTY

## SPRAGGING AND PAD FLUTTERING – ABNORMAL CONDITIONS DURING THE OPERATION OF TILT-PAD JOURNAL BEARINGS

Luboš Smolík<sup>a) b)</sup>, Jan Rendl<sup>a)</sup>, Štěpán Dyk<sup>a)</sup>, Radek Bulín<sup>a)</sup>, Zdeněk Kubín<sup>b)</sup> a Martin Šifalda<sup>c)</sup>

<sup>a)</sup> NTIS – Nové technologie pro informační společnost, Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita v Plzni, Technická 8, 301 00 Plzeň

<sup>b)</sup> Výzkumný a zkušební ústav Plzeň, Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň

<sup>c)</sup> Jaderná elektrárna Temelín, ČEZ, 373 05 Temelín

### Abstrakt

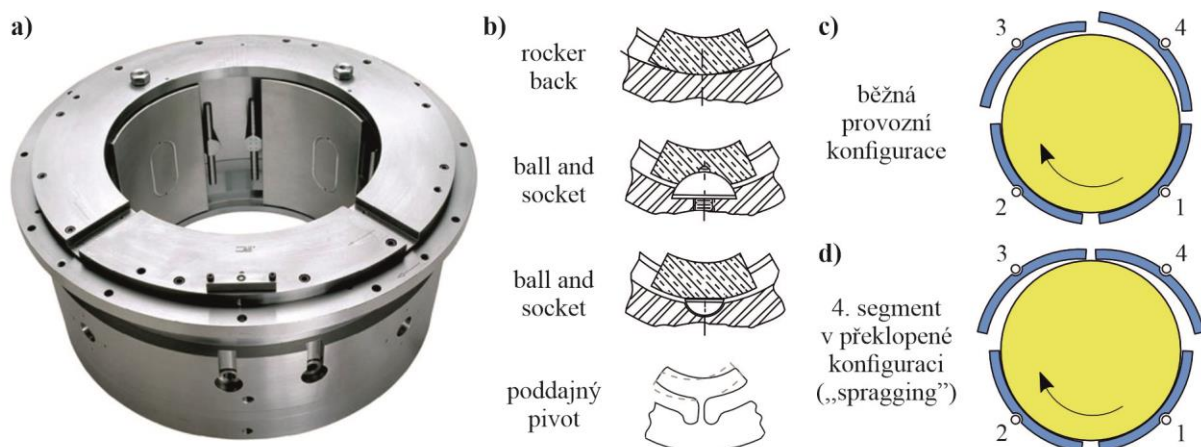
Radiální kluzná ložiska s naklápěcími segmenty jsou využívána pro ukládání strojů s vysokou obvodovou rychlostí čepu hřídele. Speciální konstrukce těchto ložisek zabraňuje vzniku nestability olejového filmu, na druhou stranu ale vytváří podmínky pro jevy známé jako poskoky a třepotání segmentů, které mohou poškodit součásti ložiska. Tento článek si klade za cíl rozšířit povědomí o těchto jevech, popsat mechanismus jejich vzniku a způsob diagnostiky.

### Abstract

Radial tilt-pad journal bearings are used to support machinery with journals of high circumferential speed. A unique design of these bearings prevents the formation of oil-induced instability. However, the design allows for so-called pad spragging and fluttering, which can damage bearing components. This paper aims to increase awareness of these phenomena, describe the conditions leading to their formation, and present methods to detect them.

### Úvod

Radiální kluzná ložiska s naklápěcími segmenty, viz obr. 1a, jsou hojně využívána v aplikacích s vysokými obvodovými rychlostmi. V současné době se tato ložiska používají mj. pro ukládání rotorů turbín a generátorů. Mezi výhody těchto ložisek patří především odolnost proti nestabilitě olejového filmu, malá citlivost na směr zatížení a axiální nevyrovnanost hřídele a také relativně nízká spotřeba oleje [1].



Obr. 1: (a) Radiální kluzné ložisko se čtyřmi naklápěcími segmenty, (b) různé konstrukční provedení opěrných prvků segmentu, (c, d) porovnání běžné a abnormální provozní konfigurace ložiska se čtyřmi naklápěcími segmenty. Obrázek je částečně převzat z [1, 2].

Uvedené výhody jsou umožněny speciální konstrukcí ložisek. Činné plochy ložiska (*kompozice*) se nachází na *segmentech*, které se mohou dle potřeby naklápět kolem opěrných bodů (*pivotů*) vůči čepu hřídele i vůči ložiskovému tělesu, viz obr. 1b. Tato konstrukce však může způsobit i nechtěné chování zejména nezatižených horních segmentů ložiska.

Za provozu jsou segmenty napájeny mazacím olejem, který odděluje kompozici od čepu hřídele. Za nominálního stavu se mezi segmentem a čepem hřídele vytvoří klínová mezera, která se směrem od náběžné hrany segmentu zužuje, jak je ukázáno na obr. 1c. Dolní segmenty, které jsou zatíženy hmotou rotoru, mají tendenci se natočit tak, aby ložisková mezera měla od náběžné hrany zužující se tvar. Horní segmenty jsou ale zatíženy pouze vlastní vahou, a pokud jsou uloženy kyvně (angl. *rocker back*) nebo na kulových ččkách (angl. *ball and socket*), mohou se volně pohybovat v prostoru ložiskového tělesa [1, 3]. Za určitých podmínek, které závisí na kombinaci předtížení a setrvačnosti segmentu, množství mazacího oleje, obvodové rychlosti čepu hřídele a poloze pivotu a jeho konstrukčním provedení [2, 3], se náběžná hrana nezatiženého segmentu přiblíží k čepu hřídele a vytvoří rozšiřující se ložiskovou mezeru, viz obr. 1d. Při takém stavu vymizí tlakový gradient a může dojít i ke ztrátě olejového filmu a ke kontaktu náběžné hrany segmentu s čepem hřídele. S tím jsou spojeny dva typické jevy [2, 3]:

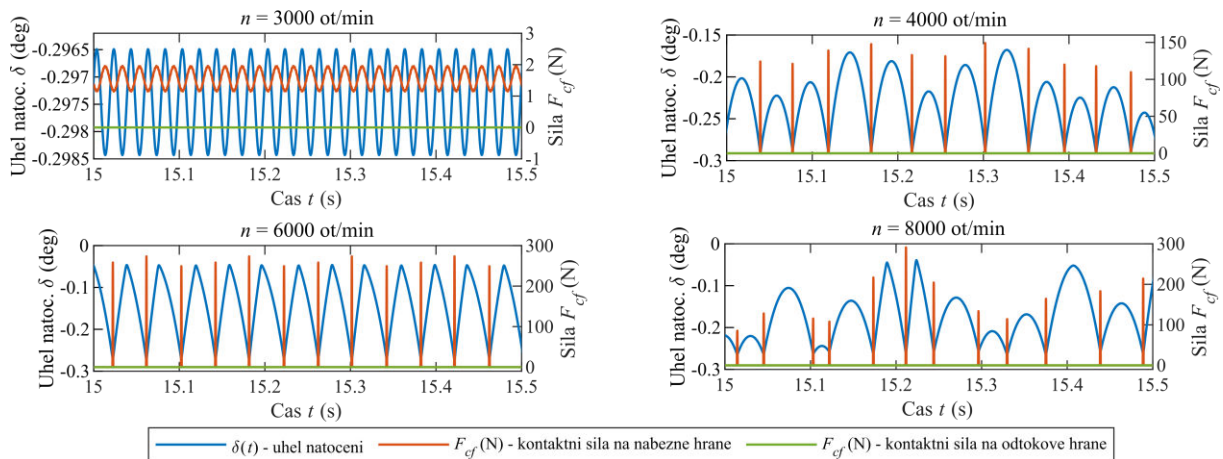
1. poskok (angl. *spragging*) – vlivem ztráty olejového filmu na jedné z činných ploch ložiska se skokově změni poloha segmentu a/nebo čepu hřídele,
2. třepotání segmentu (angl. *fluttering*) – opakovaná ztráta a reformace olejového filmu vede k pulzacím tlakového gradientu a/nebo kontaktům segmentu s ostatními částmi sestavy; segment v takovém případě kmitá na subsynchronní frekvenci odpovídající maximálně polovině otáček čepu hřídele.

### **Modelování poskoků a třepotání segmentů**

Počítačové modelování kluzných ložisek s naklápěcími segmenty je velmi komplexní úloha zahrnující kromě modelování hydrodynamického proudění mezi jednotlivými segmenty a čepem hřídele i dostatečně přesný popis pohybu dílčích segmentů. Pro první přiblížení (velmi často dostatečné) je uvažován pohyb segmentu ložiska jako rovinný bez axiálního naklopení segmentu vzhledem k ose rotace rotoru. Samotný segment má poté jeden stupeň volnosti, tj. rotační okolo pivotu, který je nezbytný pro správné fungování ložiska. Dalším možným zpřesněním je rozšíření o další stupeň volnosti, tj. radiální, který zohledňuje poddajnost pivotu pod zatížením ložiskového uzlu přeneseným přes olejový film na jednotlivé segmenty.

Zatížení jednotlivých segmentů je dáno z velké části předpětím ložiska (angl. *preload*). To může být pro jednotlivé segmenty různé a může pak ovlivňovat chování celého rotorového systému. V případě špatně zvoleného předpětí (zejména u horních segmentů) může dojít k nedostatečnému zformování nosného olejového filmu a vlivem působení tíhové síly a relativního pohybu čepu hřídele dojde k třepotání nebo poskoku segmentu. V krajním případě je nutné uvažovat, že může dojít k vymezení vůlí a správně modelovat kontakt dvou tuhých částí (čep hřídele-segment) např. pomocí Hertzovy teorie kontaktu.

Tlakové pole v olejovém filmu je popsáno Reynoldsovou rovnicí. Na základě rozměrů ložiska a provozních podmínek je nutné uvažovat na základě Reynoldsova čísla, zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění. Vibrace nevyváženého rotoru způsobují fluktuace tlakového pole. Působení tlakového pole na segment se vyjadřuje pomocí hydrodynamické síly, která se získá jeho integrací přes plochu segmentu. Hydrodynamická síla je nelineární vazba mezi čepem hřídele a segmenty, která udržuje tyto dva subsystémy v rovnováze, nebo naopak při nepatrné změně své výslednice uvádí tyto subsystémy do pohybu. Rozložení tlakového pole je ovlivněno nejen relativní polohou čepu hřídele a segmentu, ale také termodynamickými jevy probíhajícími v proudícím mazivu. Ty ovlivňují jeho dynamickou viskozitu, ale také mohou způsobovat kavitaci.



Obr. 2: Časové řady natočení segmentu 4 ložiska o průměru 100 mm (modře) a kontaktní síly na náběžné (červeně) a odtokové hraně (zeleně)

V místě uložení segmentu např. na kulových čočkách je možné zohlednit tření a rozlišovat fáze pohybu segmentu na *ulpívání* a *prokluz* (angl. *stick* a *slip*). To může mít za důsledek omezení naklonění segmentu a tím pádem i ovlivnění správného fungování celého kluzného ložiska, které se v krátkém časovém intervalu může chovat jako ložisko s pevnou geometrií. Mezi nejčastěji používané modely tření patří Bengisu-Akay a LuGre model [4]. Oba modely jsou však velmi závislé na nastavení řídicích parametrů a je nutné věnovat této části modelování velkou pozornost.

Na obr. 2 jsou ukázány vybrané časové řady pro simulaci čtyřsegmentového ložiska se zatížením mezi segmenty s parametry převzatými z [5]. Na obrázku jsou vidět průběhy natočení 4. segmentu a vzniklé kontaktní síly na náběžné a odtokové hraně při třepotání horního segmentu. Z výsledků je patrné, že pro 3000 ot/min segment leží na čepu hřídele a pouze díky vibračním hřídele dochází k fluktuaci kontaktní síly. Pro vyšší otáčky pak dochází k úplnému odlehnutí segmentu a následnému rázu, tj. kontaktní síla vymizí a poté se znovu objeví jako impuls síly. Natočení segmentu se vlivem nárazů segmentu a změnou provozních otáček stává nepravidelným a může jevit známky chaotického chování. Na odtokové hraně ke kontaktu segmentu s čepem nedochází, protože se vlivem natočení segmentu vytvoří nosný olejový film, který zabrání dalšímu kontaktu.

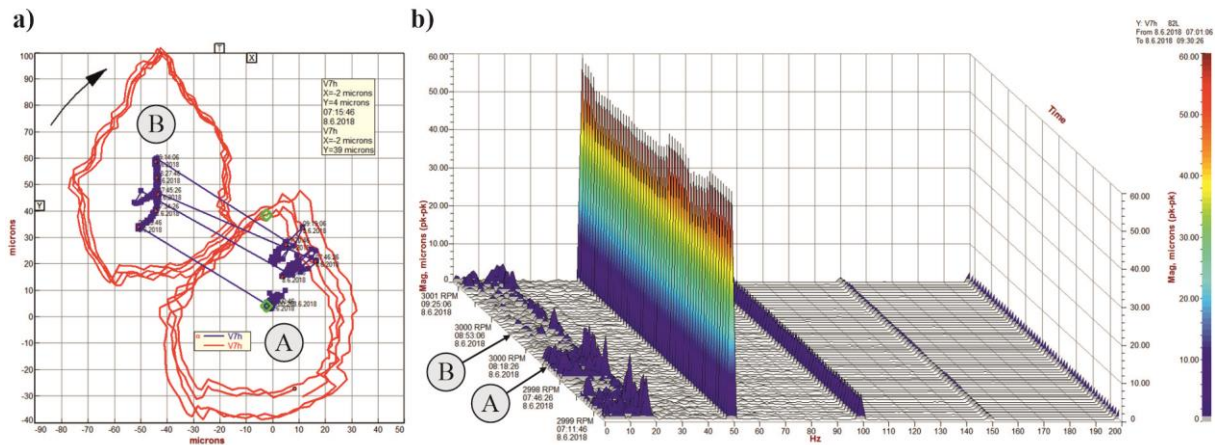
## Diagnostika poskoků a třepotání segmentů

### Projevy poskoků a třepotání segmentů za provozu

Provozní diagnostika poskoků a třepotání segmentů je poměrně obtížná. Na rozdíl od experimentálního výzkumu [6] nejsou za provozu k dispozici snímače měřící pohyb jednotlivých segmentů a diagnostik se musí spolehnout na data ze snímačů relativních rotorových a absolutních ložiskových vibrací [7]. Poskoky jsou pak detekovatelné, pouze pokud při nich dochází ke změně polohy čepu hřídele. Taková změna je ukázána na obr. 3a, kde je patrný posuv pracovní polohy čepu hřídele mezi body A a B o cca 60  $\mu\text{m}$ .

Pohyb čepu hřídele, ukázaný na obr. 3a, kolem pracovní polohy A se mírně liší od pohybu kolem pracovní polohy B. Změna je charakterizována přítomností širokopásmových nízkofrekvenčních složek s náhodnou amplitudou, které se vyskytují pouze v pracovní poloze A, viz obr. 3b [7]. Původ těchto vibrací je v třepotání segmentů ložisek, které se buď olejovým filmem, nebo pomocí elastických kontaktních sil přenesou do čepu hřídele [2]. Lze tedy tvrdit, že v pracovní poloze A pravděpodobně dochází k třepotání jednoho ze segmentů. Bez vizuální kontroly a nalezení příslušných indikací však nelze zjistit, o který segment se jedná.



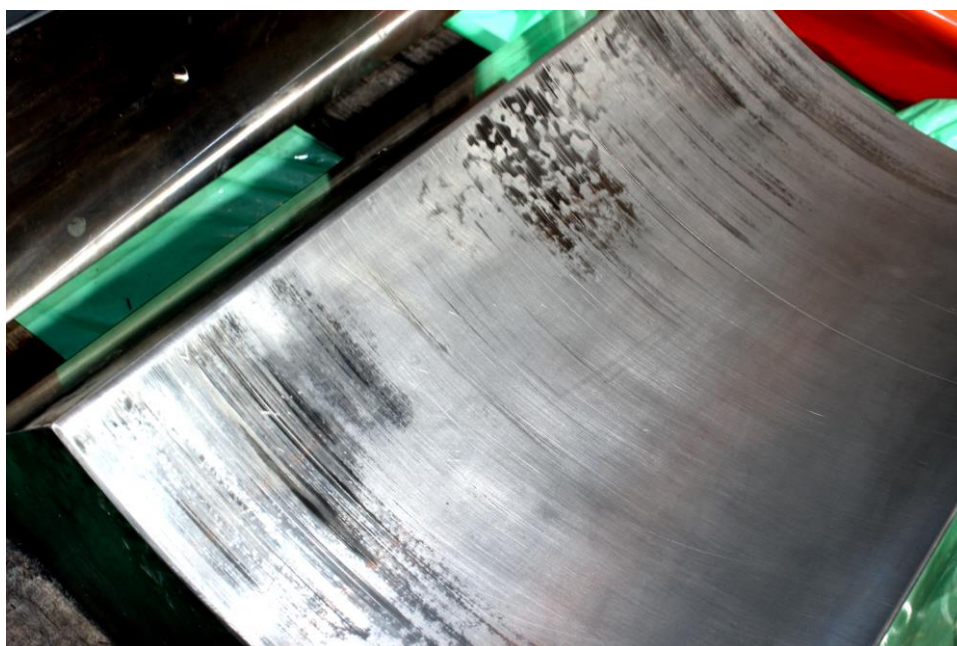


Obr. 3: (a) Záznam změn pracovních poloh čepu hřídele, tzv. poskoků, při ustáleném provozu. (b) Kaskádový diagram dokumentující změny ve frekvenčním spektru vibrací, ke kterým dochází při poskokách mezi pracovními body A a B. Částečně převzato z [7].

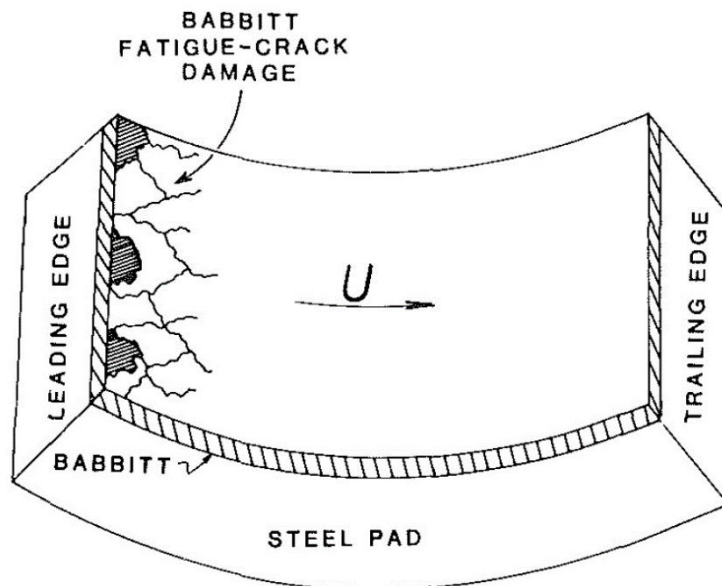
### Indikace na kompozici poškozených segmentů

Dlouhodobý provoz s poskoky nebo třepotáním segmentů se projevuje na stavu kompozice poškozeného segmentu. Největším problémem je poškození v oblasti kontaktu kompozice s čepem hřídele. V případě čtyřsegmentového radiálního ložiska se zatížením mezi segmenty (obr. 1c), jde zejména o poškození kompozice 4. segmentu po celé šířce segmentu u náběžné hrany. Tato oblast ukázaná na obr. 4 již po několika měsících provozu zasahuje asi do 1/3 segmentu ve směru otáčení čepu hřídele. Dlouhodobý provoz s přetrvávajícím třepotáním segmentům vede k inicializaci a postupnému šíření únavových trhlin v oblasti náběžné hrany segmentu, viz obr. 5. V kritických případech může dojít až k místní ztrátě kompozice [3].

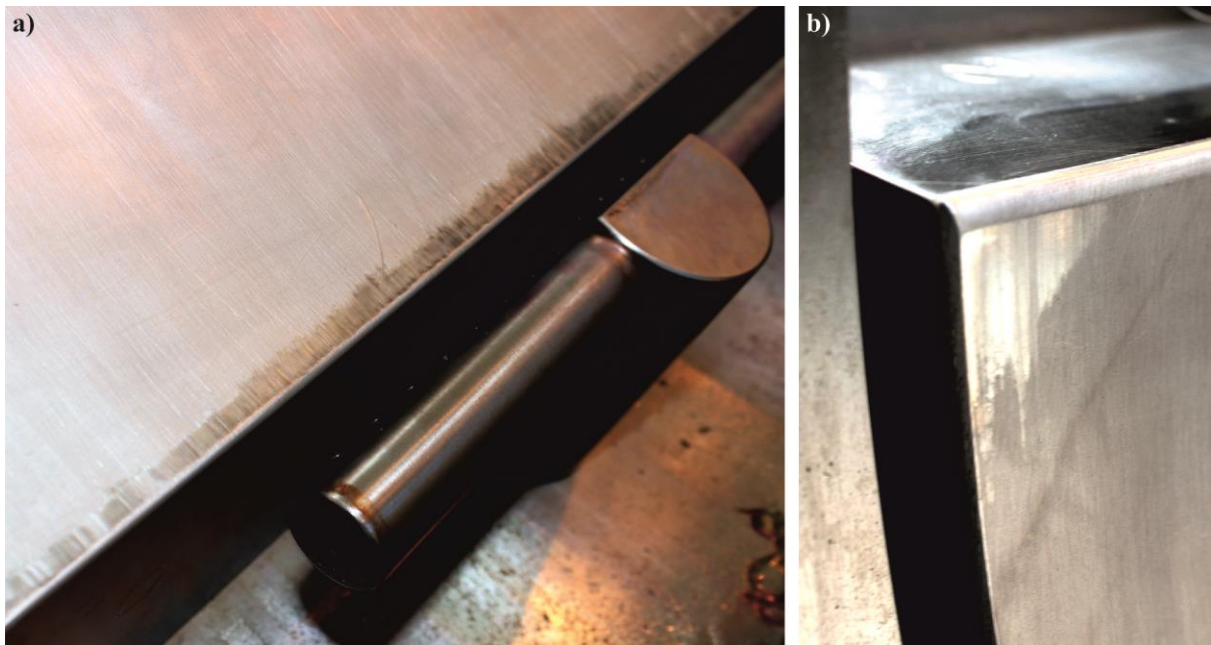
Na 3. segmentech, které jsou také nezatížené, lze nalézt poškození především na výstupní hraně. Zde lze obvykle nalézt stopy kontaktů z obr. 6a, které se nalézají po celé šířce segmentů, a jsou v obvodovém směru 8 – 10 mm dlouhé. Navíc lze na některých segmentech nalézt velmi jemné stopy otěru na rozích na náběžné hraně, viz obr. 6b. Je možné, že tyto stopy mohou být spojeny s najížděním, při němž není na činných plochách plně vytvořen nosný olejový film.



Obr. 4: Provoz neohrožující indikace od kontaktu náběžné hrany 4. segmentu s čepem hřídele



Obr. 5: Rozvoj únavových trhlin v oblasti náběžné hrany segmentu. Obrázek převzat z [3].



Obr. 6: Provoz neohrožující indikace od kontaktu (a) výstupní hrany 3. segmentu a (b) rohu náběžné hrany 3. segmentu s čepem hřídele

### Závěr

Poskoky a třepotání segmentů jsou jevy postihující horní nezátížené segmenty v radiálních kluzných ložiskách s naklápěcími segmenty. Oba jevy jsou spojeny se samovolným náhodným pohybem segmentu, při kterém může docházet ke kontaktům s čepem hřídele nebo jinými součástmi ložiska. Kontaktní síly namáhají součásti a v kritických případech mohou způsobit vznik a rozvoj únavových trhlin především v oblasti náběžné hrany postiženého segmentu.

Vznik poskoku a třepotání segmentů souvisí s konstrukčním návrhem ložiska, zejména s tzv. předtížením horních segmentů a momentem setrvačnosti segmentu. Výskyt jevů je ale silně ovlivněn i provozními parametry jako je množství mazacího oleje, jeho teplota, ale také obvodová rychlost čepu hřídele. Jevy lze s určitými obtížemi detekovat multiparametrickou diagnostikou využívající on-line vibrační data a vizuální kontrolu provedenou za odstávky.

## Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu THETA při řešení projektu TK04020057.

## Literatura

- [1] DMOCHOWSKI, Waldemar M., DADOUCHE, Azzedine, FILLON, Michel, DeCAMILLO, Scan M. Hydrodynamic Tilting-Pad Journal Bearings. In: *Encyclopedia of Tribology*. New York: Springer, 2013, pp. 1749-1757. ISBN 978-0-387-92897-5.
- [2] RENDL, Jan, DYK, Štěpán, SMOLÍK, Luboš. Nonlinear dynamic analysis of a tilting pad journal bearing subjected to pad fluttering. *Nonlinear Dynamics*, 2021, vol. 105, pp. 2133–2156. DOI <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06748-x>
- [3] ADAMS, M. L., PAYANDEH, S. Self-excited vibration of statically unloaded pads in tilting-pad journal bearings, *Journal of Lubrication Technology*, 1983, vol. 105, no. 3, pp. 377-383. DOI <https://doi.org/10.1115/1.3254616>
- [4] MARQUES, Filipe, FLORES, Paulo, CLARO, J. C. Pimenta, LANKARANI, Hamid M. A survey and comparison of several friction force models for dynamic analysis of multi-body mechanical systems. *Nonlinear Dynamics*, 2016, vol. 86, no. 3, pp. 1407-1433. DOI <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2999-3>
- [5] HAUGAARD, Asger M., SANTOS, Ilmar F. Stability of multi orifice active tilting-pad journal bearings. *Tribology International*, 2010, vol. 43, no. 9, pp. 1742-1750. DOI <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.04.013>
- [6] IKEDA, Kazunori, HIRANO, Toshio, YAMASHITA, Tatsuo, MIKAMI, Makoto, SAKAKIDA, Hitoshi. An experimental study of static and dynamic characteristics of a 580mm (22.8in.) diameter direct lubrication tilting pad journal bearing. *Journal of Tribology*, 2005, vol. 128, no. 1, pp. 146-154. DOI <https://doi.org/10.1115/1.2114929>
- [7] HYRÁT, Jan. *Vliv změny polohy čepů ložisek L3 a L4 („poskoky“) na životnost a spolehlivost TG2 1000 MW ETE*. Plzeň: Výzkumný a zkušební ústav, 2018. Technická zpráva, VYZ-TNZ-56/18/018.