

Měření axiálních ložisek se samo-vyrovnávacími elementy a konstrukce přípravku pro měření jejich maximálního vychýlení

Marek Urban¹, Tomáš Skopeček², Ing. Jan Dolejš²

¹ Katedra technologie obrábění Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, Česká Republika, E-mail: maarc@kto.zcu.cz

² GTW BEARINGS s.r.o., Příšov 24, 330 11 Třemošná, Česká Republika, E-mail: tskopecek@gtw.cz , jdolejs@gtw.cz

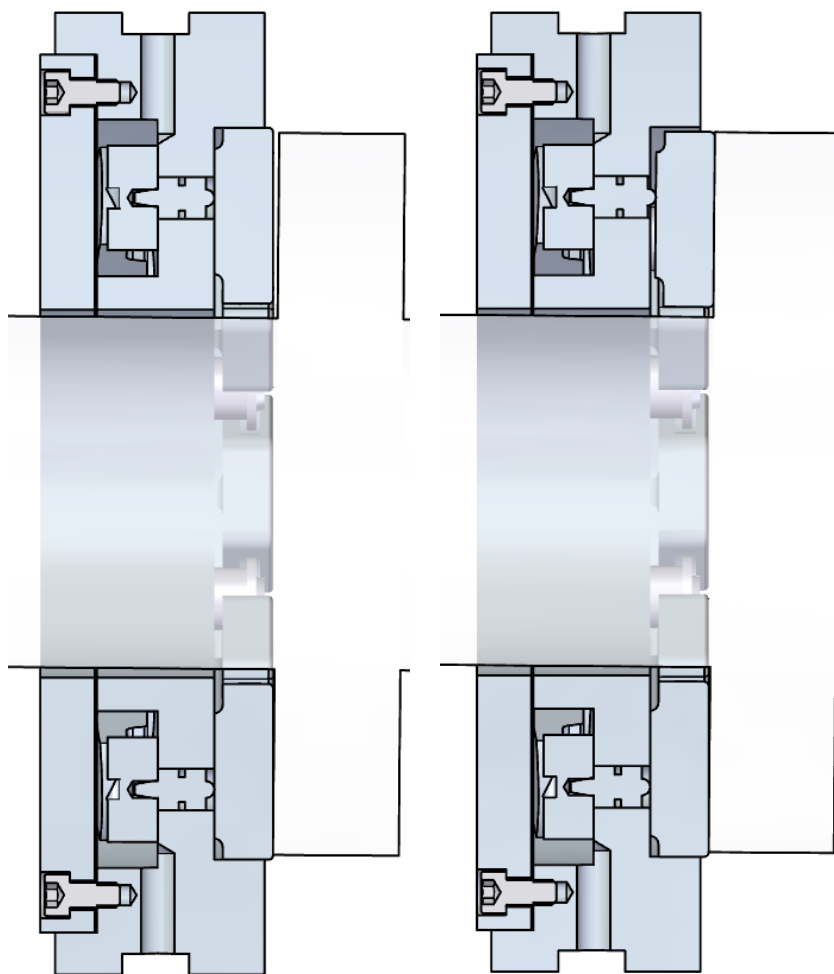
Abstrakt

V této práci je řešena problematika měření maximálně možného vychýlení (vyrovnání) segmentů axiálních ložisek se samo-vyrovnávacími elementy. Je zde řešena jak teorie vč. dvoudimenzionálního modelu řetězce samovyrovnávacího elementů, tak i praktické měření dvou vzorků ložisek na granitové desce s patřičným rastrem závitových děr, s pomocí číselníkových úchylkoměrů a upínek. V druhé části je představena možná konstrukce přípravku pro měření maximálně možného vychýlení (vyrovnání) segmentů axiálních ložisek se samo-vyrovnávacími elementy vč. analýzy MKP.

Klíčová slova: samo-vyrovnávání, axiální ložisko, měření, vychýlení, MKP

1 Úvod

Tato práce byla zpracovaná na základě nutnosti nalezení vhodného postupu / metodiky pro měření axiálních ložisek se samovyrovnávacími elementy. Tento druh ložisek se v současné době hojně využívá u výrobců turbín a kompresorů. V České republice je ve svých strojích používají například společnosti Doosan Škoda Power s.r.o., nebo Howden ČKD



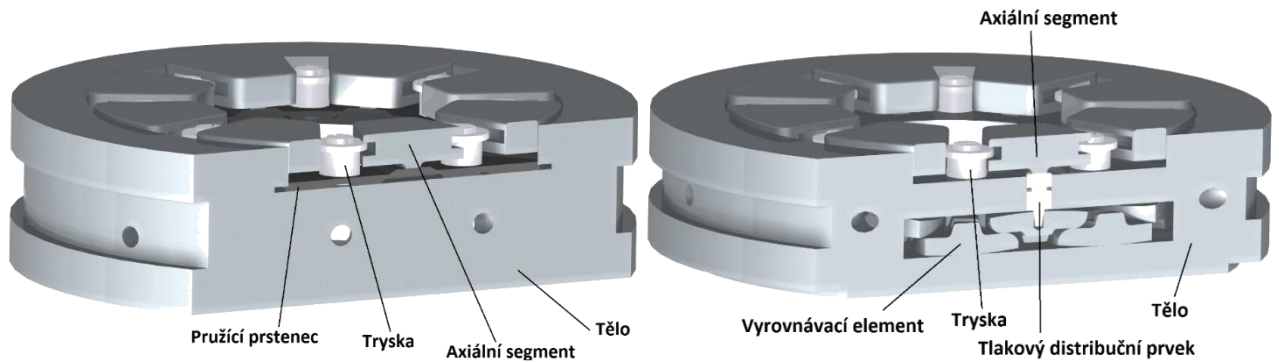
Compressors s.r.o. Výrobci používají tento druh ložisek v případech, kdy je riziko, že se límec hřídele limitně naklopí oproti ložisku (ať už z důvodu prohnutí hřídele, nebo teplotní dilatace celého stroje) a tím se razatní sníží kontakt límce s ložiskem. Níže nosná plocha má za následek lokální zvýšení teploty na zatěžovaných segmentech. V těchto případech pak není neobvyklé, že rozdíl naměřených teplot mezi horním a spodním segmentem může být až 60 °C (↑125°C na spodním segmentu, ↓ 65°C na horním segmentu). Teplota 125°C je pak již limitní pro ložiskový kov. Toto „nevyrovnání“ je znázorněno na obrázku č. 1.

Tento problém s přehříváním spodní části ložiska, lze částečně vyřešit nahrazením ložiska ložiskem s pružícím prstenem (obr. č. 2 - vlevo). Nedochozí zde ale k plnohodnotnému vyrovnávání, pouze k promáčknutí pružiny.

Cílem této zprávy je změřeni vyrovnávacího efektu u vzorových ložisek dvou různých výrobců ložisek a potvrzení funkčnosti / nefunkčnosti ložisek. Pojem „samovyrovnání“ lze pak definovat jako schopnost přenést tlak/sílu ze spodní části ložiska do horní tak, aby axiální segmenty ložiska byly vždy v kontaktu s límcem hřídele (viz obr. č. 3 - vlevo).

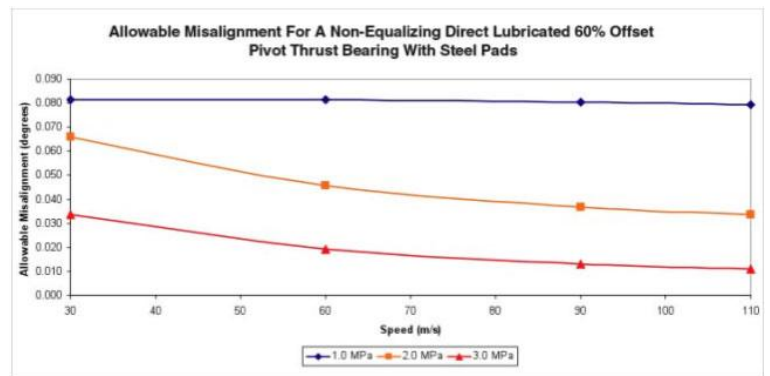
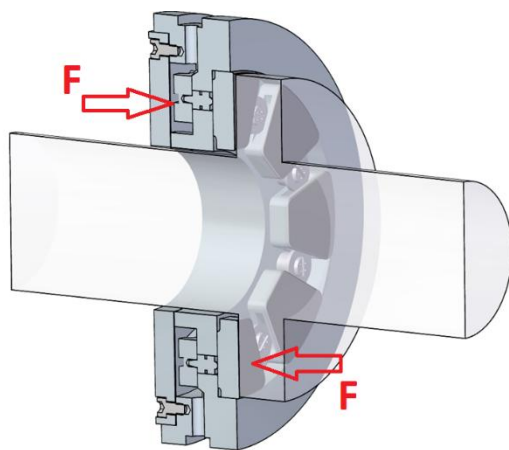
Obr. 1: Znázorněné nevyrovnání (vlevo) a vyrovnání (vpravo)

Fig. 1: Illustrated misalignment (left) and alignment (right)



Obr. 2: Starý systém pomocí pružiny (vlevo) x Systém vahadel (vpravo)
Fig. 2: Old system with spring ring (left) x System with self-equalizing elements

Samovyrovňovací ložisko je nutno použít pokud maximální vychýlení hřídele je vyšší, než je znázorněno níže v grafu (obr. č. 3 - vpravo), kde je vidět závislost přípustného vychýlení límce hřídele na obvodové rychlosti a axiálním zatížení. Dále se musí také přihlídnout k výrobním tolerancím – drsnost, rovinnost, rovnoběžnost atd.



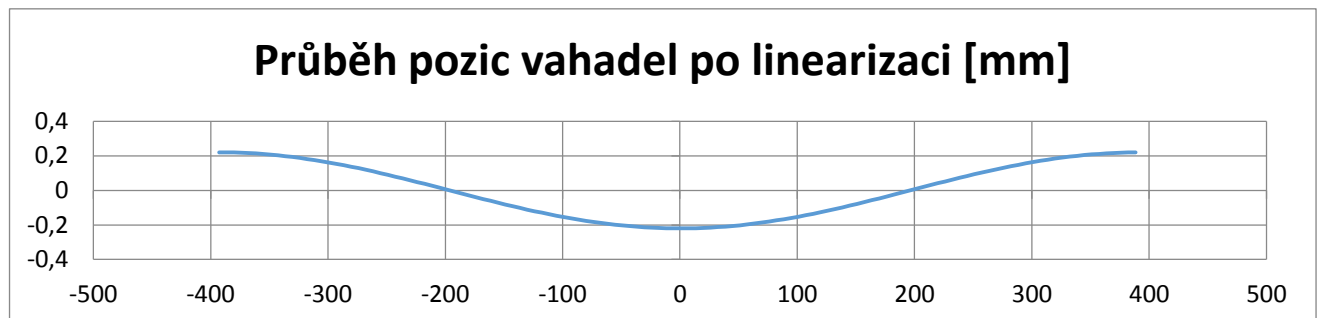
Obr. 3: Znázornění přenesení síly pomocí vahadel (vlevo), přípustné vychýlení hřídele [1] (vpravo)
Fig. 3: Illustration of transferring of force with help of self-equalizing elements (left), Allowable Misalignment of a collar [1] (right)

Každá aplikace musí být přezkoumána nezávisle na základě skutečných provozních podmínek a požadavku na mezní teplotu ložiska.

Ložisko se samovyrovňovacím mechanismem by mělo umět vyrovnat naklonění dosedací plochy (tzn. rotoru) o $0,1^\circ$.

1.1. Linearizování kružnice - poloha vahadel

Pokud bychom chtěli kruh s vahadly natáhnout na přímku – linearizovat, ideální průběh výšky vahadel by se podobal tomu, který je znázorněn na obr. č. 4. – linearizovaný řez válcem – při vychýlení límce rotoru $0,1^\circ$ na průměru 250mm.



Obr. 4: Průběh pozic vahadel
Fig. 4: Course of positions of self-equalizing elements

2 Měření ložiska č. 1

V této kapitole je podrobně popsáno měření a analyzování ložiska č. 1.

Axiální samovyrovňovací ložisko č. 1 má 18 axiálních segmentů a stejný počet spodních a horních vahadel. Již takto vysoké číslo klade vysoký nárok na přesnost výroby vzhledem k tolerančnímu řetězci. Aktivní plocha ložiska leží mezi průměry $d =$ cca 217mm a $D =$ cca 285mm (výška segmentu = 34mm).

Měření ložiska probíhalo v klimatizované místnosti při konstantní teplotě 21°C a vlhkosti cca 50% na granitové desce, kde je, vzhledem k velikosti ložiska, vhodný rastr závitových děr.

Vlastní měření bylo následně ověřeno pomocí parametrické skici.

2.1. Vlastní měření ložiska

Na ložisko byla položena broušená deska, která byla přitlačována dvojicí upínek. Tzv. zatěžovací upínka (na obr. 6 v popředí) tlačila na ložisko ve spodní polovině. Druhá upínka (na obr. 6 v pozadí), tzv. korekční, zde byla pouze pro zajištění 100% kontaktu desky s ložiskem = zamezení odlehnutí desky od ložiska vlivem zatížení pouze spodní poloviny desky. Kontakt desky s ložiskem se kontroloval spárovými měrkami a na průsvit (viz obr. č. 7.).

Vychýlení desky se kontrolovalo číselníkovými úchylkoměry na průměru 325 mm.

Takto provedené měření má dvě nevýhody. Nezhledňuje pracovní polohu ložiska (ložisko je pro horizontální aplikaci). Tuto nevýhodu však můžeme považovat za irelevantní, neboť pokud vyrovnání ložiska nepracuje v této „ideální“ poloze, s největší pravděpodobností nebude pracovat ani ve své pracovní (horizontální) poloze. Druhá nevýhoda je, že nelze přesněji zjistit velikost zatížení ložiska při měření. Zatížení vyvolané pomocí upínky a sestavy šroubů je však v tomto případě dostatečné.

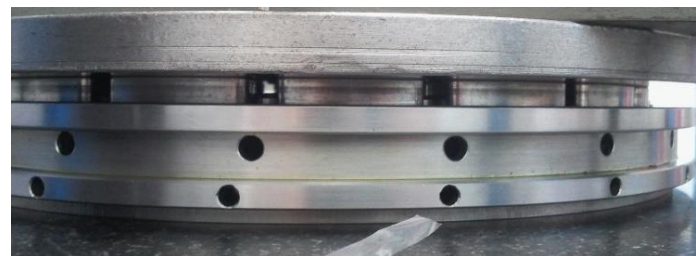
Při zatížení desky došlo k vychýlení o 0,16 mm ve spodní polovině ložiska a o 0,08 mm v horní polovině. Rozdíl 0,08 mm ($0,16 - 0,08 = 0,08$) mezi spodní částí a horní lze vysvětlit vůlí mezi vahadly, kdy si vahadla při zatížení nejprve „sednou“. Další vysvětlení je v maximálním naklonění horního vahadla, které je nedostatečné. Tato problematika bude dále rozebrána v následující kapitole (2.2). Znamená to ale, že ložisko vyrovnává nerovnoměrně (rozdíl 80 μm je značný – běžná tloušťka olejového filmu je cca 30 μm). Vychýlení 0,16 mm na průměru 325 mm odpovídá $0,06^\circ$ naklonění límce rotoru. Vychýlení 0,16 mm se ale nepřeneslo do horní poloviny ložiska, a proto je nutno vzít vychýlení pouze 0,08 mm (tj. konečné vychýlení horní poloviny ložiska). Vychýlení 0,08 mm odpovídá $0,04^\circ$ naklonění límce rotoru.



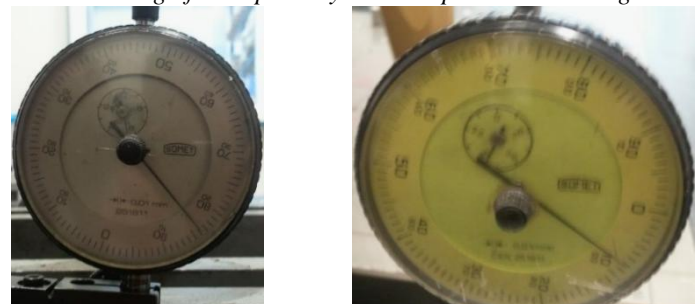
Obr. 5: Rozložení šroubů v granitové desce
Fig. 5: Position of bolts on granite desk



Obr. 6: Princip měření
Fig. 6: Principle of measuring



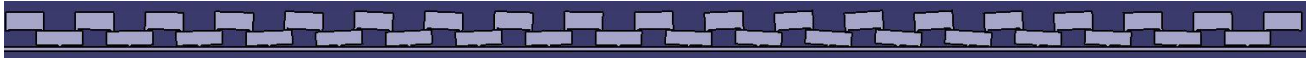
Obr. 7: Kontrola přilehnutí desky pomocí spárových měrek a na průsvit
Fig. 7: Check of abutting of plate with help of feeler gauge plus checking of transparency between plate and bearing



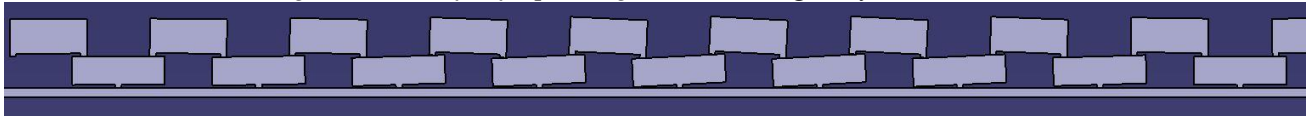
Obr. 8: Vychýlení spodní poloviny (vlevo) a horní poloviny (vpravo)
Fig. 8: Misalignment of lower half (left) and upper half (right)

2.2. Analýza pomocí parametrické skici – verze měřená = vahadla s ploškami

Pro účely analýzy geometrie vahadel byla vypracována parametrická skica. Tato skica je velice zjednodušená a řeší pouze limity naklonění vahadel bez jakéhokoliv tření, valivého či jiného odporu apod. Rozměr vahadel byl vzat pro střední průměr, na kterém jsou vahadla umístěna – tj. 252,5mm.



Obr. 9: Pozice vahadel při naklonění límce o 0,06°
Fig. 9: Position of self-equalizing elements during tilt of collar on 0,06°



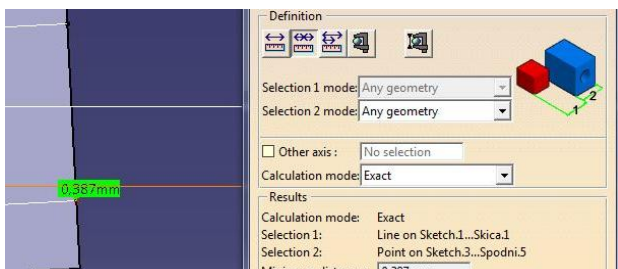
Obr. 10: Pozice poloviny počtu vahadel při naklonění límce o 0,06°
Fig. 10: Position of half the number of self-equalizing elements during tilt of collar on 0,06°

U takto vyrobené / zkonstruované geometrie vahadel ve skice nalezen limit naklonění límce rotoru 0,06° (pozice vahadel při limitním vychýlení je znázorněna na obr. č. 9 a detailněji polovina vahadel na obr. č. 10). Při vyšším naklonění límce hřídele již vahadla kolidovala (převážně se spodním plechem – viz obr. č. 11).

Při takovémto naklonění límce rotoru (0,06°) se ve skice horní vahadlo naklopí o 3,873° (obr. č. 12). Na reálném výrobku bylo změřeno maximální možné naklonění horního vahadla pouze 2,4°. To znamená, že ani 0,06° naklonění s takto vyrobeným a zkonstruovaným ložiskem nelze zachytit. To je také jeden z důvodů, proč bylo změřeno při zatížení desky vychýlení o 0,16 mm na spodní polovině ložiska a pouze o 0,08 mm na horní polovině. Došlo totiž k opření horního vahadla o tělo ložiska (ve vyfrézované stěně - viz obr. č. 13 - vpravo).

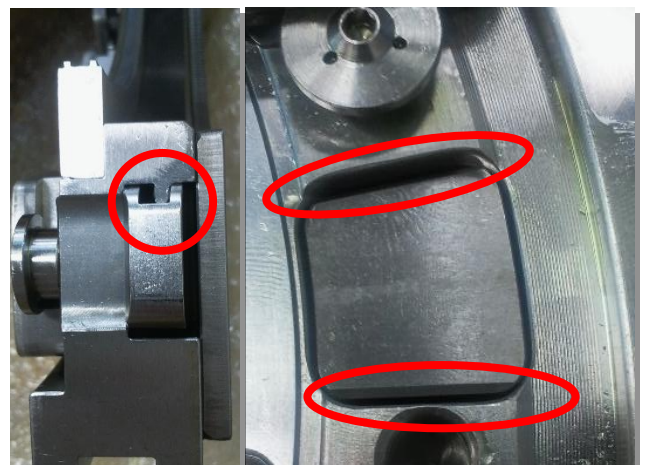
Jako další možný limit geometrie vahadel byla kontrolována dostatečná velikost drážky ve spodním vahadlu (obr. č. 15 - vlevo). Po změření a zanesení do skici bylo zjištěno, že při vychýlení 0,06° sice nekoliduje, ale drážka je nadimenzována velmi limitně (viz obr. č. 14 – mezera pouze 0,387mm). To znamená, že při hypotetickém naklonění límce rotoru 0,07° (pokud by to geometrie vahadel a celkově celého lůžka vahadel dovolovala) by již docházelo ke kolizi.

Jak již bylo zmíněno výše, ložisko musí snést vychýlení 0,1°, takže i tato drážka je slabým prvkem této konstrukce.

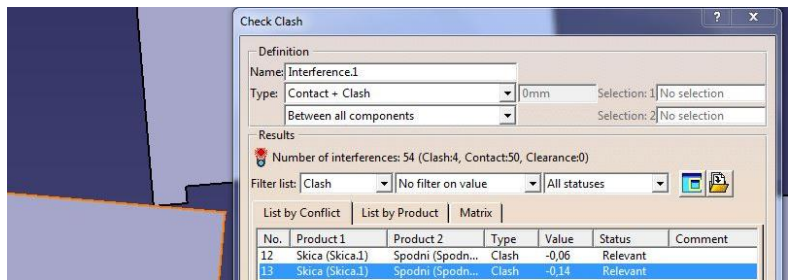


Obr. 14: Mezera mezi hranou těla ložiska a drážkou spodního vahadla
Fig. 14: Gap between bearing body and groove in lower self-equalizing element

Obr. 13: Detail na drážku spodního vahadla (vlevo) a limit naklonění horního vahadla (vpravo)
Fig. 13: Detail on a groove in lower self-equalizing element (left), limit of tilt of upper self-equalizing element (right)

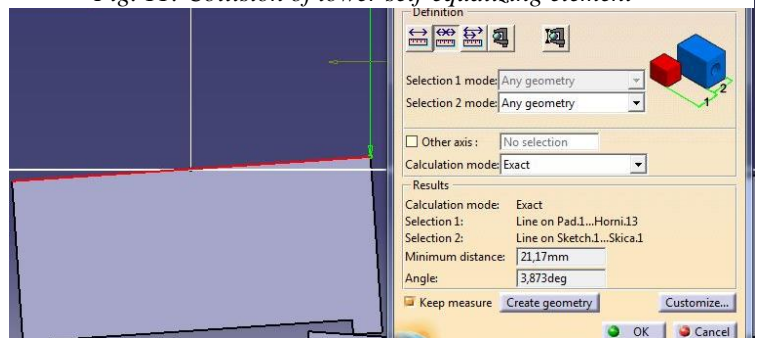


Obr. 13: Detail na drážku spodního vahadla (vlevo) a limit naklonění horního vahadla (vpravo)
Fig. 13: Detail on a groove in lower self-equalizing element (left), limit of tilt of upper self-equalizing element (right)



Obr. 11: Kolize spodního vahadla

Fig. 11: Collision of lower self-equalizing element

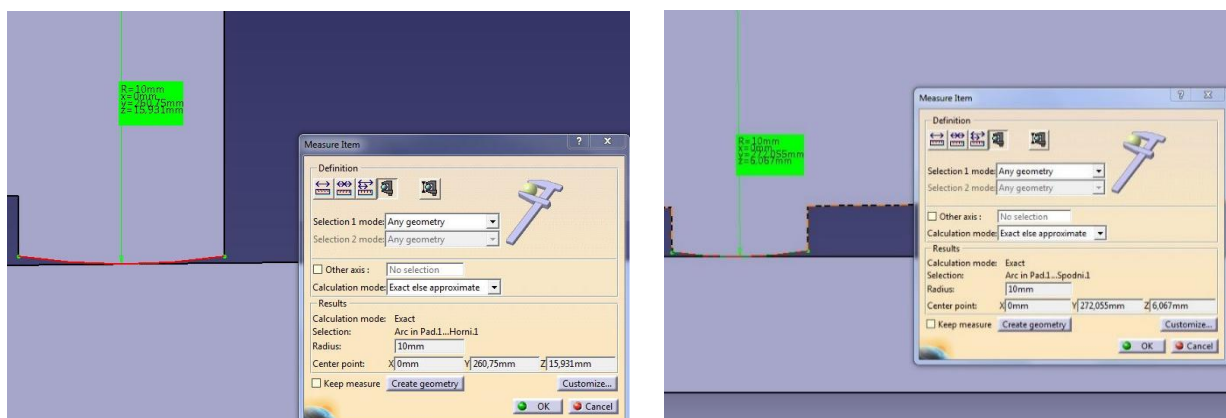


Obr. 12: Maximální naklonění horního vahadla

Fig. 12: Maximum tilt of upper self-equalizing element

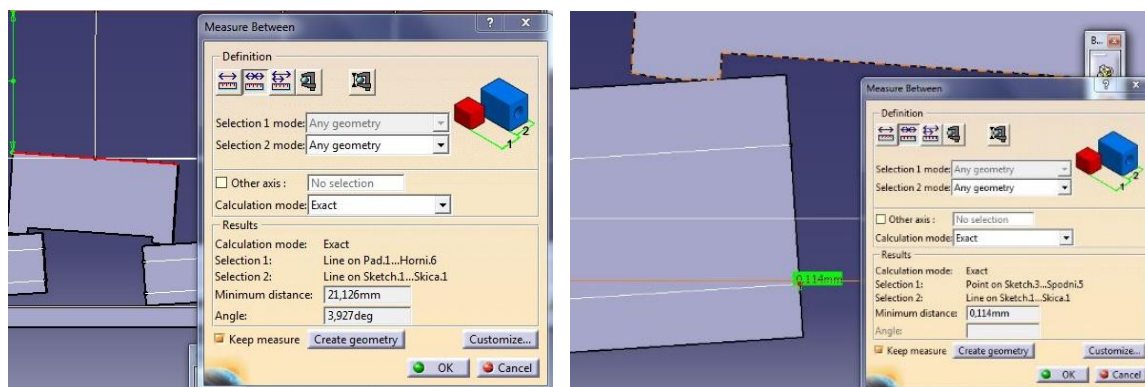
2.3. Analýza pomocí parametrické skici – verze rádius na styčných plochách vahadel

Tato analýza vychází z předchozí analýzy, kdy byl na vahadlech vytvořen rádius R10, místo plošky (obr. č. 15). Výsledek byl velice podobný předchozímu výsledku – tzn. i zde bylo limitní naklonění límce rotoru pouze $0,06^\circ$ (pokud bereme v potaz pouze geometrii vahadel).



Obr. 15: Rádus na styčných plochách
Fig. 15: Radius on surface contact

Úhel naklonění horního vahadla vyšel $3,927^\circ$, což vzhledem již výše zmíněnému limitu naklonění horního vahadla na reálném výrobku $2,4^\circ$ je opět hodně, a proto i ložisko s takovou úpravou nebude fungovat správně a bude mít své limity (dle iteračních simulací v parametrické skici zvládne naklonění límce rotoru $< 0,04^\circ$). Kinematika vahadel je ale v tomto případě daleko plynulejší a odpory při naklonění vahadel budou výrazně menší. Takováto konstrukce a celková geometrie ložiska je ale i tak nedostačující.



Obr. 16: Maximální naklonění horního vahadla při vychýlení $0,06^\circ$ (vlevo) a mezera mezi hranou těla ložiska a drážkou spodního vahadla

Fig. 16: Maximum tilt of upper self-equalizing element during misalignment $0,06^\circ$ (left), Gap between bearing body and groove in lower self-equalizing element (right)

3 Měření ložiska č. 2

U měření ložiska č. 2 již nebyla vypracována parametrická skica. Toto měření proběhlo pouze pro kontrolu a porovnání s ložiskem č. 2.

Měření probíhalo za stejných podmínek jako u ložiska č. 2. Na ložisko byla položena broušená deska, která byla přitlačována dvojicí upínek. Tzv. zatěžovací upínka (na obr. 17 v popředí) tlačila na ložisko ve spodní polovině. Druhá upínka (na obr. 17 v pozadí), tzv. korekční, zde byla pouze pro zajištění 100% kontaktu desky s ložiskem = zamezení odlehnutí desky od ložiska vlivem zatížení pouze spodní poloviny desky. Kontakt desky s ložiskem se kontroloval spárovými měrkami a na průsvit (viz obr. č. 18.).



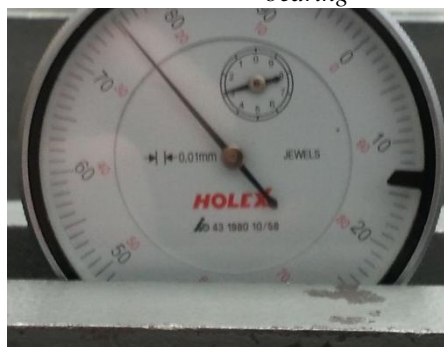
Obr. 17: Princip měření
Fig. 17: Principle of measuring

Vychýlení desky se kontrolovalo číselníkovými úchylkoměry na průměru 290 mm. Při zatížení desky došlo k vychýlení o 0,29 mm na spodní polovině ložiska a o 0,25 mm na horní polovině. Rozdíl 0,05 mm mezi spodní částí a horní lze vysvětlit vůlí mezi vahadly, kdy si vahadla při zatížení nejprve „sednou“. Ložisko vyrovnává a takto vyrobené ložisko přenáší axiální sílu všemi svými segmenty. Vychýlení 0,25 mm při průměru 290 mm odpovídá $0,1^\circ$ naklonění límce rotoru.



Obr. 18: Kontrola přilehnutí desky pomocí spárových měrek a na průsvit

Fig. 18: Check of abutting of plate with help of feeler gauge plus checking of transparency between plate and bearing

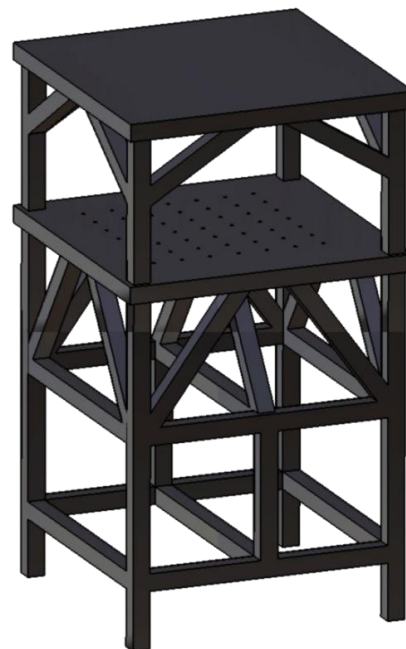
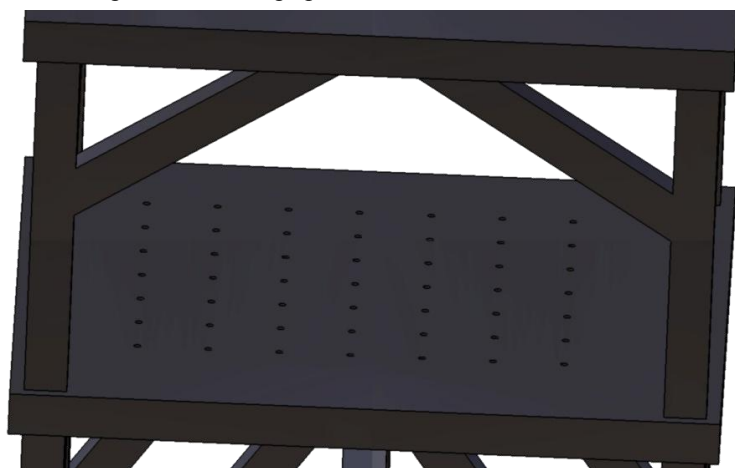


Obr. 19: Vychýlení spodní poloviny (vlevo) a horní poloviny (vpravo)

Fig. 19: Misalignment of lower half (left) and upper half (right)

4 Konstrukce přípravku pro měření maximálního vychýlení ložiska

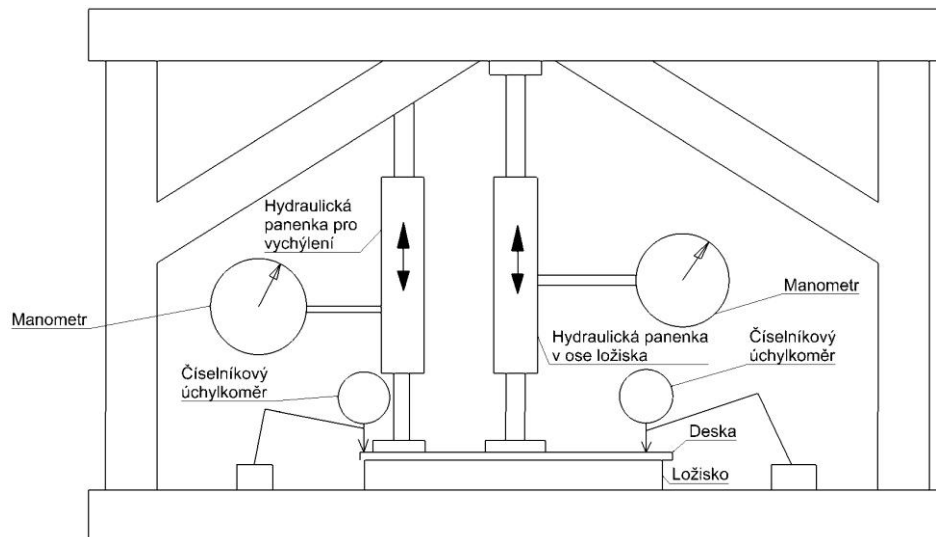
Na základě zkušeností z měření byl navržen přípravek pro měření maximálního vychýlení ložiska (obr. č. 20). Přípravek je svařen z několika dílů. Při měření bude ložisko položeno na broušenou desku s rastrem závitových děr. Rastr je vytvořen tak, aby bylo možno měřit ložiska od průměru cca 50mm až po 1000mm, což je více než dostatečné. Tyto závitové díry budou sloužit k upnutí ložiska k přípravku.



Obr. 20: Přípravek

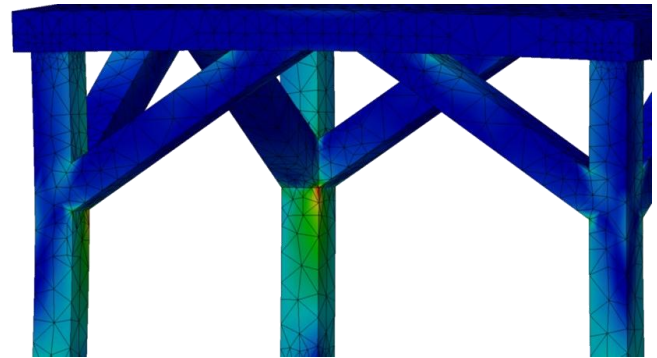
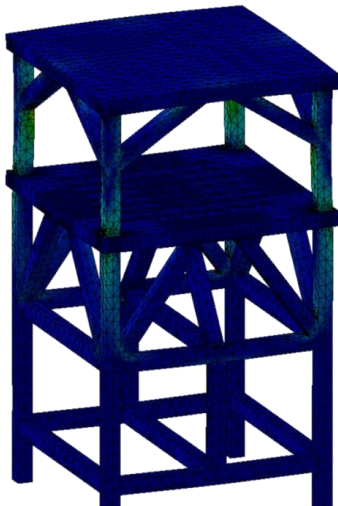
Fig. 20: Jig / Fixture

Princip měření maximálního vychýlení ložiska je znázorněn na obrázku č. 21. Na ložisko je položena broušená deska. Mezi touto deskou a horní deskou rámu jsou vloženy dvě hydraulické panenky. Jedna panenka je v ose ložiska a druhá panenka na straně maximálního požadovaného vychýlení. Panenka v ose musí ložisko zatěžovat min 60% silou nominálního zatížení. Toto „předepnutí“ ložiska je potřeba k překonání odporu uvnitř ložiska a zároveň je zde také ověřena funkčnost vyrovnávání ložiska při zatížení. Na hydraulický okruh je připojen manometr, kde lze odečíst velikost zatížení. Vychýlení je zde měřeno číselníkovým úchylkoměrem.



Obr. 21: Schéma měření na přípravku

Fig. 21: Draft of measuring on a jig



Obr. 22: Pevnostní MKP analýza přípravku

Fig. 22: FEM analysis of a jig

Pro

optimalizaci geometrie a velikosti nosníků byla provedena série FEM analýz, kdy byl přípravek staticky zatěžován 60 kN statické síly. Takováto síla je obvyklá při zatěžování ložisek obdobné velikosti jako ložisko č. 1 a č. 2.

5 Závěr

Ložisko č. 1 nesplňuje hlavní podmínku vyrovnání $0,1^\circ$. Při zatížení ložiska dochází pouze k „polovičnímu“ vyrovnání a maximálně dokáže ložisko vyrovnat pouze vychýlení límce rotoru $0,04^\circ$. Na vině je nevhodná konstrukce ložiska č.1 – ani při 100% přesné výrobě by ložisko nefungovalo. Jako nejvíc kritické místo lze brát vyfrézování v těle pro horní vahadlo (obr. č. 23), které horní vahadlo nevhodně limituje.

Komparační měření ložiska č. 2 potvrdilo, že vyrovnávání při takto zvolené konstrukci funguje.

Ložisko č. 2 splňuje podmínku vyrovnání vychýlení límce rotoru o $0,1^\circ$.

Na základě zkušeností z měření byl navržen přípravek pro měření maximálního vychýlení ložiska. Funkčnost přípravku bude ověřena v průběhu několika měsíců.



Obr. 23: Limit naklonění horního vahadla

Fig. 23: Limit of tilt of upper self-equalizing element



Obr. 24: Návrh samo-vyrovnávacích elementů dle GTW
Fig. 24: Draft of self-equalizing elements acc. GTW

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat společnostem GTW BEARINGS s.r.o. a Doosan Škoda Power s.r.o. za poskytnutí dat a prostoru pro měření ložisek.

Literatura

- [1] **Kingsbury.** Dealing With Misalignment Issues On Non-Equalizing Thrust Bearings. <http://www.kingsbury.com/bearing-misalignment-issues.shtml>. [Online]
- [2] **Straka, František.** Static Analysis of Self-equalizing System in Tilting Pad Thrust Bearing, Plzeň: Doosan Skoda Power, 2013.

Abstract

Artlice: Measuring of thrust bearings with self-equalized elements and construction of preparation for measuring of maximum misalignment

Authors: Marek Urban¹,
Tomáš Skopeček²,
Ing. Jan Dolejš²

Workplace: ¹ Department of Machining Technology, Faculty of Mechanical Engineering, University of West Bohemia in Pilsen, Czech Republic, E-mail: maarc@kto.zcu.cz
² GTW BEARINGS s.r.o., Příšov 24, 330 11 Třemošná, Česká Republika, E-mail: tskopecek@gtw.cz, jdolejs@gtw.cz

Keywords: self-equalized, thrust bearing, measuring, misalignment, FEM

This article is dealing with a problem of measuring of maximal possible self-equalizing of pads in thrust bearing with self-equalizing elements. In this article is dealt theory (chapter 1.) where is illustrated misalignment and alignment (fig. 1) and how we can approach to design of thrust bearings (fig. 2). Further is part of theory is illustration of transferring of force with help of self-equalizing elements and Allowable misalignment of a collar (both fig. 3). In chapter 1 is also described course of positions of self-equalizing elements (fig. 4).

Chapters 2 and 3 describing measuring of two samples of thrust bearings made by different manufacturers. Structure of both chapters is very similar. Chapter 2 and subchapter 2.1 is about describing of principle of measuring and main measuring of thrust bearing nr. 1 on granite desk with proper grid of tapped holes, dial gauges and clamps (fig. 5 – 8).

In subchapter 2.2 is two-dimensional model of chains with self-equalized elements (fig. 9, 10). This two-dimensional model of chains with self-equalized elements is based on real-world elements and show possible collision of self-equalizing elements incl. their maximum tilt (fig. 11, 12). Due to two dimensional model is illustrated limits in design of thrust bearing nr. 1 (fig. 13, 14).

In subchapter 2.3 is analyze of modification two dimensional model of thrust bearing nr. 1 where is radius on surface contact (fig. 15) on self-equalizing elements instead of facets on surface contact (like in previous subchapter). Part of subchapter 2.3 is also illustration of maximum tilt of upper self-equalizing element during misalignment $0,06^\circ$ and illustration of gap between bearing body and groove in lower self-equalizing element (fig. 16).

Chapter 3 is about describing of principle of measuring and main measuring of thrust bearing nr. 2 on granite desk with proper grid of tapped holes, dial gauges and clamps (fig. 17 – 19).

In chapter 4 is shown possible design of a jig for measuring of maximal possible self-equalizing of pads in thrust bearing with self-equalizing elements (fig. 20, 21) incl. FEM analysis (fig. 22).