

doc. Ing. Václav Vaněk, Ph.D.
Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta strojní, Katedra konstruování strojů
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Oponentský posudek disertační práce

Ing. Jakuba Chmelaře

s názvem

„Využití povrchových akustických vln pro monitorování mazací vrstvy mezi valivými elementy a dráhou ložiska“

Studijní obor: Strojní inženýrství

Studijní obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Škola: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní

Rozbor práce

Disertační práce (dále DisP) se zabývá diagnostikou kvality mazací vrstvy v rotačních uloženích s valivými elementy. V DisP je pro přímý monitoring stavu mazací vrstvy sice využita již známá metoda, ale způsob jejího použití je zcela nový a nebyl jinými autory doposud publikován. Podstatou metody je její schopnost vyhodnotit stav mazací vrstvy v ložisku na základě analýzy snímaného signálu, jež je odezvou od na povrchu vnějšího kroužku ložiska aktivně buzených a dále se šířících povrchových akustických vln. Na základě matematického modelování válečkového ložiska a elastohydrodynamického přímkového kontaktu byly v DisP stanoveny mapy provozních mazacích režimů, jež umožňují predikovat provozní mazací režim. Na základě provedených experimentálních měření byla v DisP prokázána shoda mezi výstupy modelu provozních mazacích režimů válečkového ložiska a pozorovanými charakteristickými znaky indikujícími změny v šíření akustických povrchových vln. Na základě výše uvedených skutečností bylo možné provést hodnocení stavu mazací vrstvy mezi valivým elementem a kontaktní plochou vnějšího kroužku ložiska a predikovat režim mazání s dostatečnou přesností.

DisP je rozčleněna do následujících částí

- **Úvod** – V úvodu autor komentuje to, co je předmětem DisP a uvádí, že významná část vznikajících technických systémů obsahuje valivá ložiska a tudíž jejich životnost a spolehlivost je významnou měrou odvislá právě od životnosti a spolehlivosti ložisek. Autor konstatuje, že jednou z cest, jak zvýšit spolehlivost ložisek, je i snížení rizika jejich náhlého selhání. Tohoto je možné dosáhnout průběžným sledováním (monitoringem) ložisek, což umožňuje včas reagovat na změny stavu v ložisku probíhajících dějů, jež mohou být indikátorem počínající poruchy ložiska a tím s dostatečným předstihem plánovat servisní zásahy tak, aby jejich dopad (i ekonomický) na provozování zařízení byl minimalizovaný.
- **Motivace a vymezení tématu** – V této kapitole autor prezentuje statistické vyhodnocení příčin iniciace poškození valivých ložisek. Na základě tohoto vyvozuje, že dominantní příčinou poškození ložisek je nedokonalé mazání.
- **Přehled současného stavu řešení problematiky** – V této kapitole autor provádí rešerši v oblastech kontaktů valivých elementů s kroužky ložiska, porušování materiálu valivým kontaktem a metod

monitorování mazací vrstvy. Na základě rešerše autor formuluje dílčí závěry, které jsou východiskem pro stanovení cílů DisP.

- **Cíle DisP** – Hlavním cílem DisP bylo vyvinutí a ověření metody, jež by umožňovala sledovat vlastnosti mazacího filmu vytvářeného mezi valivými elementy a dráhou ložiska, prostřednictvím monitorování charakteristik šíření aktivně buzených povrchových akustických vln. Dále autor uvádí šest dílčích cílů DisP a pět etap výzkumu.
- **Model ložiska a EHL mazací vrstvy kontaktu** – V této kapitole autor popisuje model radiálního válečkového ložiska a model liniového EHL kontaktu. Uvádí také jednosměrné propojení modelů, kdy se výstupy z modulu pro matematickou simulaci ložiska použijí jako vstupy do modulu, ve kterém je řešena mazací vrstva. Výsledkem výše uvedeného jsou informace týkající se tloušťky mazací vrstvy mezi válečkem a dráhou valivého elementu na vnějším kroužku ložiska.
- **Návrh experimentu s využitím matematických modelů** – V této kapitole autor uvádí, jak byly moduly vyvinuté pro modelování ložiska a mazací vrstvy využity pro definování jednotlivých parametrů experimentu. Uváděné studie ukázaly, že na stav mazání mají velmi malý vliv výrobní tolerance a uložení ložisek na hřídeli a teplotní gradient (v rozmezí provozních podmínek). Naopak významný vliv má změna teploty kroužků ložiska a vývoj drsnosti povrchů během zabíhání ložiska. Výsledky z matematických simulací také posloužily jako báze pro vědomou volbu rozsahu viskozity maziv, predikci přechodů mezi mazacími režimy ložiska, stanovení rozsahu otáček, radiálního zatížení, parametrů olejového čerpadla a vedly k implementaci kontroly teploty oleje a vnitřního kroužku ložiska při návrhu experimentálního zařízení.
- **Experimentální snímání mazací vrstvy prostřednictvím povrchových akustických vln** – V kapitole autor popisuje způsob experimentálního snímání mazacího filmu, což úzce souvisí s hlavním cílem této DisP. Autor také uvádí, že pro interpretaci naměřených výsledků byly použity odhady hranic přechodů mezi provozními stavy ložiska a informace o chování povrchových akustických vln v různých prostředích a na hranicích jejich přechodů. Analýza výsledků pak vyústila ve formulaci pěti tvrzení, jež jsou velice důležitá pro identifikaci klíčových oblastí pro pokračování dalšího výzkumu a pro možné uplatnění výsledků DisP v při praktickém nasazení u reálných technických systémů.
- **Závěr** – V závěru autor shrnuje, co bylo uděláno pro dosažení cílů DisP. Konstatuje, že v DisP navrženou metodu, založenou na statistickém vyhodnocování změn doby šíření akustické vlny, lze úspěšně použít pro hodnocení stavu mazací vrstvy a určení dominantního režimu mazání mezi valivým elementem a přidruženou dráhou ložiska při konkrétních provozních podmínkách ložiska.

Dosažení v DisP stanoveného cíle

Primárním cílem DisP bylo vyvinutí a ověření metody, jež by umožňovala sledovat vlastnosti mazacího filmu vytvářeného mezi valivými elementy a dráhou ložiska, prostřednictvím monitorování charakteristik šíření aktivně buzených povrchových akustických vln. Pro splnění tohoto cíle byla provedena řada studií, analýz, modelových simulací, návrhů zkušebních zařízení a praktických zkoušek. Vše, co bylo v průběhu řešení úkolu splněno, je velmi přehledně shrnuto v závěru DisP.

Cíle a sub-cíle disertační práce považují za splněné.

Úroveň rozboru současného stavu v DisP řešené problematiky

Rozbor současného stavu řešené problematiky je v navrhované DisP uveden srozumitelným a dle mého názoru vyčerpávajícím způsobem. Na základě rešerše autor formuluje dílčí závěry, které jsou východiskem pro stanovení cílů DisP. Podstatným výstupem z rešerše je, že nebyla nalezena žádná spolehlivá metoda monitoringu mazací vrstvy v ložiskách v průběhu jejich provozování. Byla však nalezena jedna metoda, která vykazuje citlivost na přítomnost maziva v ložisku. Metoda je založena na sledování přenosových charakteristik aktivně buzených povrchových akustických vln. Jelikož nebyl v průběhu rešerše nalezena žádná informace o tom, jak vyhodnocovat získaný výstupní signál a jaké parametry jej významně ovlivňují, stalo se toto hlavním cílem předkládané DisP.

Teoretický přínos disertační práce

Za hlavní přínos této DisP považuji to, že byla navržena a odladěna metoda umožňující sledovat mazací vrstvu ve valivých ložiskách. Metoda pak může být následně použita pro provádění dalšího a navazujícího výzkumu v dané oblasti. V práci uváděné závěry umožňují rozumným způsobem vysvětlit reakci snímaného signálu na změnu provozních podmínek ložiska. Přínosem je také to, že bylo postaveno experimentální zařízení umožňující monitorovat stav mazací vrstvy mezi valivým elementem a příslušnou dráhou ložiska a řízeně měnit a průběžně monitorovat některé další provozní stavy ložiska. Experimentální zařízení je možné využít pro další experimenty a výzkum v oblasti sledování stavu mazání ložisek.

Praktický přínos disertační práce

V DisP navrhovaná metoda, určená pro monitorování stavu mazací vrstvy v ložisku, umožňuje reálnou implementaci navrhovaných řešení přímo při navrhování skutečných technických systémů určených pro praktické používání.

Reálném nasazení v DisP navrženého systému pro monitorování mazací vrstvy na reálném zařízení by umožnilo včas odhalovat začínající poškození ložisek a tím následně plánovat potřebný servisní zásah s dostatečným předstihem tak, aby jeho dopady na ekonomiku provozu sledovaného zařízení byly minimalizovány.

Dalším přínosem je možnost udržování ložiska, po co nejdelší dobu, v režimu plně rozvinuté mazací vrstvy. Výsledkem tohoto opatření by mělo být prodloužení životnosti a spolehlivosti ložisek a souvisejících součástí v uvažovaném technickém systému.

Způsob, jak byly použité metody aplikovány

Pokud uvážíme, jako hlavní kritérium logický postupu vývoje metodiky pro sledování vlastností mazacího filmu vytvářeného mezi valivými elementy a dráhou ložiska, prostřednictvím monitorování charakteristik šíření aktivně buzených povrchových akustických vln, pak z tohoto úhlu pohledu je možné konstatovat, že zvolené metody (i experimentální) a navržené simulační prostředky, byly aplikovány vhodně a správně. Validace matematického modelu ložiska byla provedena srovnáním s výsledky získanými prostřednictvím nástroje KISSoft (implementována stejná norma výpočtu), přičemž vzhledem k nejasnosti implementace některých v DisP uváděných vlivů v KISSoft, byly tyto vlivy při validaci zanedbány. Validace modelu liniového EHL kontaktu byla provedena srovnáním s výpočtem minimální tloušťky mazacího filmu dle analytického vztahu publikovaného Downsonem-Higginsonem. Výše uvedené vzbuzuje jisté pochybnosti, zda validace byla provedena správným a průkazným způsobem. Pokud však uvážíme, že predikované hranice režimů provozního mazání velmi dobře korespondovaly s výsledky získanými experimentálním měřením, je možné konstatovat, že takto postavené matematické modely lze velmi dobře použít pro potřeby v DisP navrhované metodiky.

Prokázání odpovídajících znalostí v daném oboru

Domnívám se, že autor je velmi dobře zorientovaný v řešené problematice, což plyne i z jím již dříve získaných jak teoretických, tak i praktických poznatků a zkušeností.

V daném oboru prokázal jednoznačně odpovídající znalosti, které využil k návrhu v DisP uváděných vlastních řešení.

Výsledky své práce prezentoval na mezinárodních konferencích, recenzovaném periodiku a na základě výsledků DisP vznikl jeden patent.

Formální úroveň práce

DisP je systematicky zpracována. Její jazyková úroveň i grafické zpracování má velmi dobrou úroveň. V DisP jsou pouze drobné chyby jako např. v obr. 5.1 je úhlová rychlost otáčení klece označena ω_{PW} , ale v textu a rovnicích uváděných na str. 28 je označena ω_{TF} .

Dotazy k obhajobě

1. Považujete v DisP provedené způsoby validace matematických modelů ložiska a mazací vrstvy za dostatečně průkazné a postačující?
2. V DisP se zmiňujete o tom, že stále existuje poměrně značné riziko nesprávné interpretace výsledků vlivem některých jevů a jejich projevů, jež v této DisP nebyly zkoumány. Je zmiňovaný problém bariérou pro praktické využití výsledků této DisP, neboli jsou výsledky této DisP již nyní uplatnitelné pro monitoring mazací vrstvy na reálně provozovaném zařízení?

Závěrečné vyjádření

Na základě výše uvedeného doporučuji dle zákona č. 111/1998 Sb. §47 disertační práci **Jakuba Chmelaře** k obhajobě a v případě úspěšné obhajoby doporučuji udělit disertantovi akademický titul

„doktor“.

V Plzni dne 12. 12. 2019

doc. Ing. Václav Vaněk, Ph.D.