

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

Autor práce: Ing. Jakub Chmelař

Školitel: Prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D.

Školitel specialista: Ing. Karel Petr, Ph.D.

Motivace

Statistiky ukazují, že velká většina selhání ložisek je spojena s problémy mazání. Snímání mazací vrstvy v ložisku však běžně dostupnými metodami - např. vibrodiagnostikou, není zcela spolehlivé a vyžaduje použití pokročilých metod analýzy signálu. Přítomnost dostatečně rozvinuté mazací vrstvy je jedním ze základních předpokladů výpočtu životnosti. Její absence pak obvykle vede k jejich předčasným selháním. Téma sledování mazací vrstvy je tak velmi aktuální. Metoda využívající povrchové akustické vlny se na základě rešerše ukázala jako citlivá na změny stavu maziva v ložisku, doposud však nebylo publikováno její použití k přímému sledování mazací vrstvy, což bylo zvoleno jako hlavní cíl této práce.

Cíle práce

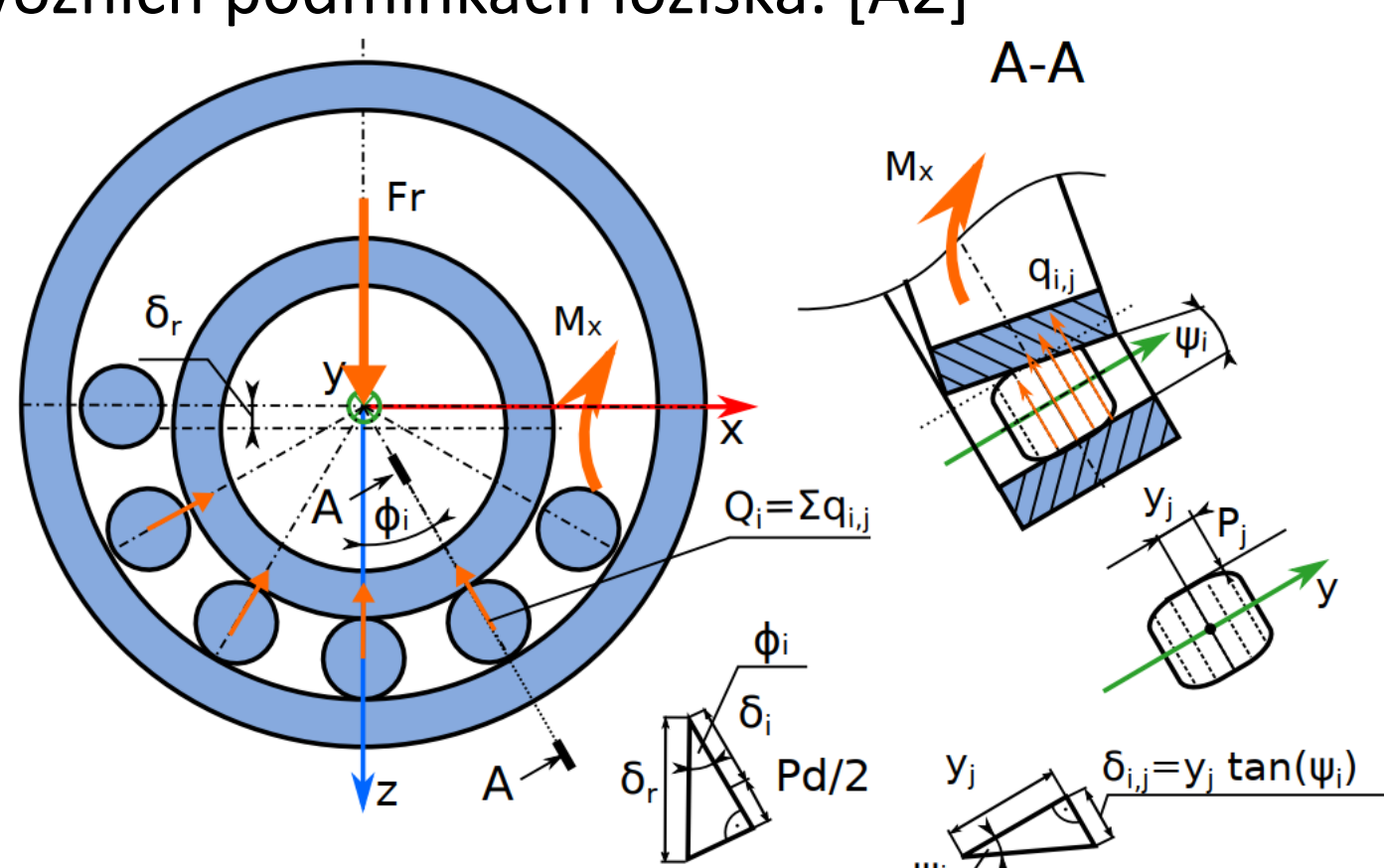
Hlavním cílem disertační práce je vyvinutí a ověření metody sledování mazacího filmu mezi valivými elementy a dráhou ložiska, prostřednictvím monitorování charakteristik šíření aktivně buzených povrchových akustických vln.

Dílič cíle jsou pak definovány v následujících bodech:

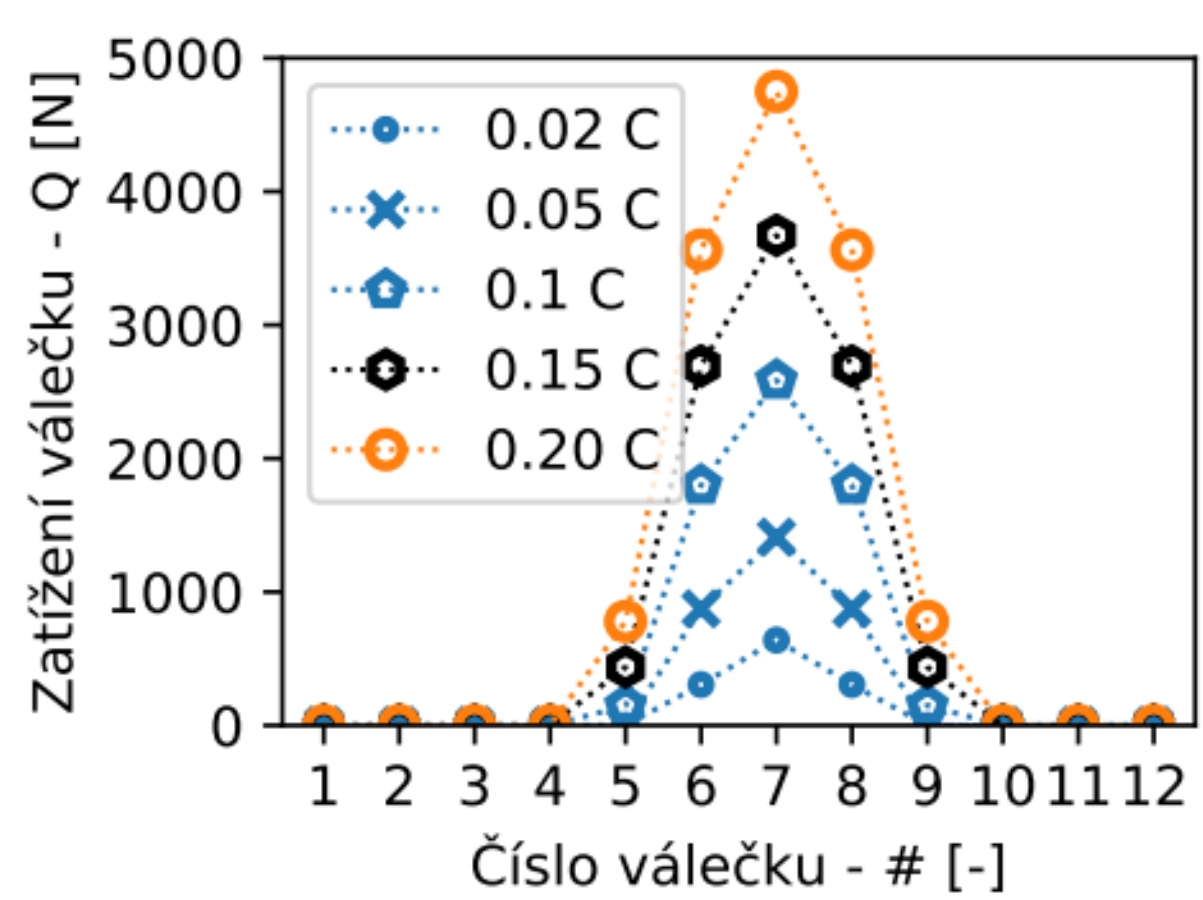
- Vytvořit propojený matematický model válečkového ložiska a mazaného elastohydrodynamického kontaktu, který na základě vstupních provozních, geometrických a reologických parametrů, umožní stanovit tloušťku mazací vrstvy mezi valivým elementem a dráhou. Model ložiska bude postavený na základech metody popsané v normě ISO/TS 16281. Detailní model mazací vrstvy bude řešen s využitím numerického řešení Reynoldsovi rovnice mazaného elastohydrodynamického kontaktu.
- S využitím propojených modelů ložiska a mazacího filmu, vytvořit mapu provozních mazacích režimů ložiska.
- Provést návrh a konstrukci testovacího stanoviště ložisek, které umožní provádět experimenty zaměřené na sledování mazací vrstvy s využitím metody snímání aktivně buzených povrchových akustických vln.
- Navrhnout a provést experimentální měření, s cílem snímání tvorby mazací vrstvy v ložisku za různých provozních podmínek ložiska, s využitím metody snímání aktivně buzených povrchových akustických vln.
- Navrhnout a definovat takové vyhodnocení signálu sledovaných charakteristik šíření povrchových akustických vln, které by umožňovalo identifikovat stav mazací vrstvy mezi valivým elementem a dráhou.
- Na základě porovnání vyhodnoceného signálu s predikcemi mazacích režimů a s publikovanými výsledky studií chování akustických vln během šíření, provést fyzikální interpretaci výsledků měření. Cílem interpretace je popis pozorovaných změn v signálu charakteristik šíření povrchových akustických vln v závislosti na stavu mazací vrstvy.

Model valivého ložiska a elastohydrodynamického mazaného kontaktu

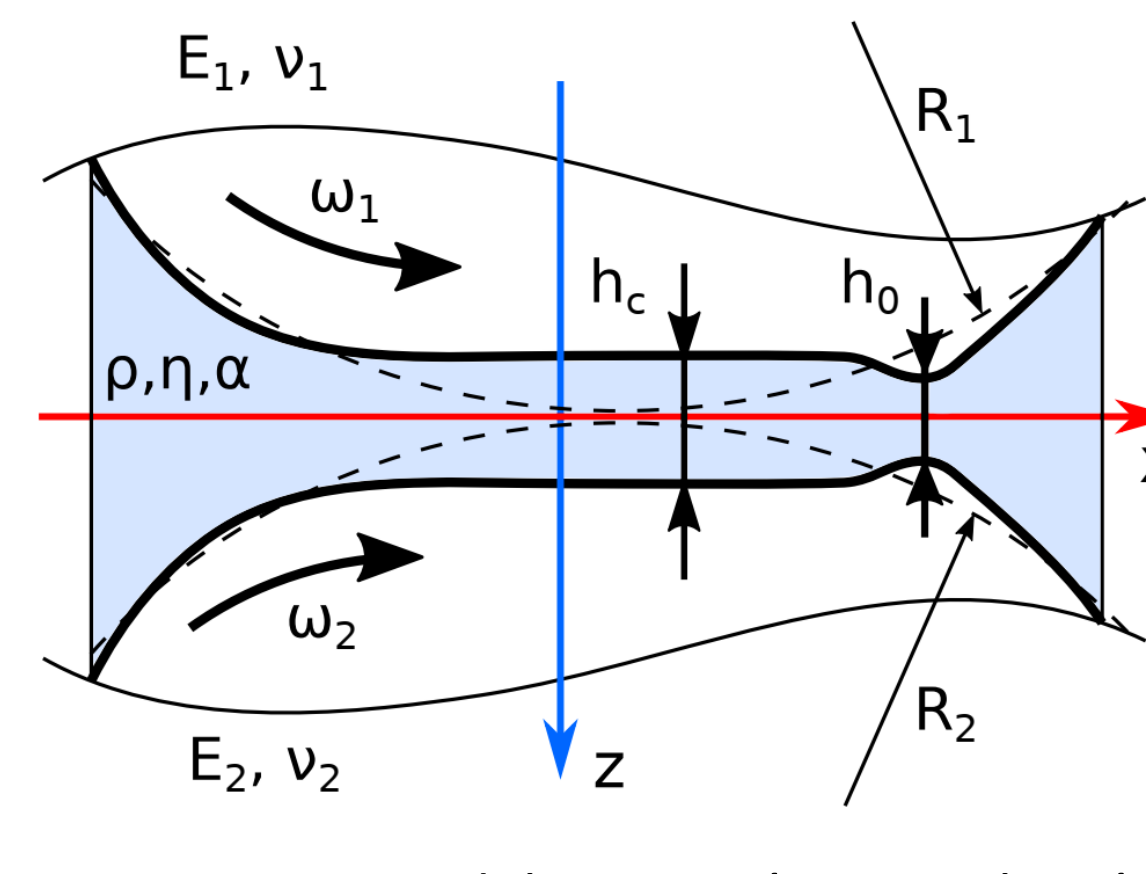
Vytvořen propojený model ložiska a elastohydrodynamické mazací vrstvy, umožňující modelovat tloušťku mazací vrstvy v kontaktu mezi valivým elementem a dráhou v závislosti na provozních podmínkách ložiska. [A2]



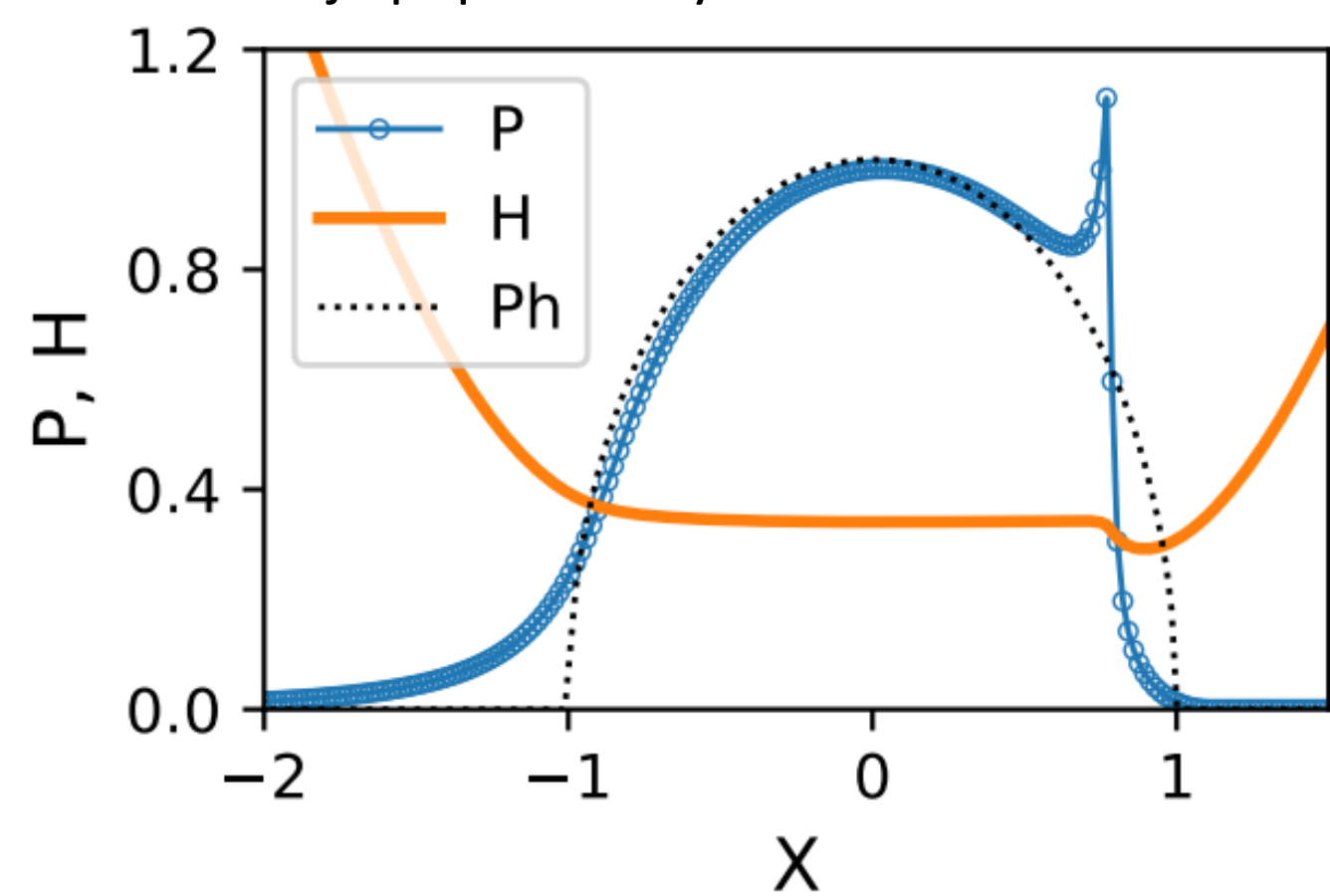
Parametry modelu ložiska dle normy ISO/TS 16281.



Výstup modelu: distribuce zatížení na jednotlivé elementy v závislosti na zatížení ložiska (vztaheno poměrem k dynamické únosnosti)



Parametry modelu mazací vrstvy, která je popsána Reynoldsovou rovnicí.



Výstup modelu: tlakové pole P a profil elastické deformace včetně tloušťky mazací vrstvy H v elastohydrodynamickém kontaktu mezi valivým elementem a dráhou. V bezrozměrných jednotkách

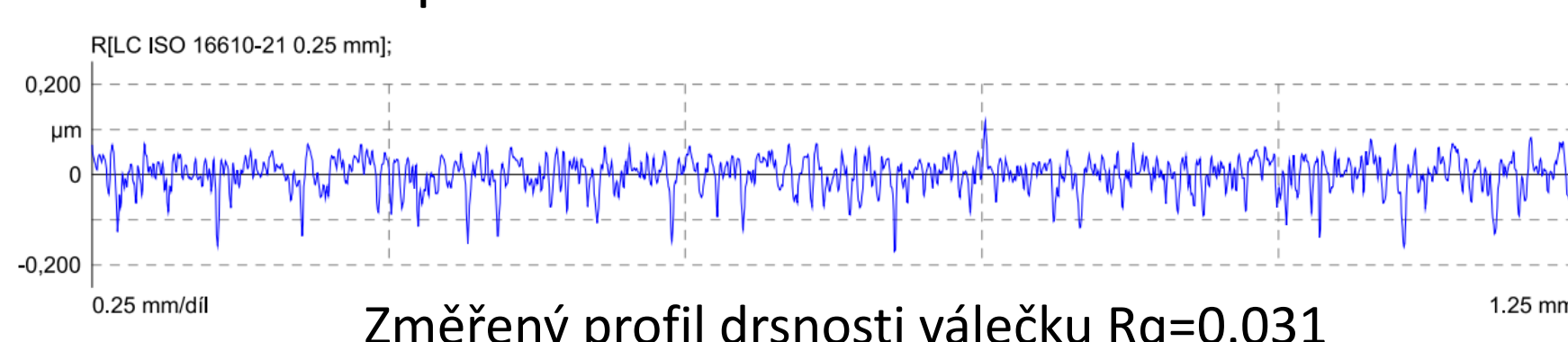
Mapa mazacích režimů ložiska v závislosti na provozních parametrech

S použitím změřených parametrů skutečného ložiska a matematických modelů byla vytvořena mapa provozních mazacích režimů ložiska. [A2]

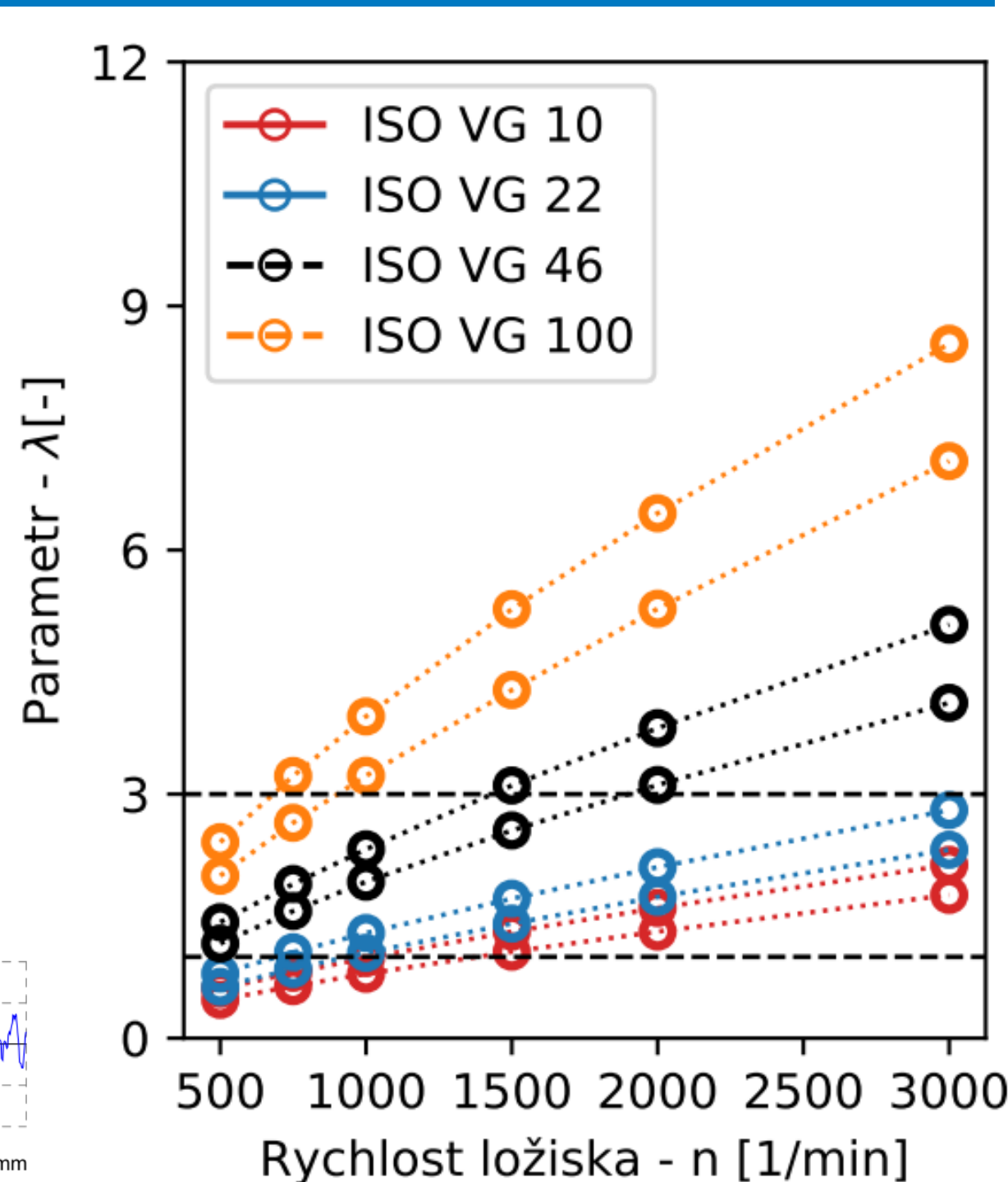
- $\lambda < 1$: Mezní režim mazání
- $1 < \lambda < 3$: Přečasný režim
- $\lambda > 3$: EHL režim mazání

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}}$$

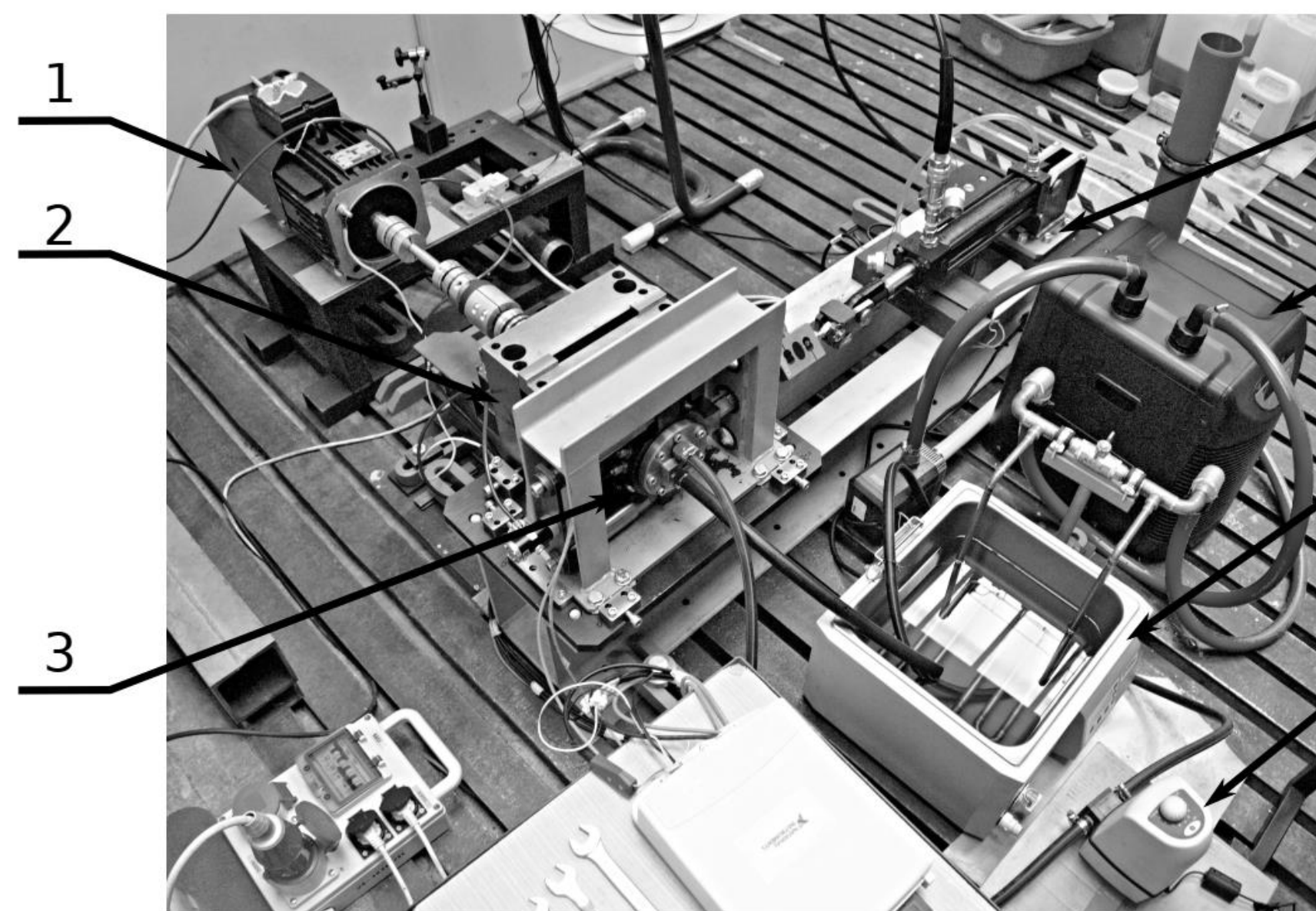
Provozní mazací režimy ložiska definovány prostřednictvím Tallianova vztahu, který vyjadřuje poměr mezi tloušťkou mazací vrstvy a RMS hodnoty drsnosti obou profile.



Změřený profil drsnosti válečku Rq=0.031



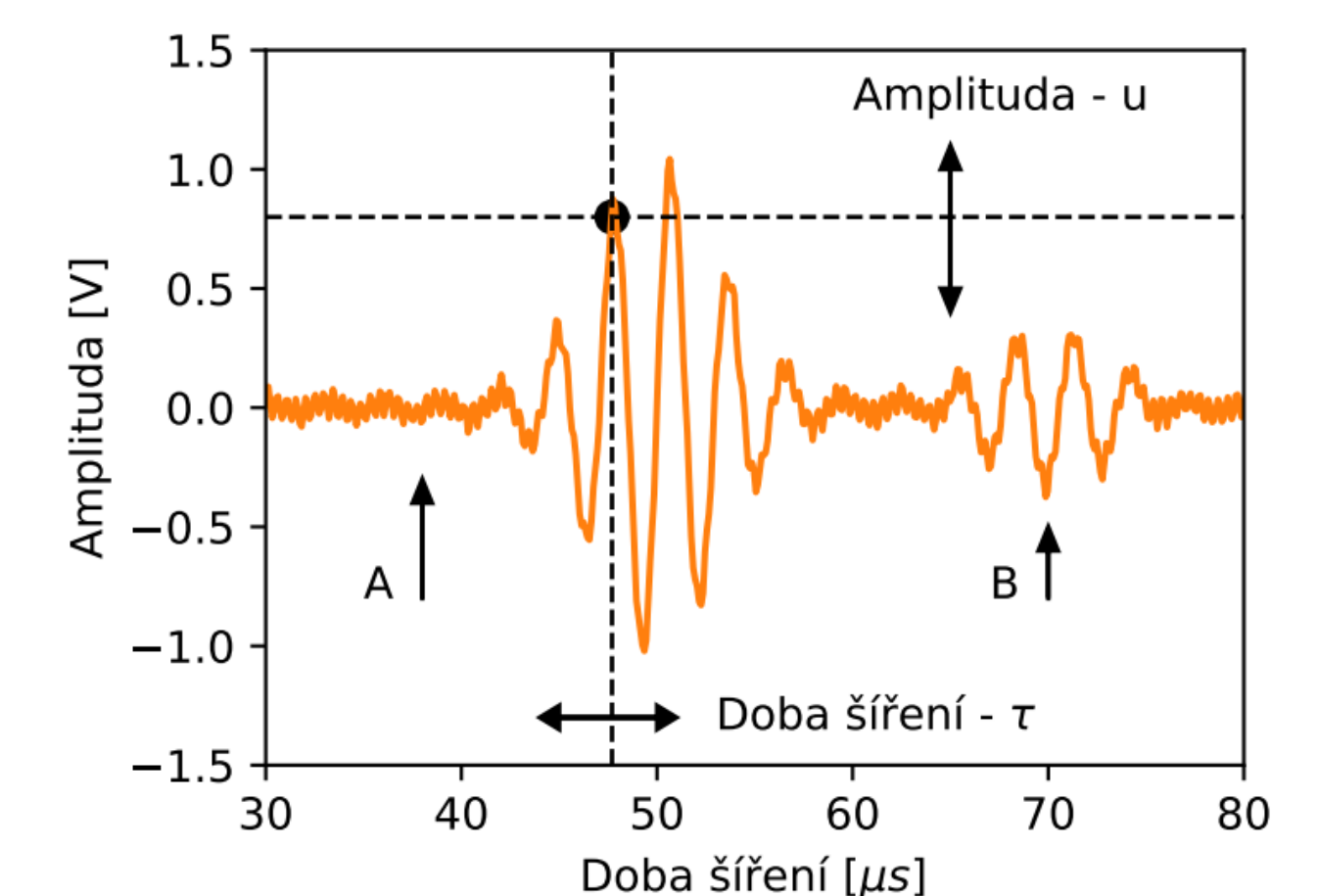
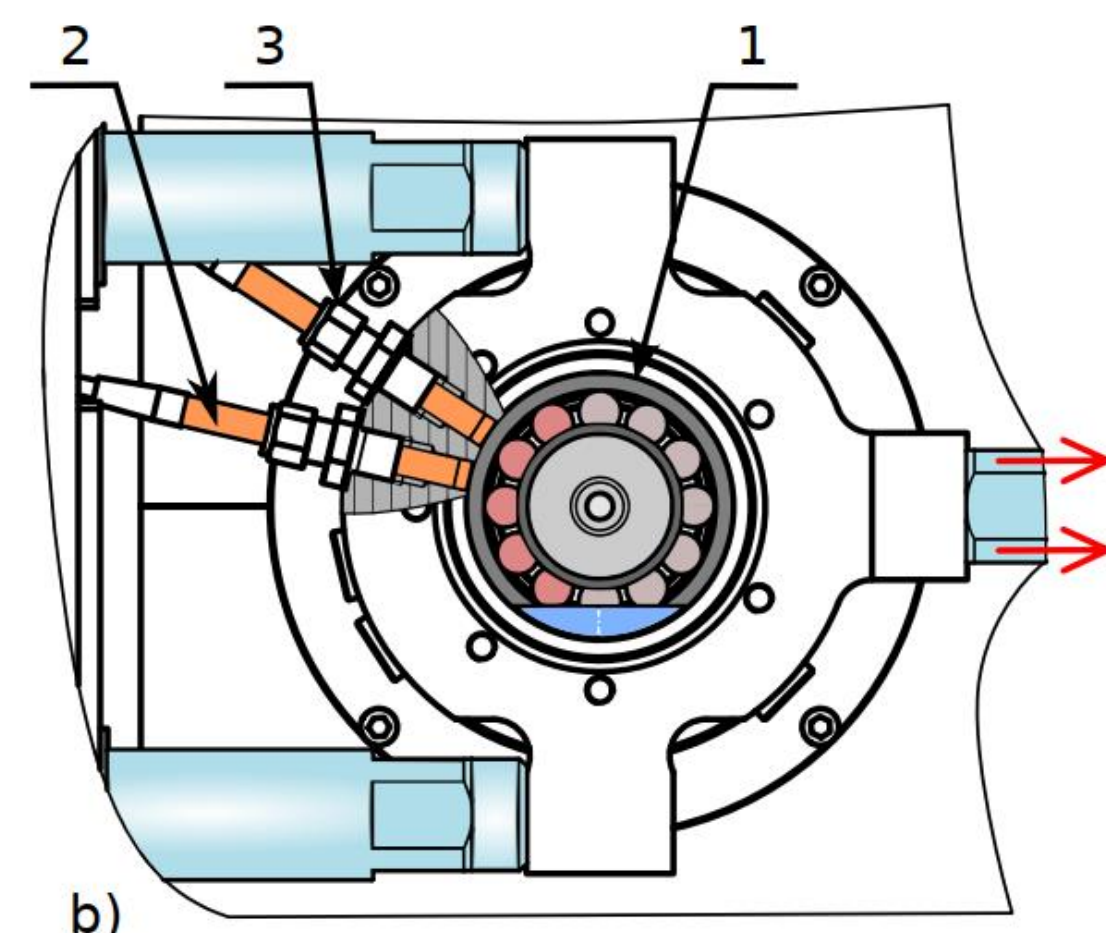
Testovací zařízení pro sledování mazací vrstvy ložisek



Vyvinuté testovací zařízení [A1] s patentově chráněným uložením testovaného ložiska [A4] a oběhový mazačím s přesným řízením teploty, umožňuje provádět experimenty zaměřené na sledování mazací vrstvy.

- 1-Hnací AC motor; 2-Ložiskové domky centrální hřídele;
- 3-Domek s testovaným ložiskem;
- 4-Systém radiálního zatížení ložiska; 5-Olejová lázeň s řízením teploty ohřevem; 6-Membránové čerpadlo; 7- Systém chlazení oleje

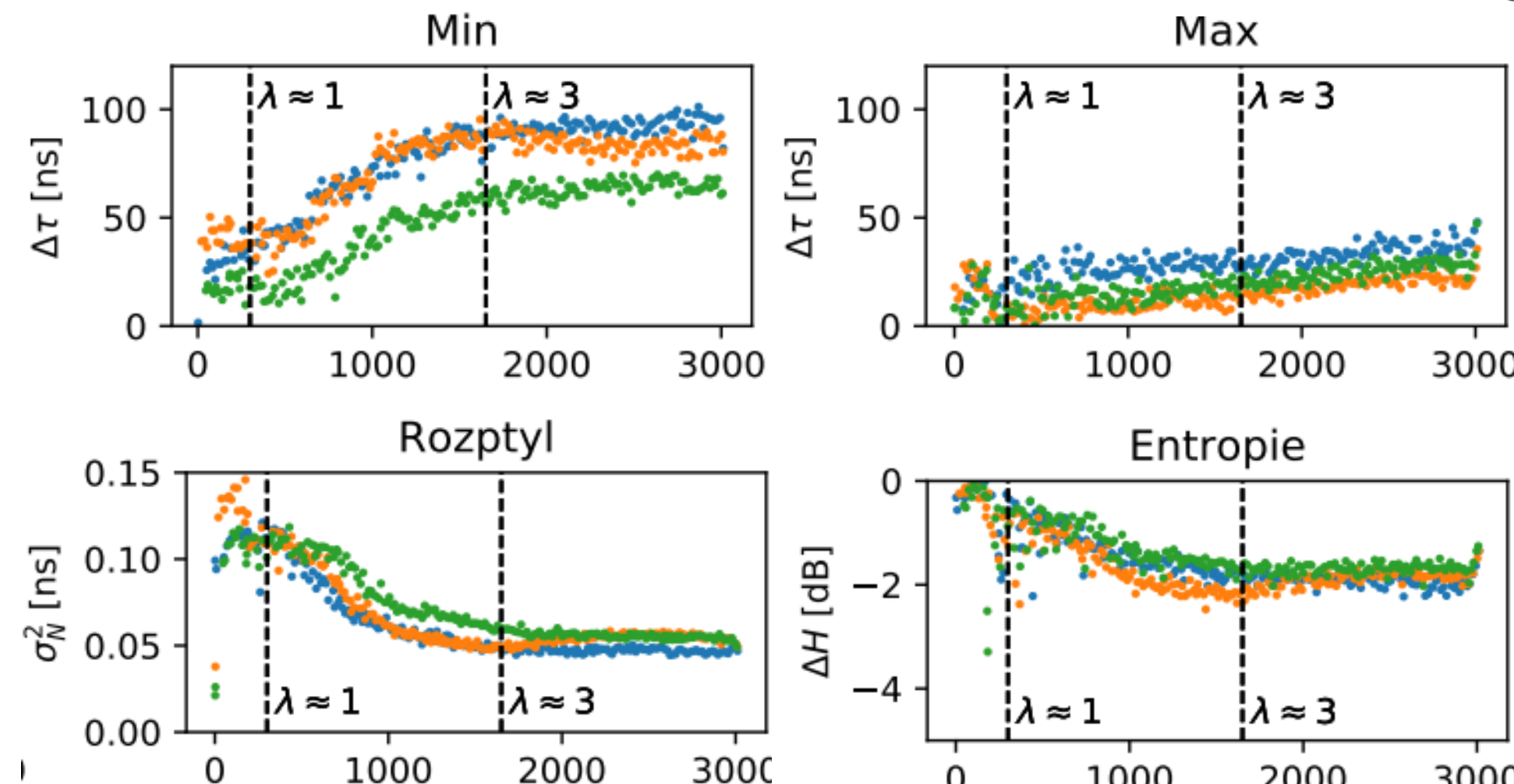
Snímání mazacího filmu prostřednictvím povrchových akustických vln



b)

Použitá metoda je založena na aktivním buzení a snímání povrchových akustických vln – tzv. Lambda a Rayleigho vln. Ty jsou buzeny a snímány na vnějším kroužku ložiska prostřednictvím páru piezoelektrických elementů, jak ukazuje obrázek nahoře vlevo, odkaz 2 a 3. Buzení probíhá periodicky ve formě amplitudově modulované vlny dle obrázku nahoře vpravo.

Díky specifickým vlastnostem Lambda vln pak přechod elementů mezi snímači na vnitřní straně kroužku vyvolá změny v charakteristikách šíření vlny snímání na vnější straně vnějšího kroužku ložiska. Tyto změny je pak možné vztáhnout k dějům odehrávajícím se v kontaktu. Sledovanými charakteristikami jsou dle obrázku nahoře vpravo: amplituda a doba šíření vlny odečítané ve zvoleném maximu signálu.



Nahoře je ukázán časový záznam signálu doby šíření akustické vlny na 4 rychlostních hladinách, během experimentu prováděného za podmínek kontrolované teploty oleje VG 46 a ložiska. Vlevo je pak ukázán tento signál vyhodnocený prostřednictvím statistických charakteristik minimální a maximální hodnoty, rozptylu a entropie v závislosti na rychlosti.

Patrná je shoda změny chování minimální hodnoty signálu (min) s přechodem ložiska do EHL režimu ($\lambda > 3$), predikovaným prostřednictvím matematických modelů. Minimální hodnota signálu byla na základě cílených testů přisouzena stavu, kdy se nachází valivý element mezi emitorem a senzorem. mazací vrstvou. Maximální stavu, pak když se vlny šíří bez interakce s valivým elementem. Změny doby šíření, respektive minimální hodnoty, jsou způsobeny transformací povrchových vln do pomalejších módů při jejich interakci s mazací vrstvou v kontaktu. Změna citlivosti při překročení $\lambda \approx 3$ je pak způsobena plným oddělením valivého elementu od dráhy elastohydrodynamickou mazací vrstvou, kdy se již veškerá energie šíří prostřednictvím těchto pomalejších módů. Uvedená tvrzení popisující znaky v signálu, díky kterým je možné snímat stav mazací vrstvy jsou podporována podobnou shodou s predikcí u dalších testovaných viskozit olejů VG 22 a VG 100 a analýzou signálu kontrolního měření prováděného s vyčištěným ložiskem. [A3]

Popsaná metoda vyhodnocení signálu doby šíření aktivně buzené akustické vlny umožňuje provést přímé snímání a hodnocení stavu mazací vrstvy u ložisek, což doposud nebylo prakticky možné. Tím byly splněny všechny vytyčené cíle. Otevřeným problémem popsané metody je pak stále přesnost interpretace dat v provozu bez předchozí znalosti stavu ložiska. [A3]

Hlavní publikace autora k tématu práce

[A1] Chmelař, J.; Mossoczy, P.; Dinybyl, V.: Bearing Test Rig: Setting Up and Lesson Learnt. In Proceedings of the ICMD 2018, University of Zilina. Faculty of Mechanical Engineering, Springer International Publishing, 2020, ISBN 978-3-030-33145-0, str. V přípravě.

[A2] Chmelař, J.; Petr, K.; Mikes, P.; Dinybyl, V.: CYLINDRICAL ROLLER BEARING LUBRICATION REGIMES ANALYSIS AT LOW SPEED AND PURE RADIAL LOAD. Acta Polytechnica, ročník 59, č. 3, jul 2019: s. 272–282, doi:10.14311/ap.2019.59.0272.

[A3] Chmelař, J.; Petr, K.; Mossoczy, P.; Dinybyl, V.: Experimental study of lubrication film monitoring in a roller bearing by utilization of surface acoustic waves. Tribology International, 141, January 2020, doi:10.1016/j.triboint.2019.105908

[A4] České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní: Zařízení pro testování provozních parametrů valivých a kluzných ložisek. Původci: Dinybyl, V., Chmelař, J. Česká republika. Patentový spis: CZ307380B6. Datum 11.7.2018