

# Oponentní posudek disertační práce

Oponent: **Ing. Tomáš SKOPEČEK, Ph.D.**

Autor disertační práce: **Ing. Marek Urban**

Disertační práce: **Zefektivnění výroby, měření a funkčnosti nesy-  
metricky zatěžovaného ložiska v energetice**

**A)** Předložená disertační práce s názvem „**Zefektivnění výroby, měření a funkčnosti nesy-  
metricky zatěžovaného ložiska v energetice**“ se zabývá aktuálním tématem z oblasti uložení rotačních částí rotodynamických strojů, které jsou používány především při výrobě elektrické energie (turbíny) popř. u jiných turbosoustrojí jako např. turbokompresory či převodovky. Autor disertační práce je hlavním řešitelem komplexní problematiky tvorby funkčního inovativního prototypu tzv. samo-vyrovnávacího axiálního ložiska pro řešení nesy-  
metrického zatížení. Tento modelový typ ložiska byl u zaměstnavatele již po úspěšném statickém a dynamickém experimentálním otestování nasazen do výrobního programu a již bylo zákazníkům dodáno několik desítek kusů a z nich část již funguje na elektrárnách po celém světě. Energetické úspory a přínosy z oblasti životnosti produktu plynoucí z tohoto inovativního řešení mají výrazný význam pro oblast energetiky.

**B)** Autor v disertační práci popisuje jen část své činnosti na celém projektu, tedy oblast směřující především k technologičnosti konstrukce a vlastní výrobě daného typu ložisek (celkový projekt přesahuje rámec jedné disertační práce). Hlavní cíle dané práce byly stanoveny dva: nalezení nástroje v rámci technologičnosti konstrukce směřující k maximální variabilitě a modulárnosti řešení při přijatelných nákladech a dále navržení metodiky měření maximálního vychýlení axiálního ložiska, tedy ověření vyrovnávacího mechanismu.

V oblasti technologičnosti konstrukce autor rozebírá jednotlivé funkční prvky ložiska, především pak hlavně vyrovnávacího elementu (vahadla). Hodnocená kritéria byla především tvar, materiál a technologie. Zde bych chtěl vyzdvihnout především pokročilou aplikací FEM analýzy a experimentálního ověření dynamických vlastností prvků systému vč. tribologického testování.

Oblast metrologickou a ověření funkce autor zdařile prezentuje na statických a dynamických „standech“ (testovacích strojích), které simulují reálné podmínky v provozu a následně zpětnově výsledky implementuje do původního návrhu.

**C)** Výsledky disertační práce zcela splňují stanovené cíle. Autor představil modulární systém reflektující technologičnost konstrukce a verifikoval funkci vyrovnávacího systému ložiska. Tento závěr podporuje nejen úspěšně podaný užitný vzor, jehož spoluautorem je Ing. Urban, a který se věnuje především tvaru vyrovnávacího elementu; ale i technicko-obchodní úspěch celého ložiska. Jedná se o jedinečné a celosvětově konkurenceschopné řešení!

**D)** Předložená disertační práce je zpracována systematicky, nepostrádá ani vysokou formální a grafickou úroveň.

**E)** Ing. Marek Urban je také autorem či spoluautorem více než dvou desítek odborných publikací, vědeckých zpráv a příspěvků na mezinárodních konferencích. Jeho publikační činnost hodnotím pozitivně, a oceňuji i úspěchy s publikacemi v zahraničí. Velmi pozitivně hodnotím jeho zapojení ve vývojových projektech zaměstnavatele, především v projektu Centrum kompetence.

**F)** Předloženou disertační práci ing. Marka Urbana **doporučuji** (dle zákona č.111/1998) **k obhajobě.**

Ve Vejpnicích dne: 14.2.2020



.....  
podpis

Otázky oponenta:

- 1) Jak veliký vliv měla technologičnost konstrukce na celkový vývoj ložiska? Osvědčil se takový postup?
- 2) Vidíte v celé konstrukci toto typu ložiska ještě významný potenciál k optimalizaci?
- 3) Je možné závěry této práce aplikovat i pro radiální ložiska v případě jejich nesymetrického zatěžování?

# Oponentní posudek disertační práce

Téma: „Zefektivnění výroby, měření a funkčnosti nesymetricky zatěžovaného ložiska v energetice“.

Autor: Ing. Marek URBAN  
Doktorský studijní program: P2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303V004 - Strojírenská technologie – technologie obrábění

## a) zhodnocení významu pro obor:

předmětem řešení DP je nalezení optimální konfigurace a technologie ve vazbě na provozní a funkční podmínky nesymetricky zatěžovaného samo-vyrovňovacího axiálního ložiska s axiálními naklápěcími segmenty u energetických zařízení. Řešená sestava (pro uložení rotoru), je jedním z klíčových podsestav turbíny nejen z titulu funkce vyrovnávání úhlových odchylek při překročení tolerancí polohy rotoru vůči ose statoru, ale zároveň silně ovlivňuje i pasivní (frikční) odpory a tím celkovou účinnost zařízení. Axiální ložisko umístěné v předním ložiskovém stojanu (podpěře), je většinou zástavbově kombinováno s předním radiálním ložiskem, je oboustranné, tzn. umožňuje zachycování axiální síly v obou směrech a zároveň je osově nastavitelné. Progresivní, profesionální vyřešení cíle DP vyžaduje široký multidisciplinární přístup, (tj. z oborů fyziky, termomechaniky, mechaniky a materiálového inženýrství), a proto jsou výsledky DP velmi cenné pro teorii i výrobce energetických zařízení.

## b) hodnocení postupu řešení:

DP má chronologickou osnovu skládající se z 8 kapitol, po úvodu je uvedena detailní rešerše současného stavu řešené problematiky, varianty konstrukčního provedení včetně tech. popisu jednotlivých prvků sestavy ax. ložiska. Dále je promítnuta technologičnost konstrukce do celkové koncepce ax. ložiska včetně ekonomického hlediska. Není opomenuta i záležitost TZ, CHTZ a povrch. úprav (omílání, chem. niklování) ve vazbě na provozní zatěžovací podmínky klíčových prvků, především samo-vyrovňovacích elementů (vahadel) ax. ložiska. S ohledem na nutnost velmi rozsáhlého experimentálního ověřování teoretických poznatků s cílem dosažení max. věrohodnosti naměřených hodnot, provedl doktorand i krátkou analýzu použitelných statistických metod, (nástrojů), přičemž pro vyhodnocení hlavního experimentu využil metodu DoE. Naměřené hodnoty stavu povrchu, posuvu, počtu cyklů, dvojice faktorů u vahadel statisticky zpracoval pomocí analýzy rozptylu (ANOVA) a s využitím SW QC Expert. V 6. kapitole jsou detailně specifikovány generální, hlavní a dílčí cíle DP včetně předpokládaných přínosů pro teorii i praxi. Na základě rešeršních, teoretických i praktických znalostí, přistoupil v kap. 7 k rozfázování velmi náročných experimentálních zkoušek. Chronologicky experimentálně zjišťoval vliv technologie (geometrie a integrity povrchu vahadel), tribologických vlastností vzorků i reálných vahadel včetně závěrečného ověření funkčnosti prototypů ložisek v experimentálních zařízeních, kde bylo možné nasimulovat reálný provoz. Na závěr každého experimentu provedl detailní vyhodnocení, diskuzi nad dosaženými výsledky. V 8. kap. je shrnutí závěrů a celkové naplnění cílů DP. Pro vyšší přehlednost zpracování, je DP doplněna o podpůrné informace shrnuté do 22 příloh čítající dalších 67 stran, takže jde o velmi rozsáhlou práci.

## c) stanovisko k výsledkům DP:

pozitivně hodnotím komplexní multioborový přístup při analýze složitých kinematických vazeb jednotlivých prvků sestavy ax. ložiska a jejich vliv - reakci (tření, odvalování) na funkčnost uložení rotoru. Překvapivě nejlepší výsledek z hlediska použitých povrchových úprav byl dosažen na vahadlech s úpravou bezproudého

niklování, z hlediska drsnosti byly vhodné vyšší posuvy  $f$ , naopak omílání povrchu nemělo na opotřebení povrchu téměř žádný vliv.

S ohledem na reálné dosažitelné přesnosti výroby i ekonomiku vahadel (provedení válec-válec, válec/plocha), doplnil ještě o experiment na spec. tribologickém standu, s dynamickým i statickým průběhem zatížení s cílem porovnání chování povrch. úprav a sledování jejich odezvy při zatížení.

Doktorand chronologicky provedl nezbytné dílčí experimentální testy řídicího dílu ax. ložiska – vyrovnávacího elementu (vahadla), s cílem komplexního ověření funkčnosti ax. ložiska a na základě experiment. výsledků potvrdil celkovou funkčnost navrženého prototypu ložiska u 2 aplikací: turbína DSPW TG 10 a převodovkový stand s kompresorovým zařízením Darina IV. Na vývoji nového produktu byla zapojena řada významných partnerů z oboru energetiky (DSPW, Howden ČKD Compressors, GTW BEARINGS) i výzkumné pracoviště NTC při ZČU.

Navržené a odzkoušené řešení ax. ložiska je zároveň od r. 2018 chráněno užitným vzorem pod č. 31447, jeho původcem je autor DP.

*d) formální, štábní úroveň DP:*

obsahově a graficky je velmi rozsáhlá práce pečlivě a přehledně zpracována, proložená řadou barevných grafů, fotografií, obrázků (163), skic, tabulek, což zvyšuje její vypovídací schopnost a čtivost. Navíc formou 22 příloh jsou uvedeny důležité detailní informace týkající se použité rozsáhlé teoretické i experimentální části výzkumu. Vlivem značného objemu, rozsahu práce (139 + 67 str.), se autor nevyhnul překlepům: (str.41 –učit → určit; str.47 vézt →vést; str.56 funguje →je funkční, str.58 vzhledem →vzhledem, za body a),b),c).... se píše malé písmeno; gramatické: str.78, 80, 98 vyplívá→vyplývá; interpunkce: str.137 .....s konvenčními typy ložisek, došlo ke snížení teploty.....

*e) publikační činnost autora:*

doktorand čerpal informace z 89 zdrojů, jak z domácích tak z impaktovaných zahraničních časopisů, odborných článků, katalogů a příspěvků z konferencí. Celkem publikoval jako autor 13 odborných prací vztahujících se k řešenému tématu, dále je spoluautorem 9 publikací a 1 užitného vzoru.

*f) hodnocení oponenta:*

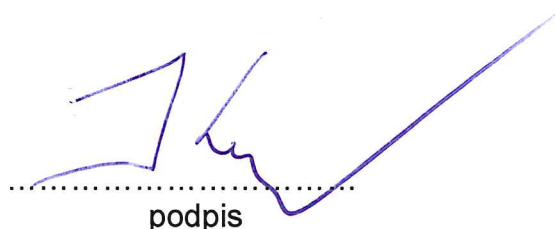
autor prokázal schopnost samostatné výzkumné práce, a proto **doporučuji** DP k obhajobě ve smyslu zákona č.111/1998 Sb. § 47.

**Otázky:**

1. Kvantifikujte hlavní silová zatížení ax. ložiska u parních turbín.
2. Vysvětlete podstatu pozitivních výsledků u vahadel s chemicky nanosenou vrstvou na bázi NiP?
3. Z jakého důvodu byla zvolena na vahadla jakost ČSN 41 6343.6 ?
4. Které faktory Vám zabránily aplikaci difuzní vrstvy a tím využití nitridačních ocelí, např. 15 230.7, 15 330.7 aj. na vahadla?

Zpracoval: KESL Miloslav, Dr.Ing.

Dne: 2020-01-23



podpis