



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



Ústav konstruování a částí strojů

Testování kluzných ložisek

Testing of plain bearings

Diplomová práce

Studijní program: (N2301) Strojní inženýrství
Studijní obor: (2301T047) Dopravní, letadlová a transportní technika
Vedoucí práce: Ing. Jiří Mrázek, Ph.D.

Bc. Jakub Hrubý

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hrubý** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **379960**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Testování kluzných ložisek.

Název diplomové práce anglicky:

Testing of Plain Bearings

Pokyny pro vypracování:

Proveďte experimentální ověření provozních parametrů kluzných ložisek na laboratorním standu. Vyhodnoťte výsledky experimentu vybraných vzorků. Proveďte koncepční návrh laboratorního standu pro testování radiálně-axiálních kluzných ložisek. Na navržené řešení zpracujte metodiku experimentálního měření. Stručná osnova zadání: 1. Řešení metodiky testování kluzných ložisek 2. Návrh metodiky experimentu 3. Experimentální měření provozních vlastností ložisek 4. Vyhodnocení experimentu 5. Koncepční návrh variant uspořádání radiálně-axiálního stanoviště 6. Řešení konstrukce včetně nezbytných návrhových a kontrolních výpočtů. 7. Detailní zpracování 3D modelu navržené konstrukce 8. Návrh metodiky radiálně-axiálního standu

Seznam doporučené literatury:

ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Spojce a části spojovací. Praha: ČVUT, 2008. ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Mechanické převody. Praha: ČVUT, 2003. Drastík, F. a kolektiv: Strojnické tabulky pro konstrukci i dílnu. Montanex Ostrava, 1999 Kopáček J.: Pohony, VŠ skriptum, vydavatelství ČVUT, Praha 1985 Tedric A. Harris (Author) Rolling Bearing Analysis, 4th Edition 2000

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

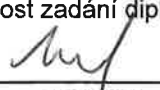
Ing. Jiří Mrázek Ph.D.

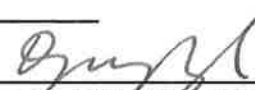
Jméno a pracoviště konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **11.04.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.06.2016**

Platnost zadání diplomové práce:


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

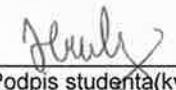

Podpis děkana(ky)

Neodevzdá-li student diplomovou práci v určeném termínu (tuto skutečnost písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána), stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat diplomovou práci podruhé.

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

22.4.2016
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Testování kluzných ložisek“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiří Mrázek, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 20. 6. 2016

Jakub Hrubý

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval své matce Ludmile a celému zbytku rodiny za podporu při studiu a při psaní této práce.

Děkuji vedoucímu práce Ing. Jiří Mrázek, Ph.D., za jeho rady, pečlivé připomínky a konzultace během celé práce.



Anotační list

Jméno autora: Bc. Jakub Hrubý

Název DP: Testování kluzných ložisek

Anglický název: Testing of plain bearings

Rok: 2016

Obor studia: (2301T047) Dopravní, letadlová a transportní technika

Ústav: Ústav konstruování a částí strojů

Vedoucí DP: Ing. Jiří Mrázek, Ph.D.

Bibliografické údaje: počet stran: 104

počet obrázků: 93

počet tabulek: 10

počet příloh: 3

Klíčová slova: kluzné pouzdro, kluzné ložisko, návrh, radiální, experimentální zařízení

Keywords: plain case, bearing, design, radial, experimental equipment

Anotace: Tato práce se zabývá návrhem zařízení pro testování dynamicky namáhaných, radiálních kluzných ložisek a experimentálním ověřením jejich základních provozních parametrů.

Abstract: This thesis deals with design of the device for testing dynamically loaded radial slide bearings and their experimental verification of their basic parameters.



OBSAH

Seznam zkratk	8
Úvod	9
1 Rešerše	12
1.1 Historie vývoje kluzných ložisek	12
1.2 Výzkum kluzných ložisek v ČR	14
1.3 Experimentální zařízení k. l. ve světě	20
1.4 Výhody a nevýhody kluzných ložisek	26
1.5 Základní parametry kluzných ložisek	27
1.6 Rozdělení kluzných ložisek	31
1.6.1 Rozdělení podle směru zatížení	31
1.6.2 Rozdělení podle průběhu síly	32
1.6.3 Rozdělení podle tvaru kluzné plochy	32
1.6.4 Rozdělení podle způsobu tření	34
1.6.5 Rozdělení podle způsobu mazání	35
1.7 Materiály kluzných ložisek	37
1.8 Opotřebení kluzných ložisek	38
1.8.1 Adhezivní opotřebení	39
1.8.2 Abrazivní opotřebení	39
1.8.3 Erozivní opotřebení	40
1.8.4 Únavové opotřebení	41
1.8.5 Kavitační opotřebení	41
1.8.6 Vibrační opotřebení	42
1.9 Výběr předních výrobců kluzných ložisek	43
1.10 Experimentální zkoušení ve strojírenství	44
1.10.1 Členění doby experimentu podle doby jeho trvání	44



1.10.2	Stavba experimentálních stanovišť.....	45
1.10.3	Metodika zkoušek.....	46
2	Návrh experimentálního měření pro testování kluzných ložisek	50
2.1	Konstrukční řešení testovacího zařízení	50
2.2	Výpočet průhybu hřídele testovacího zařízení	54
2.2.1	Výpočet průhybu hřídele dle Mohrova integrálu	55
2.2.2	Výpočet průhybu hřídele dle katalogu Maytec	57
2.2.3	Výpočet průhybu hřídele dle programu Abaqus.....	58
2.2.4	Souhrn výsledků průhybu hřídele pro jednotlivé výpočetní metody	59
2.3	Analýza vzájemné interakce hřídele a kluzného pouzdra.....	59
2.4	Vybraná kluzná pouzdra pro experimentální měření a valivá ložiska použitá k uložení hřídele test. zařízení	60
2.4.1	SKF slinutý bronz PSM 152 230	61
2.4.2	HENNLICH iglidur H tvar S HSM-1517-15.....	63
2.4.3	Elo Toman B10 - 1525KU	66
2.4.4	Valivá jednořadá ložiska SKF 61901 použitá v podporách hřídele	69
3	Metodika testování.....	72
3.1	Vypracování teoretických východisek problému.....	72
3.2	Určení cílů měření	74
3.3	Stanovení typu a počtu potřebných senzorů	74
3.3.1	Snímač síly HBM S2.....	74
3.3.2	Termočlánek typu K.....	80
3.4	Navržení způsobu dosažení provozních podmínek.....	80
3.5	Snímání a archivace dat.....	81
3.6	Navržení kritérií hodnocení přenosu výkonu	82
3.7	Stanovení způsobu řízení experimentu a zajištění proti havárii	83
3.8	Navržení sledu jednotlivých kroků při měření	83



3.9	Navržení vhodného systému záznamů o průběhu měření	84
3.10	Navržení způsobu zpracování naměřených dat	84
3.11	Zkušební stanoviště	85
4	Vyhodnocení experimentu	86
4.1	Vyhodnocení experimentu kluzného ložiska Elo Toman	86
4.2	Vyhodnocení experimentu kluzného ložiska SKF	89
4.3	Vyhodnocení experimentu kluzného ložiska Hennlich	91
4.4	Porovnání kluzných ložisek při stejných provozních podmínkách	93
4.5	Porovnání naměřených provozních parametrů s parametry udávanými výrobcí kluzných ložisek	94
5	Koncepční návrh zařízení pro testování radiálně axiálních kluzných ložisek	95
Závěr		96
Seznam použité literatury		97
Seznam obrázků		99
Seznam tabulek		103
Seznam příloh		104



Seznam zkratek

M_{FS}	měřený moment [N.mm]
M_t	třecí moment [N.mm]
F_n	normálová síla [N]
F_t	třecí síla [N]
F_s	měřená síla snímačem síly [N]
μ	součinitel tření [-]
v	kluzná rychlost [m/s]
P	skutečný tlak [N.mm ⁻²]
P_D	dovolený maximální tlak [N.mm ⁻²]
S	průmět plochy kluzného pouzdra [mm ²]
r	poloměr kluzného pouzdra [mm]
d	vnitřní průměr kluzného pouzdra [mm]
d_h	průměr hřídele [mm]
d_k	vnitřní průměr kuličkového ložiska [mm]
D	vnější poloměr kluzného pouzdra [mm]
c	základní dynamická únosnost ložiska [N]
n	otáčky [min ⁻¹]
p	exponent dle typu ložiska [-]
L_{10h}	trvanlivost ložiska [hod.]
L_{10}	trvanlivost ložiska [milony otáček]
E	modul pružnosti [N.mm ⁻²]
J	kvadratický moment [mm ⁴]
R_a	reakční síla v místě A [N]
R_b	reakční síla v místě B [N]
v_c	posuv v bodě C [mm]
$M_o(x)$	ohybový moment od zatížení [N.mm]
$m_o(x)$	ohybový moment od jednotkové síly [N.mm]
m	délka k.l. uvažovaná při výpočtu průhybu hřídele [mm]
a	vzdálenost a [mm]
x	souřadnice z bodu A [mm]
$\bar{x}$	souřadnice z bodu B [mm]



f posuv [mm]
 L vzdálenost L [mm]



Úvod

Kluzná ložiska tvoří zhruba jednu třetinu celosvětové výroby všech ložisek. S rostoucím vývojem kluzných materiálů však jejich uplatnění v řadě aplikací stále roste. Tyto ložiska nacházejí uplatnění především tam, kde lze využít jejich funkční výhody spočívající především v nízké ceně a kompaktních rozměrech, případně malých nároků na provozní údržbu. Stále častěji dochází k nahrazování běžných, konvenčních valivých ložisek právě ložisky kluznými, protože jejich použití může přinést jak technologické, tak i konkurenční výhody. S rostoucí poptávkou po kluzných ložiscích rostou i požadavky na jejich vzájemnou porovnatelnost.

Cílem této práce je zpracovat metodiku a provést experimentální ověření základních provozních parametrů vybraných kluzných ložisek na měřicím zařízení a následně vyhodnotit výsledky tohoto testu. Hlavním motivem práce je vybudovat experimentální stanoviště a zpracovat metodiku experimentu, která umožní vzájemné porovnání nízkonákladových, bezúdržbových kluzných ložisek od různých výrobců z odlišných materiálů.

Toto zařízení je vyrobeno ústavem konstruování a částí strojů FS. Experimentální stanoviště je navrženo s ohledem na požadavky zadavatele, kterými jsou především nízké výrobní náklady, jednoduchost konstrukce, možnost jednoduché manipulace, použití pohonu a měřicích čidel, které jsou k dispozici v laboratoři ústavu konstruování. Na navržené experimentální zařízení je zpracována metodika měření. Součástí této práce je dále detailní zpracování 3D modelu navržené konstrukce spolu s výrobní výkresovou dokumentací a 2D návrhovou sestavou.



1 Rešerše

Tato rešerše se věnuje shrnutí základních poznatků o kluzných ložiscích, mezi které patří výhody a nevýhody při jejich aplikaci, základní provozní parametry, rozdělení dle jednotlivých kritérií, materiály kluzných ložisek, jejich opotřebení a výběr výrobců kluzných ložisek.

S ohledem na cíle této práce je rešerše věnována i výzkumu kluzných ložisek v ČR, experimentálnímu výzkumu kluzných ložisek ve světě a experimentálnímu zkoušení ve strojírenství, kde se věnují především členění doby experimentů podle jejich trvání, stavbě experimentálních stanovišť a metodice zkoušek.

1.1 Historie vývoje kluzných ložisek [5], [6], [7]

Principu funkce kluzných ložisek, jako je známe dnes, využívali již ve starém Egyptě. Tato kluzná ložiska se začala vyvíjet a stále více používat hlavně díky jejich studii a experimentálnímu testování. Vývoj vedl od jednoduchých kluzných ložisek, kde se nepoužíval žádný mazací film mezi třecími plochami ložiska a jejich uložení až po využití hydrodynamických jevů mazacího filmu.

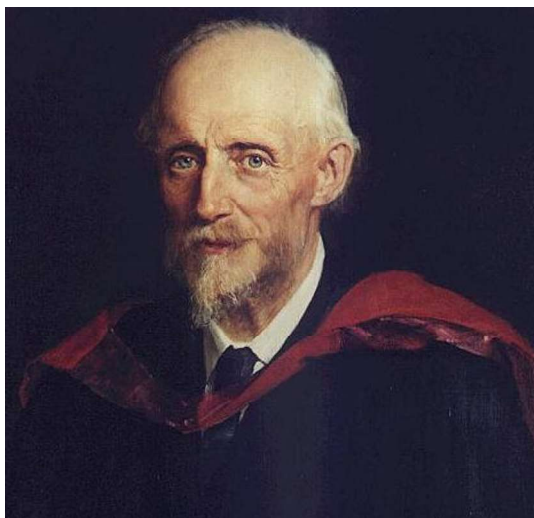
Koncem 19. století byla publikována práce popisující povahu fyzikálních jevů tvořících mazací film. V roce 1883 Beauchamp Tower pozoroval vytváření tlaku v olejovém filmu.



Obr. 1: Beauchamp Tower [7]



Další mezní krok v oblasti tribologie kluzných ložisek se stal hned o tři roky později, kdy Osborne Reynolds vysvětlil vytváření tlaku působením viskózních sil v konvergenní mezeře k. I..



Obr. 2: Osborne Reynolds [6]

První analytické řešení ztrát v hydrodynamickém ložisku publikoval Petroffem rovněž v roce 1883. Později bylo publikováno hned několik prací, které však neměly tak velký dopad na vývoj radiálních kluzných ložisek. Se zásadní revoluční změnou v konstrukci axiálních ložisek přišel až Kingsbury a Mitchell. Jejich změna vycházela z předpokladu Reynoldsovy teorie a vedla k rozdělení třecí plochy axiálních ložisek na více naklápěcích segmentů.

Významný vývoj rotačních strojů od roku 1880 vedl k stále vyšším nárokům na radiální kluzná pouzdra v oblasti jejich provozních parametrů, kterými se myslí obvodové rychlosti a měrné zatížení ložiska. Díky těmto nárokům docházelo k pokrokům u konstrukce radiálních ložisek, které nevznikly ani tolik na základě výpočtů a experimentálním zkoušení, ale spíše na základě zkušeností z provozu. Pokud existuje stabilní laminární proudění, tak Reynoldsova rovnice má pro změny tlaku v olejovém filmu jednoduchý fyzikální základ. Výpočet charakteristik radiálních ložisek však představoval poměrně velký problém, protože nebyl předem znám rozsah olejového filmu. V roce 1950 již existovala teorie, která poskytovala téměř shodné výsledky se skutečnými provozními charakteristikami radiálních ložisek. Určité odchylky však vznikaly u velkých ložisek a byly vysvětleny vznikem nelaminárního proudění.



Radiální ložiska našly své uplatnění v řadě strojů, kde ne vždycky vykazovaly dobré reakce na provozní situace. Dlouhodobým problémem bylo označeno to, že radiální ložiska značně ovlivňují vibrace strojů, a to jak při odezvě na poruchy tak i pokud jde o problémy stability. Problém byl zkoumán jak analyticky, tak i experimentálně, ale stále vznikaly problémy s oddělením vlivu ložisek a poddajnosti ložiskových stojanu. Základy dynamického výpočtu radiálních ložisek položil v r. 1964 J.W.Lund zavedením koeficientu tuhosti a útlumu používaných dosud. Později byly vypočtené koeficienty tuhosti a útlumu ověřovány experimentálně na několika pracovištích, z nichž patrně nejpropracovanějším zařízením navrženým prof. Glienicem disponovala universita v Karlsruhe. Izotermické řešení průtoku maziva ložiskovou mezerou bylo později nahrazeno termohydrodynamickým řešením s uvažováním změn viskozity maziva v ložiskové mezeře. U ložisek s naklápěcími segmenty bylo použito termo-elasto-hydrodynamické řešení, které kromě změn viskozity uvažuje také deformace kluzných ploch v důsledku teplotních gradientů a zatížení hydrodynamickým tlakem. U převážně dynamicky zatížených ložisek pístových strojů byly rovněž uvažovány změny geometrie ložiskové mezery, vyvolané deformací ojníc a ložiskových těles. V 60 až 80. letech minulého století proběhla bouřlivým vývojem rovněž ložiska mazaná plynem a o něco později rovněž magnetická ložiska. Současný vývoj směřuje k ložiskům mazaným přímo procesními médii, protože odstraněním ucpávek lze značně zjednodušit konstrukci a zmenšit rozměry strojů.

1.2 Výzkum kluzných ložisek v ČR [5]

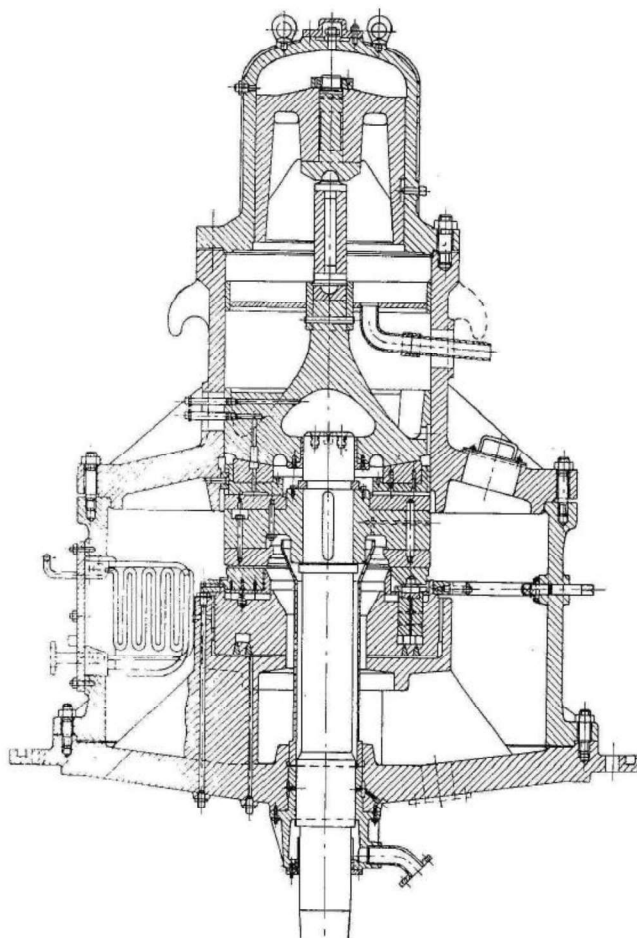
Po druhé světové válce v roce 1946 byl v Praze založen Výzkumný ústav tepelné techniky (VÚTT), který se věnoval také tribologii, tedy vědnímu oboru zabývající se kluznými ložisky v oblasti tření, mazání a opotřebení. Tento ústav byl rozmístěn hned na několika místech po Praze, což komplikovalo provoz a znesnadňovalo spolupráci mezi jednotlivými odbory. Při výstavbě výzkumného areálu v Běchovicích byly vybudovány prostory i pro VÚTT, které se do Běchovic postupně přestěhoval v roce 1968 již jako Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů (SVÚSS) Běchovice. V rámci reorganizace tohoto ústavu v 70. let byla problematika kluzných ložisek zařazena do oboru Mechaniky strojů a jejich částí jako samostatné oddělení, které mělo v době největšího rozkvětu více než 30 pracovníků. Zakladatel tohoto odboru byl Ing. J. Vinš. Zabýval se spíše experimentální stránkou výzkumu. Jeho



nástupce Ing. J. Nezval se soustředil na pozvednutí teoretické úrovně. SVÚSS byl složen z cca deseti výzkumných ústavů.

Ústav zabývající se třením, mazáním a opotřebením disponoval mimo kancelářských prostor i laboratorními zkušebnami vybavenými nejrůznějšími zkušebními standy, z nichž mezi nejzajímavější patří stand pro testování rychloběžných ložisek o průměru do 30 mm s maximálními otáčkami $72\,000\text{ min}^{-1}$. Tento stand je poháněný vysokofrekvenčním elektromotorem. Dále pak stand pro únavové zkoušky materiálů ložiskových výstelek.

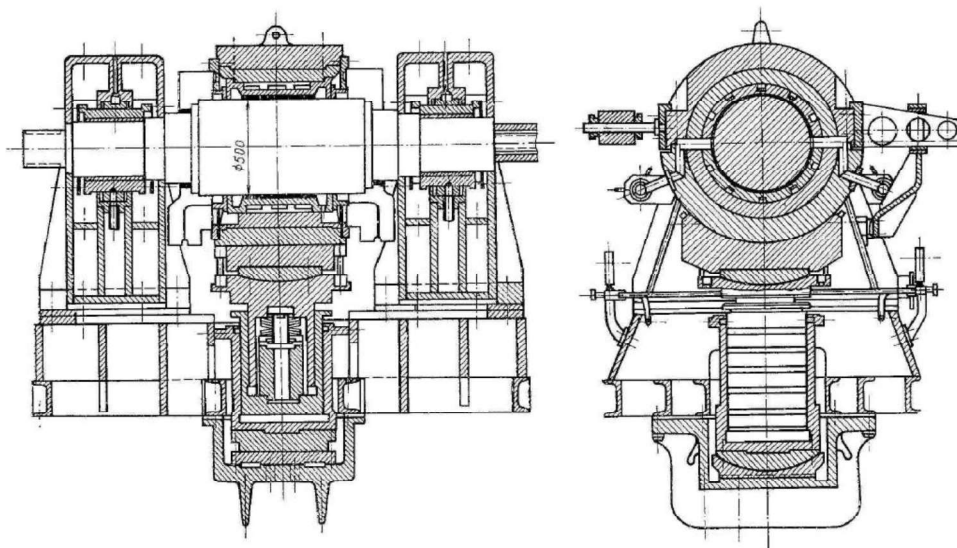
Zkoušení axiálních ložisek probíhalo na dvou testovacích zařízeních, z nichž měl jeden stand svislý hřídel viz. obrázek č. 3, který sloužil pro výzkum ložisek hydrogenerátorů a druhý vodorovný hřídel viz. obrázek č. 4, který sloužil pro výzkum ložisek parních turbín a turbokompresorů. Tato zařízení umožňovala zkoušení axiálních ložisek do průměru 650 mm při kluzné rychlosti převyšující až 200 m.s^{-1} při měrném zatížení až 1400 kN.



Obr. 3: Zkušební stand radiálních ložisek o průměru 500 mm [5]

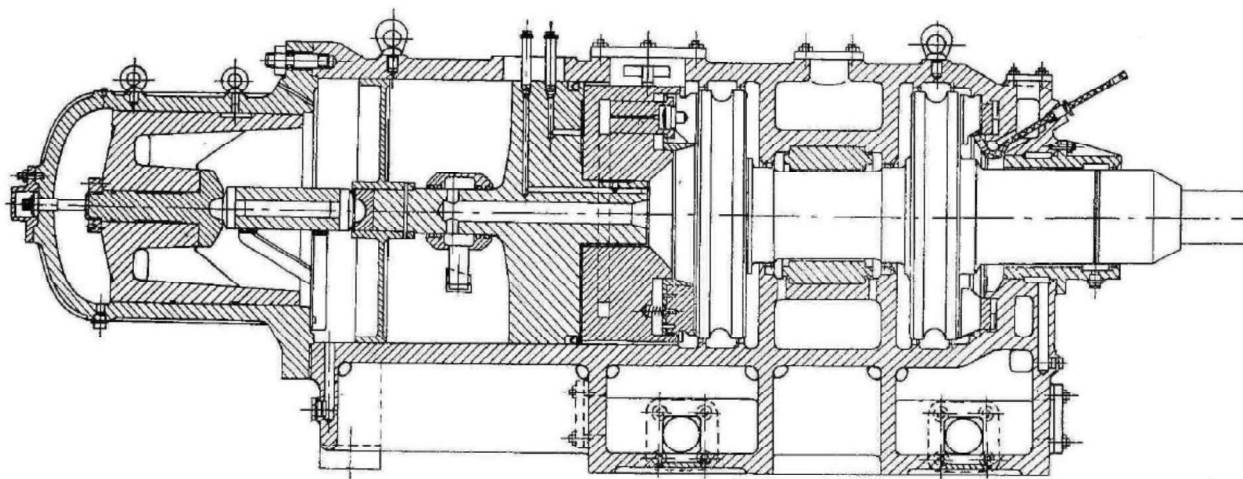


Obě zařízení byla poháněna stejnosměrnými elektromotory napájenými z polovodičové měničky, což umožňovalo plynulou změnu otáček prakticky od nuly. S ohledem na vysoké ztráty axiálních ložisek mělo zařízení s vodorovným hřídelem motor o výkonu cca 1,6 MW.



Obr. 4: Stend pro axiální ložiska se svislým hřídelem [5]

Tento obor se věnoval nejen testování axiálních kluzných ložisek, ale i testování kluzných ložisek radiálních, kdy zkušebna byla vybavena dvěma stendy pro tento typ ložisek. První byl určen pro ložiska do průměru 100 mm s otáčkami až $40\,000\text{ min}^{-1}$. Druhé zařízení pak sloužilo pro výzkum ložisek do průměru 500 mm s otáčkami maximálně 5000 min^{-1} viz. obrázek č. 5.

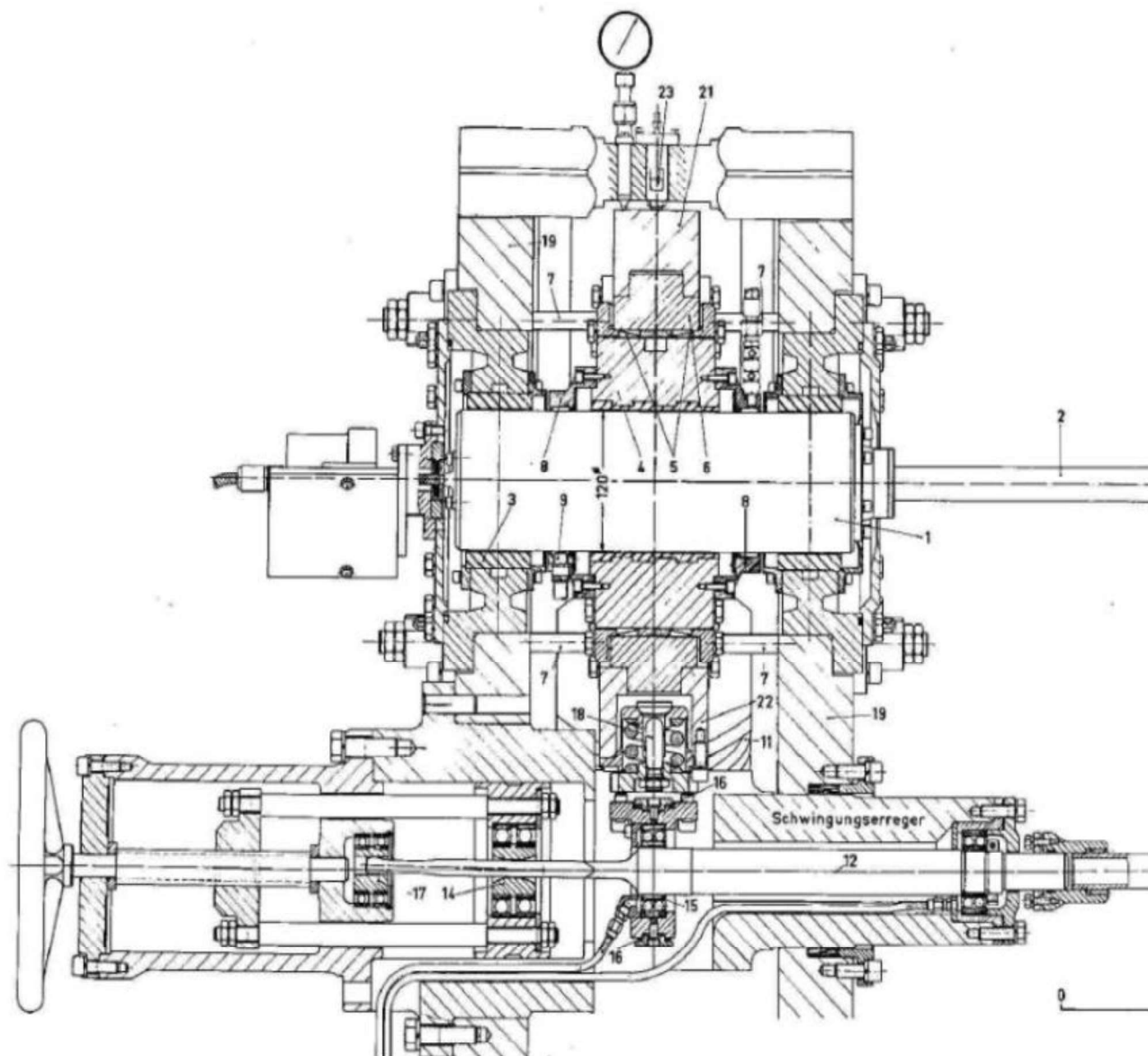


Obr. 5: Stend pro axiální ložiska s vodorovným hřídelem [5]

S rostoucími nároky na výrobní stroje a ostatní strojní zařízení rostla i potřeba získávat při testování kluzných ložisek používaných u těchto zařízení spolehlivější údaje o dynamických vlastnostech radiálních ložisek. Proto bylo nutné zkušební



stendy těmto požadavkům přizpůsobit. Typickým příkladem je zařízení pro menší ložiska, které vychází z stendu viz. obrázek č. 6, používaném na technické univerzitě v Karlsruhe na jihozápadě Německa blízko Německo Francouzských hranic.



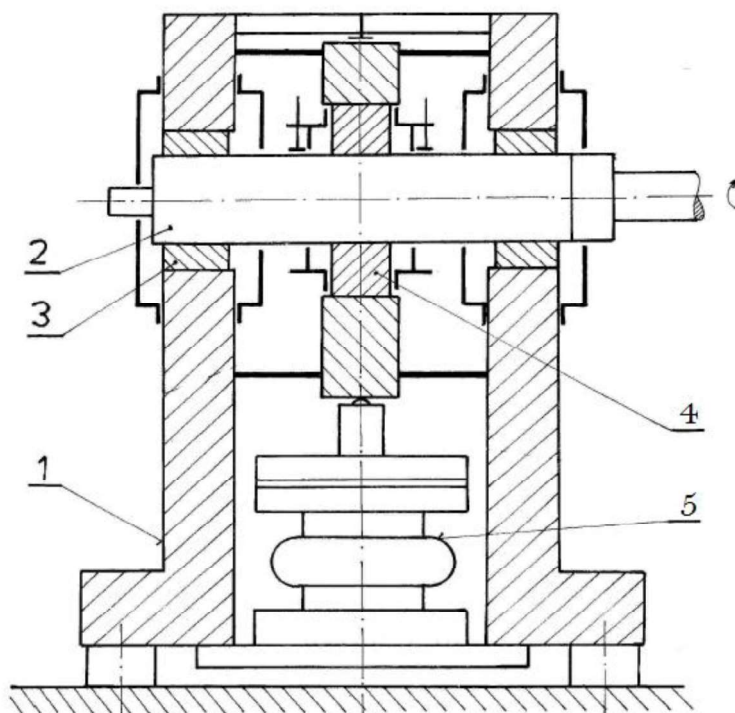
Obr. 6: Zkušební stend na technické univerzitě Karlsruhe [5]

Zařízení je složeno z těchto hlavních částí:

- Pozice 1 - Rám zařízení
- Pozice 2 - Zkušební hřídel
- Pozice 3 - Nosná ložiska
- Pozice 4 - Zkušební ložisko



- Pozice 5 - Pryžový vlnovec pro vyvolání statické síly



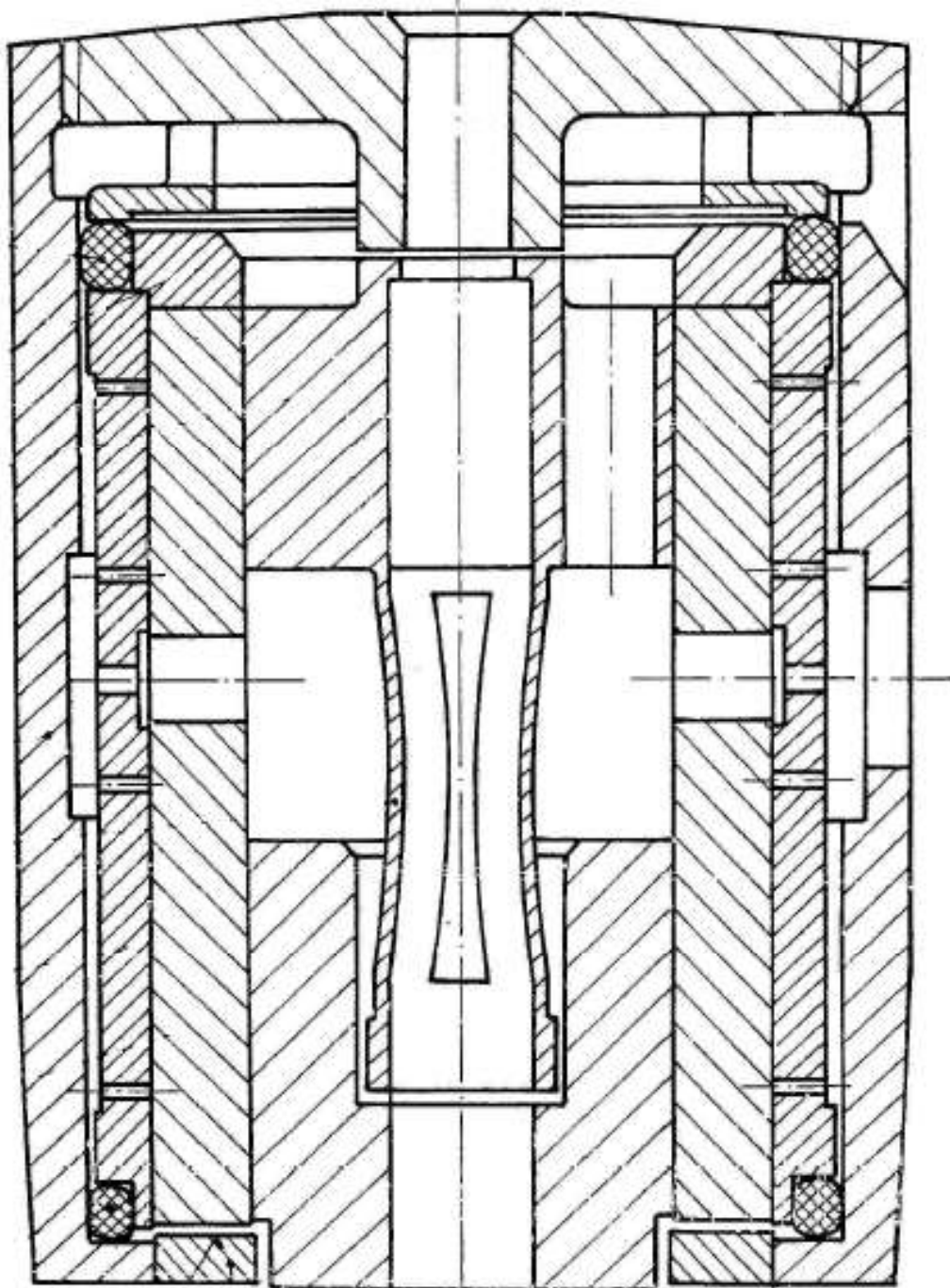
Obr. 7: Schéma zkušebního stendu SVÚSS pro ložiska o průměru 90 mm [5]

Pohon budičů však nebyl odvozen od pohonu zkušebního hřídele, ale byl zajištěn dvěma samostatnými vysokofrekvenčními motory s proměnnými otáčkami do 18.000 min^{-1} . Vzhledem k setrvačným silám byla používána maximální budicí frekvence 180 Hz . Stend byl vybaven snímači relativních výchylek zkušebního ložiska vzhledem k hřídeli a rovněž vzhledem k rámu, protože při vyhodnocení prvku tuhosti a útlumu bylo nutno uvažovat i tuhost nosných ložisek. Dynamická budicí síla byla pomocí tenzometrického členu snímána současně s výchylkami ložiska, aby mohly být vyhodnoceny jak jejich amplitudy, tzv. fázové posuvy, které jsou potřebné pro vyhodnocení koeficientu tuhosti a útlumu. Jednotlivé prvky tuhostí a útlumové matice byly následně vyhodnoceny prostřednictvím počítačového programu.

Tento stend sloužil k výzkumu ložisek s pevnou geometrií a ložisek s naklápěcími segmenty. U těchto ložisek byla zkoumána závislost prvku tuhosti a útlumu na budicí frekvenci. Nejprínosnějšími výsledky tohoto měření však byla možnost posoudit přesnost výpočetních metod radiálních ložisek vypracovaných v SVÚSS a jejich prostřednictvím i věrohodnost dynamických výpočtu rotoru, zejména kritických otáček a meze stability. Stend byl použit také pro měření průběhu hydrodynamického tlaku v olejovém filmu pomocí rotujícího snímače.



SVÚSS se angažoval i při teoretickém a experimentálním výzkumu hydrostatických a plynem mazaných ložisek. V oblasti plynových ložisek bylo dosaženo významného úspěchu vývojem aerodynamického uložení rotoru expanzní turbíny pro zkapalňování helia obrázek č. 8, která měla provozní otáčky až 300.000 min^{-1} . Velice úspěšným vývojem pro tento ústav byla zubní vrtačka s rotorem uloženým v aerostatických ložiskách a s pohonem vzduchovou turbinkou, která dosahovala otáček až 750.000 min^{-1} a byla úspěšně klinicky odzkoušena.



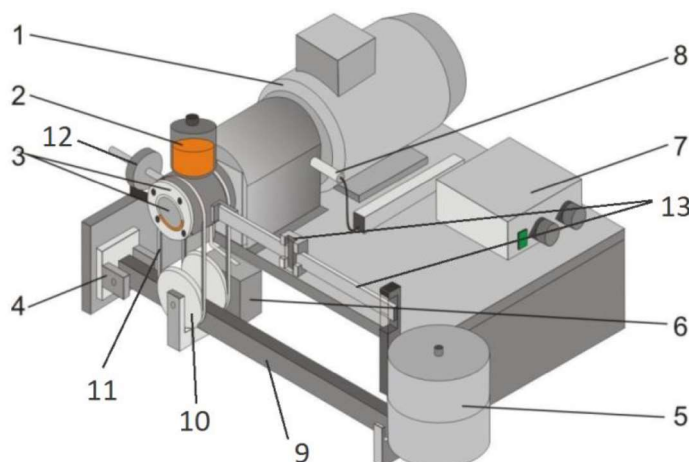
Obr. 8: Zubní vrtačka s ložisky mazanými plynem [5]



1.3 Experimentální zařízení k. I. ve světě [8], [9], [11], [12]

Zařízením s vyvažovacím systémem pro určení momentu na kluzném ložisku, tedy určení třecího momentu se zabývala firma G.U.N.T. Gerätebau GmbH, která sídlí v Hamburgu. Jde o firmu, která se zabývá výrobou experimentálních zařízení určených pro výuku studentů na středních a vysokých školách. Zařízení se skládá z těchto částí:

- Pozice 1 - Třífázový motor
- Pozice 2 - Olejová vana
- Pozice 3 - Hřídel a kluzné ložisko
- Pozice 4 - Čep pákového mechanismu
- Pozice 5 - Závaží
- Pozice 6 - Sběrná olejová nádoba
- Pozice 7 - Frekvenční měnič
- Pozice 8 - Otáčkoměr
- Pozice 9 - Páka
- Pozice 10 - Kladky
- Pozice 11 - Řemen
- Pozice 12 - Stacionární závaží
- Pozice 13 - Pohyblivé závaží a ukazatel polohy



Obr. 9: Zařízení od firmy G.U.N.T. Gerätebau GmbH [8]

Testované kluzné ložisko je letmo nasunuto na hřídel, která je uložena v dvou valivých ložiscích. Tato hřídel je spojena s třífázovým AC motorem, který na ní přivádí otáčky. Tyto otáčky lze regulovat frekvenčním měničem a měřit pomocí



otáčkoměru. Do letmo uloženého ložiska je přiváděno mazivo z nádoby, která je umístěna nad ním. Přebytečné mazivo je odváděno do sběrné nádoby pod testovaným ložiskem. Zatěžování ložiska v radiálním směru je vytvářeno pomocí závaží přes pákový mechanismus, který je spojený s tělesem testovaného ložiska pomocí řemenů. K tomuto tělesu je připevněno rameno, na kterém je pevné, stacionární závaží a na druhé straně od ložiska závaží pohyblivé. Když se hřídel netočí, je pohyblivé závaží ve výchozí neboli nulové poloze. Při rotaci hřídele v zatíženém ložisku dochází k nerovnovážnému stavu závaží. Hmotnost pohyblivého závaží vynásobená hodnotou posunutí určuje moment, který je stejně velký, ale opačný, než je moment vyvozený třecí silou. Z rovnováhy těchto momentů můžeme určit součinitel tření testovaného ložiska.

Dalším experimentálním zařízením, pro testování kluzných ložisek je stend pro testování kluzných ložisek z kompozitních materiálů. Toto zařízení bylo vyvinuto na Ústavu materiálových věd a materiálového inženýrství na Universitě Ghent v Belgickém Ghentu.

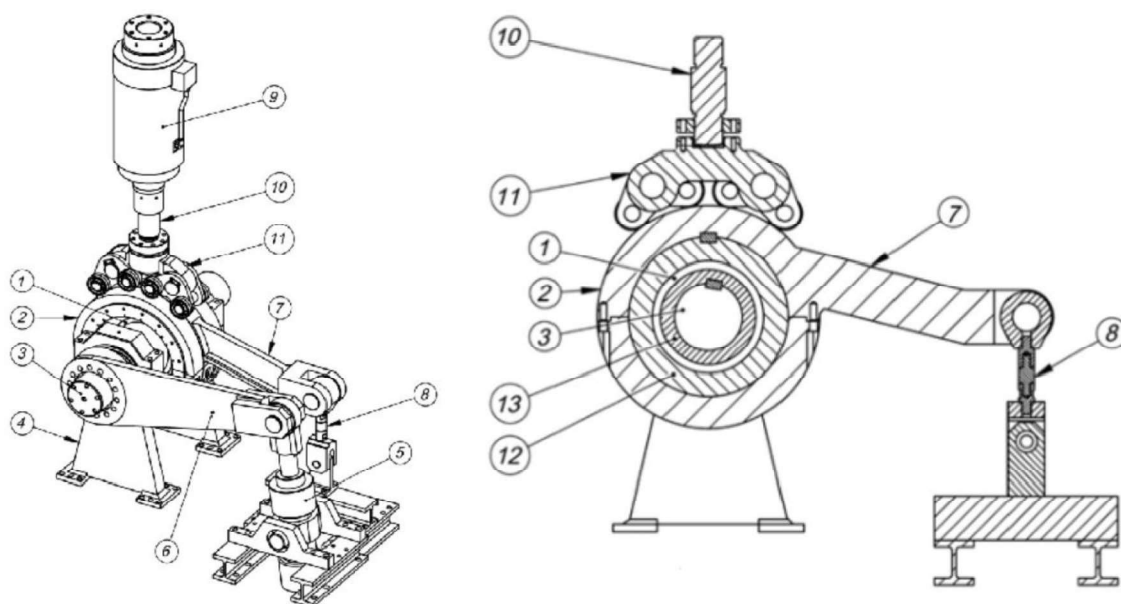


Obr. 10: Zařízení na ústavu materiálových věd a materiálového inženýrství na Universitě Ghent v Belgickém Ghentu. [10]



Toto zařízení se skládá z těchto částí:

- Pozice 1 - Testované kluzné ložisko
- Pozice 2 - Pouzdro ložiska
- Pozice 3 - Hřídel
- Pozice 4 - Rám
- Pozice 5 - Hnací píst
- Pozice 6 - Hnací páka
- Pozice 7 - Rameno
- Pozice 8 - Tenzometrický snímač
- Pozice 9 - Hydraulický pohon
- Pozice 10 - Zatěžující člen
- Pozice 11 - Soustava kladek
- Pozice 12 - Ložiskové těleso
- Pozice 13 - Hřídelové pouzdro



Obr. 11: Popis zařízení na ústavu materiálových věd a materiálového inženýrství na Universitě Ghent v Belgickém Ghentu. [9]

Opět jde o experimentální určování součinitele tření kluzného pouzdra o vnitřním průměru 300 mm. Vývoj materiálů zasáhl i do oblasti kluzných ložisek a tak je toto zařízení konstruované na testování samomazných kluzných ložisek z kompozitních materiálů jako jsou uhlíková, skelná nebo polyesterová vlákna.



Testované ložisko je nasunuto na hřídel, která je po stranách uložena ve dvou valivých ložiscích. K této hřídeli je pomocí těsného pera uchycena hnací páka, přes kterou je pomocí hnacího pístu uváděna hřídel do kývavého pohybu. Zatížení v radiálním směru vyvolává hydraulický pohon přes soustavu kladek pro lepší přenos síly o velikosti až 100 kN. Těleso kluzného ložiska je opět pomocí pera spojeno s ramenem, které je přichyceno k tenzometrickému snímači a tím je měřen moment, který je v rovnováze s třecím momentem testovaného kluzného pouzdra.

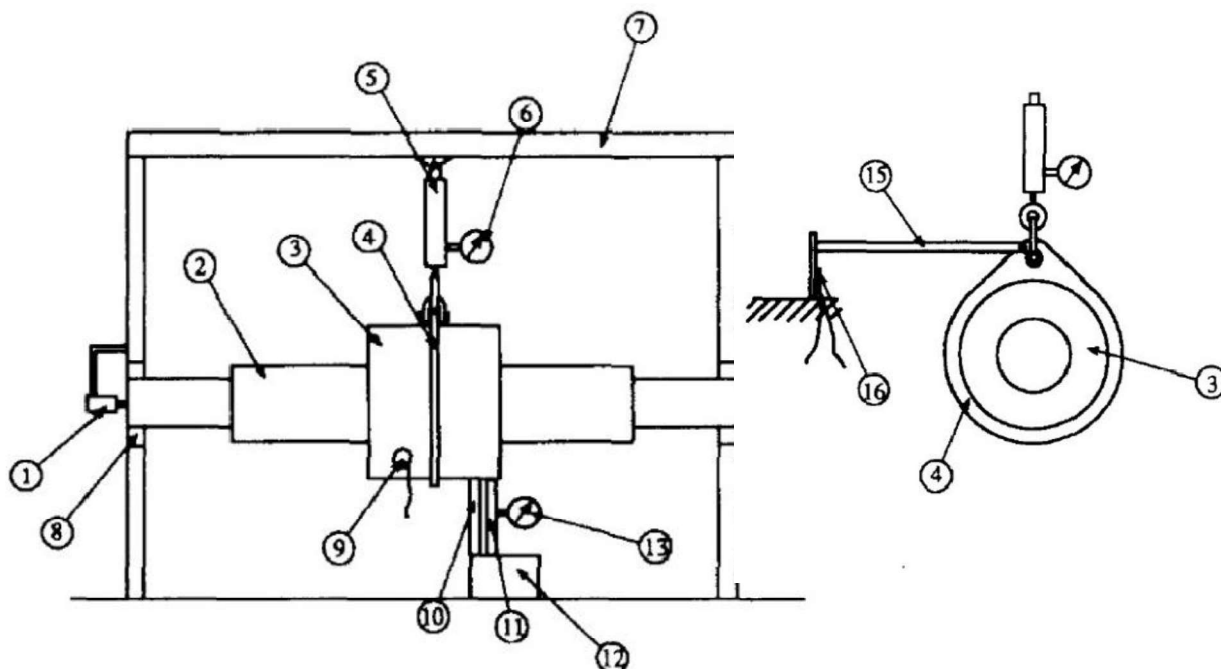
Další zařízení publikované V. Wikstriim, E. Hijglund a R. Larsson je zaměřené na testování kluzných ložisek při rozběhu, případně doběhu. Jde o ten stav provozní situace kluzného ložiska, kdy se hřídel vůči ložisku otáčí malými obvodovými rychlostmi. Vlivem toho nedochází k efektu, kdy jsou plochy zaručeně odděleny olejovou vrstvou. Protože je tloušťka mazací vrstvy nedostačující, dochází ke smíšenému režimu mazání, tedy stavu kdy nedochází k dokonalému oddělení dvou třecích ploch. Při malých obvodových rychlostech je i malá rychlost proudícího maziva, tím pádem mazivo není schopno odvádět nečistoty vzniklé např. při provozu zařízení. Nečistoty se dostávají mezi kluzné plochy a také výrazně ovlivňují opotřebení ložiska.

Toto zařízení se skládá z těchto částí:

- Pozice 1 - Otáčkoměr
- Pozice 2 - Hřídel
- Pozice 3 - Ložiskové těleso
- Pozice 4 - Ocelový prstenec
- Pozice 5 - Hydraulický píst
- Pozice 6 - Tlakoměr
- Pozice 7 - Rám stroje
- Pozice 8 - Valivá ložiska
- Pozice 9 - Teploměr
- Pozice 10 - Olejové potrubí odvádějící
- Pozice 11 - Olejové potrubí přívodní
- Pozice 12 - Olejové čerpadlo
- Pozice 13 - Olejový tlakoměr



- Pozice 14 - Hydraulický motor
- Pozice 15 - Rameno
- Pozice 16 - Tenzometrický snímač



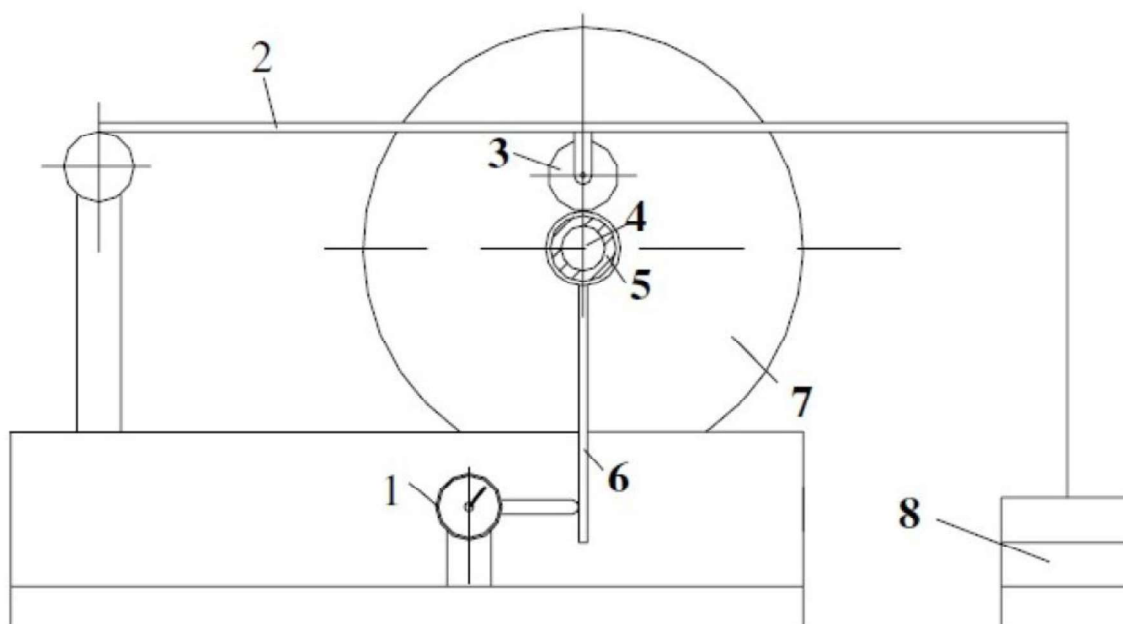
Obrázek 12 Zařízení pro zkoumání problematiky malých obvodových rychlostí při rozběhu a doběhu kluzného ložiska [11]

Hřídel testovacího zařízení ložiska je poháněna hydraulickým motorem a je uložena pomocí valivých ložisek v rámu tohoto zařízení. Kluzné ložisko je uloženo v ložiskovém tělese, kolem kterého je ocelový prstenec. Na tento prstenec je v horní části připevněno zatěžující zařízení skládající se z hydraulického pístu s tlakoměrem pro určení zatěžující síly. Na prstenec je pevně upevněno rameno, které vytváří třecí moment na tahové zatížení působící na tenzometrický snímač. Přívodní a odvádějící potrubí maziva z ložiska se nachází pod ložiskovým tělesem, kde je také umístěno olejové čerpadlo. Aby byl zajištěn dostatečný průtok maziva systémem je tento obvod doplněn o průtokoměr. Teplota ložiska je kontrolována teploměrem, který je umístěný na ložiskovém tělese. Z hodnot změřených tensometrem je určen moment vznikající vlivem třecí síly. Z rovnováhy momentů určíme součinitel tření.

Další práci ze světového měřítka stojí za zmínku práce Yrd. Doç. Dr. Bekir Sadık ÜNLÜ a Prof. Dr. Enver ATİK. Zabývají se určením součinitele tření v bronzovém kluzném ložisku. Vstupními provozními parametry jejich testovacího zařízení je zatížení, otáčky a režim mazání.

Zařízení se skládá z těchto částí:

- Pozice 1 - Číselníkový úchylkoměr
- Pozice 2 - Pákový mechanismus
- Pozice 3 - Kladka
- Pozice 4 - Čep
- Pozice 5 - Kluzné ložisko
- Pozice 6 - Rameno
- Pozice 7 - Pohon
- Pozice 8 - Závaží



Obr. 13 Experimentální zařízení využívající číselníkového úchylkoměru [12]

Testované ložisko je opět nasunuto na hřídeli, která je poháněna elektromotorem. Zatížení je vytvářeno pomocí závaží přes pákový mechanismus, kdy toto závaží tlačí přes protiváleček v radiálním směru na vnější kroužek, který je nasunutý na kluzné ložisko. K vnějšímu kroužku je uchycenou rameno, které vlivem třecího momentu na ložisku tlačí na číselníkový úchylkoměr. Tuhost pružiny číselníkového úchylkoměru znásobená hodnotou, o kterou se úchylkoměr posune dává sílu, kterou rameno na úchylkoměr tlačí. Tato síla působící na ramení je v rovnováze s třecím momentem kluzného ložiska.



1.4 Výhody a nevýhody kluzných ložisek [2]

Valivá ložiska jsou nepostradatelnou součástí mnohých strojních zařízení. Stále častěji se ale tato ložiska nahrazují ložisky kluznými. Můžou za to výhody, které tyto ložiska oproti ložiskům valivým přinášejí. Vyznačují se především širokým uplatněním téměř ve všech zařízeních od využití v medicíně, potravinovém průmyslu až po silně namáhané součásti zemědělské techniky. Nacházejí využití především tam, kde se dobře uplatní jejich vlastnosti, kterými jsou:

- jednoduchá konstrukce (malý vnější průměr)
- malé nároky na prostor při aplikaci do zařízení
- použitelné v širokém spektru otáček
- menší velikost tělesa
- nízká hmotnost
- nízká cena
- lepší odolnost proti kyvným pohybům než u valivých ložisek
- nízká hlučnost
- schopnost snášet rázy a vibrace
- minimální nebo žádná údržba

Kluzná ložiska vytváří daleko větší odpor, než ložiska valivá. Mezi kluzným ložiskem a hřídelí dochází k smykovému tření, což má za následek daleko menší účinnost, než je tomu u ložiska valivého, kde dochází k valení rotačních elementů.

- větší riziko zadření
- nároky na mazání (velká spotřeba maziva)
- nutné přesné dodržení tolerancí při výrobě
- únosnost a trvanlivost je značně závislá na vlastnostech maziva
- v některých případech nárok na záběh ložiska
- v některých případech nevhodné pro přerušovaný chod, při rozběhu a doběhu vznikají ztráty vlivem tření

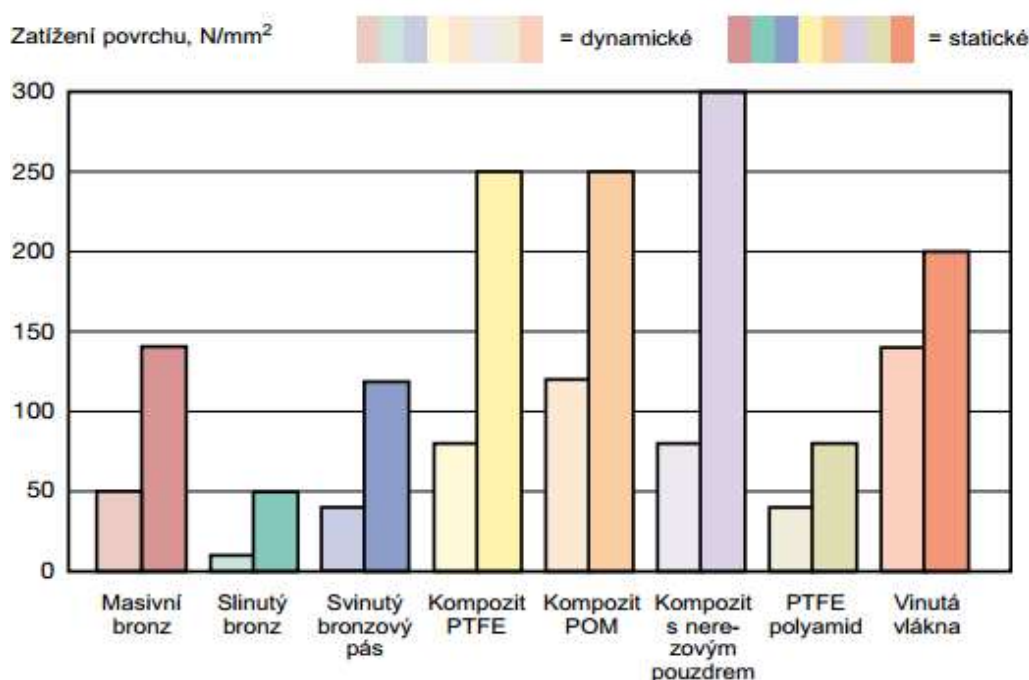


1.5 Základní parametry kluzných ložisek [2]

Mezi základní provozní parametry, které charakterizují oblast použití kluzného ložiska patří jejich únosnost, obvodová rychlost, tzv. $P \cdot v$ faktor, součinitel tření, provozní teploty a schopnost útlumu vibrací.

Únosnost kluzného ložiska

To, jak velkému zatížení dokáže kluzné ložisko odolat ovlivňuje hned několik činitelů. Jde především o charakter síly, která na ložisko působí. Rozlišujeme zda se jedná o statické nebo dynamické zatížení. Dalším činitelem, který má vliv na velikost únosnosti je oblast tření, v kterém ložisko pracuje. V případě, že jde o kluzná ložiska s kapalným třením s hydrodynamickým mazáním musí být dodržena minimální obvodová rychlost tak, aby docházelo k oddělení třecích ploch mazivem. Při rozběhu a doběhu tato minimální obvodová rychlost dodržena není a tak mazivo neoddělí kluzné plochy. Pokud je ložisko při rozběhu a doběhu plně zatíženo, pak je mez únosnosti dána zatížeností ložiska v oblasti mezního mazání. Únosnost kluzného ložiska s kapalným třením s hydrostatickým mazáním není závislá na obvodové rychlosti čepu. Více viz. kapitola 1.6.4 rozdělení kluzných ložisek podle způsobu tření. V následujícím grafu jsou velikosti únosností kluzných ložisek SKF pro jednotlivé materiály ložisek.



Obr. 14: Přípustné dynamické měrné zatížení při kluzné rychlosti nižší než 0,01 m/s a přípustné statické měrné zatížení při nulové rychlosti pro různé druhy kluzných materiálů SKF [13]



Obvodová rychlost čepu

Kluzná rychlost je jeden z nejdůležitějších faktorů, podle kterého kluzné ložisko vybíráme pro příslušnou aplikaci. Vztah mezi otáčkami čepu a touto obvodovou kluznou rychlostí popisuje následující rovnice:

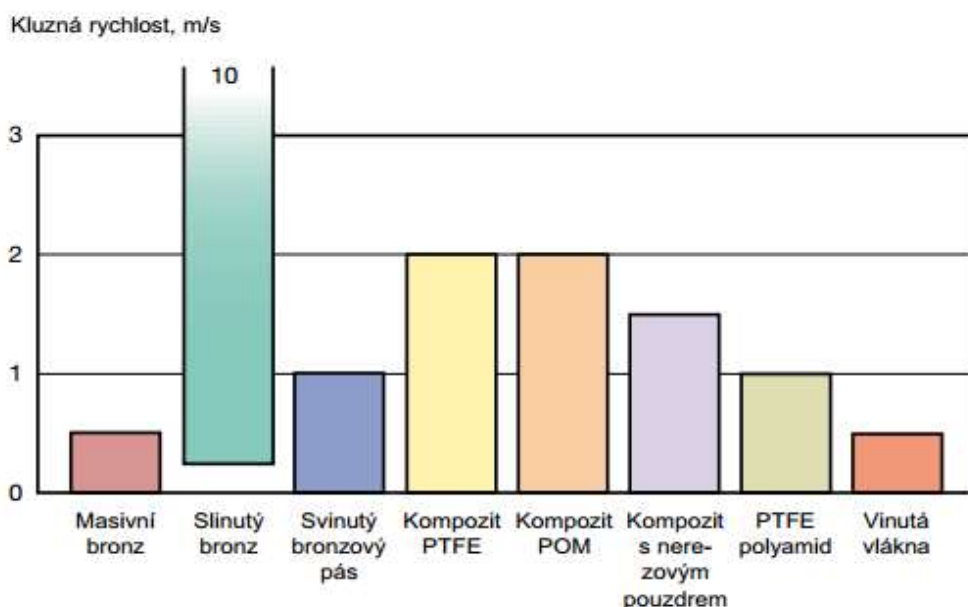
$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60 \cdot 1000} = [\text{m/s}] \quad (1)$$

kde je:

d vnitřní průměr ložiska [mm]

n otáčky čepu [min^{-1}]

V následujícím grafu můžeme vidět kluzné rychlosti ložisek různých materiálů z produkce SKF.



Obr. 15: Dlouhodobě přípustná kluzná rychlost kluzných materiálů SKF při měrném zatížení nižším než 1 N/mm^2 za sucha nebo při počátečním mazání [13]

Pv faktor

Jde o součin provozního zatížení P a obvodové rychlosti v . Obecně se dá říci, že čím větším zatížením P bude ložisko namáháno, tím menší musí být obvodová rychlost v ložiska tak, aby byla dodržena tato maximální hodnota $P \cdot v$. To platí i obráceně. Čím vyšší bude obvodová rychlost ložiska v , tím menší musí být zatížení ložiska P .



Součinitel tření

Hodnota součinitele tření udává to, jak velký odpor kluzné ložisko vytváří. Tento odpor, nebo-li třecí moment vytváří třecí síla F_t působící na vnitřním poloměru kluzného ložiska. Součinitel tření je pak dán následujícím podílem .

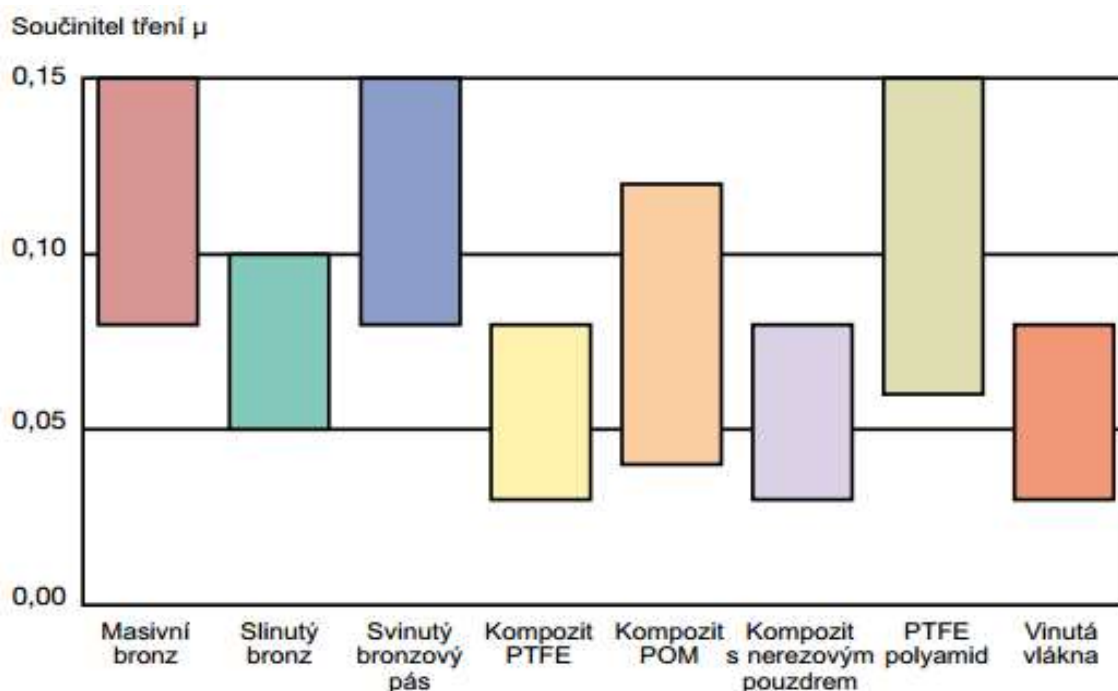
$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (2)$$

kde je:

F_t třecí síla na vnitřním poloměru ložiska [N]

F_n normálová síla [N]

U ložiska pak součinitel tření přímo popisuje jeho účinnost. Součinitel tření je ovlivněný hned několika faktory charakterizující provozní prostředí kluzného ložiska, kterými jsou drsnosti a tvrdosti kluzných povrchů, obvodová rychlost, teplota, schopnost maziva odvádět teplo a nečistoty a především zatížení ložiska. V následujícím grafu jsou hodnoty součinitele typické pro různé kluzné materiály ložisek z produkce SKF.

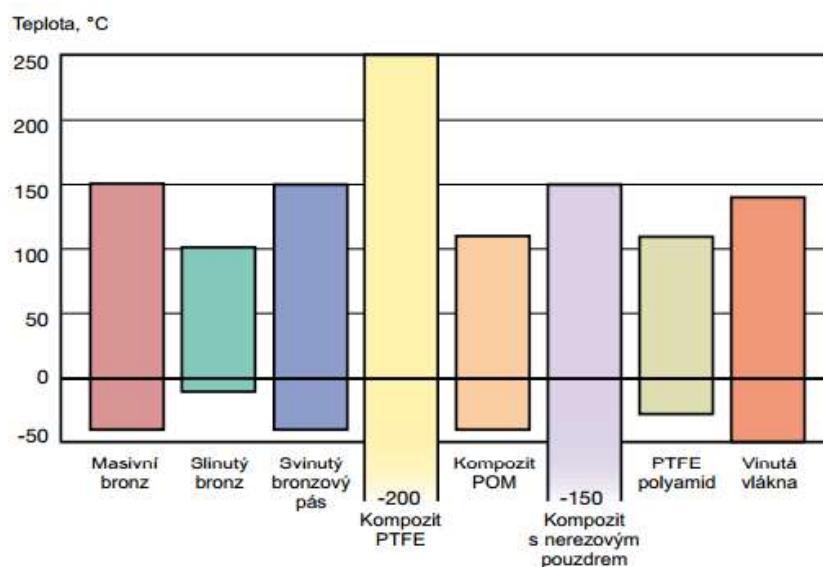


Obr. 16: Součinitel tření za sucha nebo při počátečním mazání běžným množstvím maziva pro různé typy kluzných materiálů SKF. [13]



Provozní teploty

Při volbě druhu ložiska je provozní teplota velmi důležitá, zvláště pak tehdy, je-li příliš nízká nebo vysoká. U kluzných ložisek s kapalinným třením musí být zajištěno, aby mazivo bylo v mazací soustavě předeříváno, pro bezpečný rozběh ložiska. Nejvyšší přípustná teplota kluzných ložisek je dána maximální trvale přípustnou teplotou daného maziva. Teploty, které překročí 100°C, vedou ke snížení tvrdosti kluzných ploch a tím i ke snížení únosnosti ložiska. Pro malé rychlosti a malá zatížení, kde nemusí být zajištěny velmi malé ztráty, se může použít nemazaných kluzných ložisek, pracujících v oblasti suchého tření. Pro toto suché tření lze použít jako materiál teflon plněný grafitem nebo práškové kovy, a to do teploty 300°C. Pro teploty 400 – 500°C je možnost použití speciálních ložisek z uhlíkových materiálů sycených mědí nebo stříbrem. V následujícím grafu je vidět teplotní rozsah pro jednotlivé materiály kluzných ložisek z produkce SKF.



Obr. 17: Rozsah teploty pracovního prostředí pro jednotlivá kluzná pouzdra SKF za běžných pracovních podmínek. [13]

Útlum vibrací

V praxi bývá často požadováno, aby ložisko mělo určitou schopnost útlumu vibrací. Kluzná ložiska s dostatečně silnou mazací vrstvou mezi kluznými plochami mají značný tlumicí účinek. Zvláště velký tlumicí účinek mají tzv. víceplochá kluzná ložiska s několika hydrodynamickými nosnými mazacími vrstvami.

1.6 Rozdělení kluzných ložisek [1]

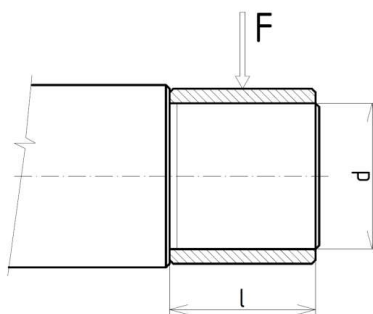
Kluzná ložiska můžeme rozdělovat podle:

- směru zatížení
- časového průběhu síly, popř. kluzné rychlosti
- tvaru kluzné plochy
- oblasti tření (mazání)
- způsobu mazání

1.6.1 Rozdělení podle směru zatížení [1]

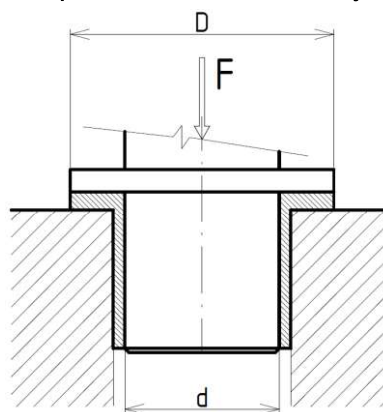
V závislosti na směru působení zatížení na ložiska rozlišujeme kluzná ložiska na ložiska:

Radiální, kde síla zatížení působí kolmo na osu otáčení ložiska. Označují se také jako opěrná ložiska.



Obrázek 18 Radiální kluzné ložisko

Axiální, kde síla zatížení působí ve směru osy otáčení ložiska. Označují se také jako patní ložiska.



Obr. 19: Axiální kluzné ložisko

Některá kluzná ložiska mohou mít stykové plochy kuželové nebo sférické a tím mohou do určité míry zachycovat radiální i axiální složky směru působení zatížení.



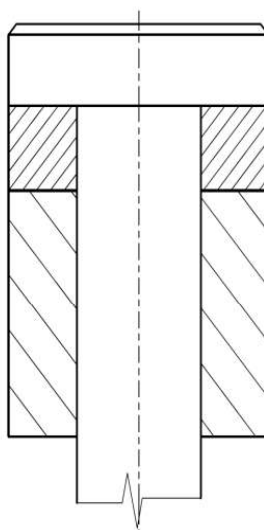
1.6.2 Rozdělení podle průběhu síly [1]

- **Staticky zatížená**, jde o zatížení, kde se ložisko pod zatížením otáčí velmi malými rychlostmi, nebo se pouze natáčí.
- **Dynamicky zatížená**, kde se ložisko pod zatížením otáčí vysokými rychlostmi.

1.6.3 Rozdělení podle tvaru kluzné plochy [3]

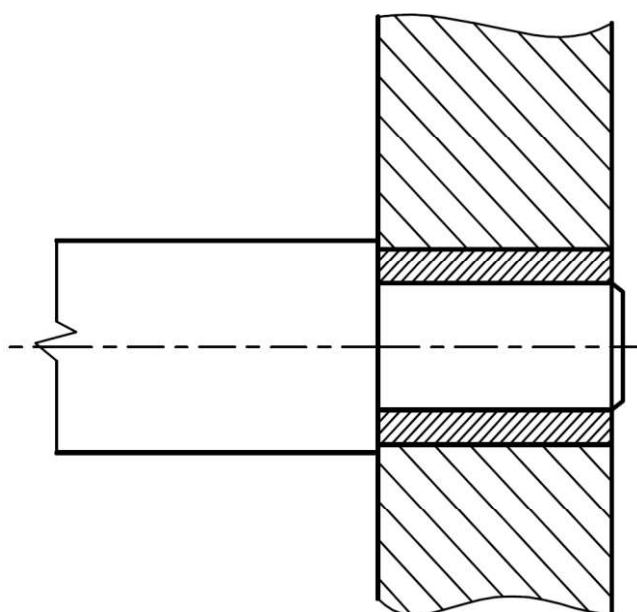
Podle tvaru kluzné plochy můžeme kluzná ložiska rozdělovat na:

- Prstencový tvar



Obr. 20 Prstencový tvar [3]

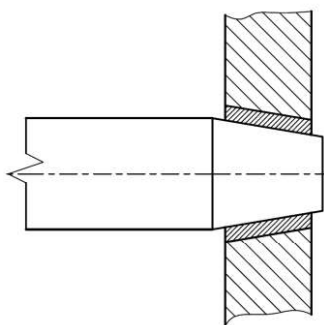
- Válcový tvar



Obr. 21: Válcový tvar [3]

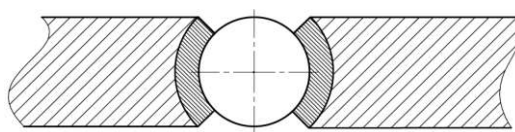


- Kuželový tvar



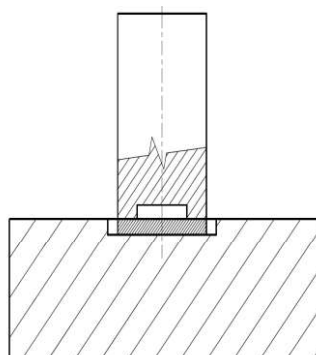
Obr. 22: Kuželový tvar [3]

- Kulový tvar



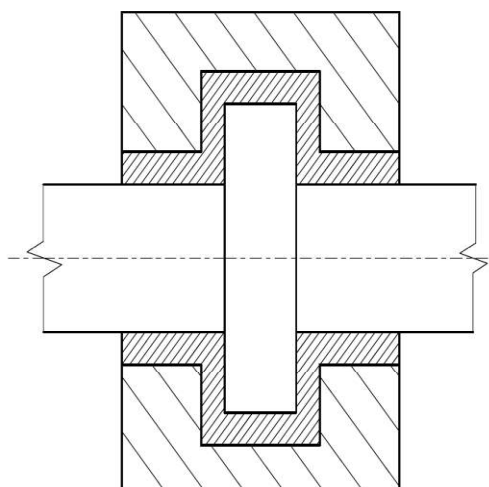
Obr. 23: Kulový tvar [3]

- Hřebenový tvar



Obr. 24: Hřebenový tvar [3]

- Patní tvar



Obr. 25: Patní tvar [3]



1.6.4 Rozdělení podle způsobu tření [2]

Podle oblasti tření, ve kterém dané kluzné ložisko pracuje kluzná ložiska dělíme na ložiska suchá, mezní a tekutinná. Opotřebení kluzných ploch se pro jednotlivé oblasti liší.

Suché tření vzniká při pohybu kluzných částí bez přítomnosti maziva. Vyskytuje se tedy především u bezmazných ložisek. Ložiska pracující v této oblasti musí být navrhována s omezenou životností a to s uvažováním působení menších provozních parametrů. Do této oblasti se řadí z technického hlediska i ložiska, kdy je na kluzné plochy nanášeno tuhé mazivo jako je například grafit.



Obr. 26: Suché tření [2]

Mezní nebo-li polosuché tření se vyznačuje tím, že se mezi plochami vyskytuje nesouvislá vrstva maziva. Takže dochází v některých místech k přímému dotyku povrchových nerovností.



Obr. 27: Mezní tření [2]

Kapalinné tření se vyznačuje tím, že je mezi třecími plochami souvislá vrstva maziva, která plně odděluje třecí plochy. Tuto vrstvu maziva můžou tvořit jednak kapaliny, plyny nebo plastické mazivo.

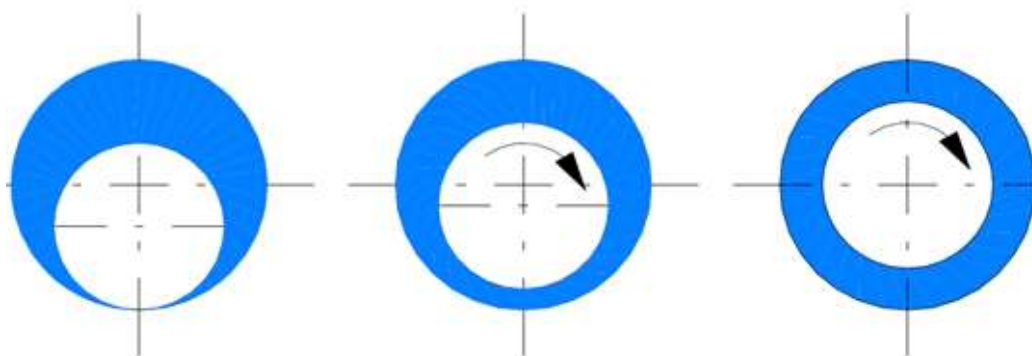


Obr. 28: Kapalinné tření [2]



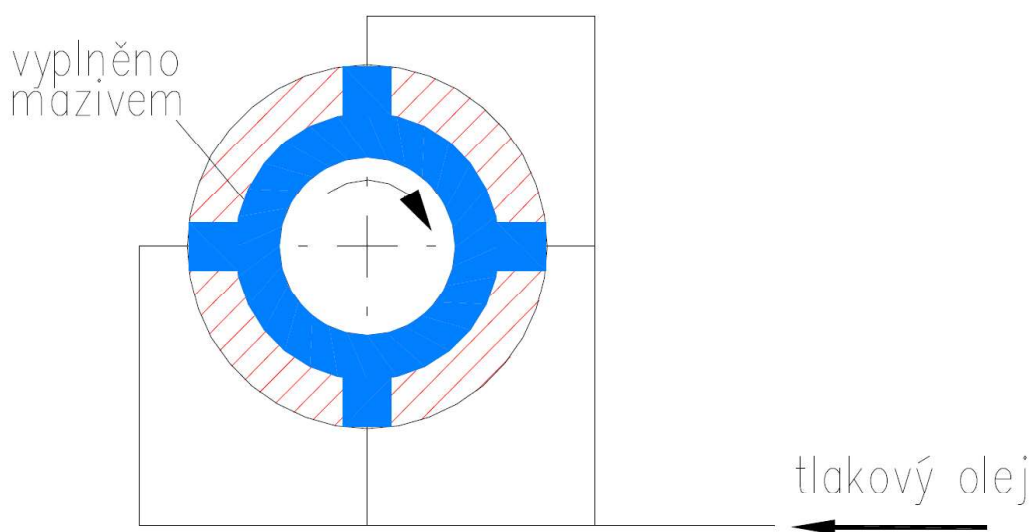
1.6.5 Rozdělení podle způsobu mazání [2]

Hydrodynamické mazání kluzných ložisek vzniká účinkem pohybu kluzných ploch. V mazací mezeře vzniká nosná vrstva maziva, v níž vzniká hydrodynamické tlakové pole. proudění, které v této mezeře vzniká je většinou laminární vyjma vysokých rychlostí, kde může mít proudění charakter turbulentní. Silová výslednice tohoto tlakového pole je v rovnováze s působící silou na ložisko. Při použití tohoto mazání pracují třecí plochy při rozběhu a doběhu v suché oblasti. [2]



Obr. 29: Princip hydrodynamického [2]

Hydrostatické mazání kluzných ložisek se využívá především tam, kde musí ložiska odolávat velkým silám. Nosnou vrstvu maziva udržuje vnější zdroj tlaku (čerpadlo). Nedochází zde k situaci jako u hydrodynamického mazání, že kluzné ložisko při rozběhu a doběhu pracuje v oblasti suchého tření. Nosná vrstva kapaliny oddělující kluzné plochy je splněna již za klidu. Tohoto mazání se využívá především tam, kde je potřeba vysoká tuhost uložení. Na obrázku č. 30 je vidět využití hydrostatického mazání u axiálního prstencového ložiska. [2]

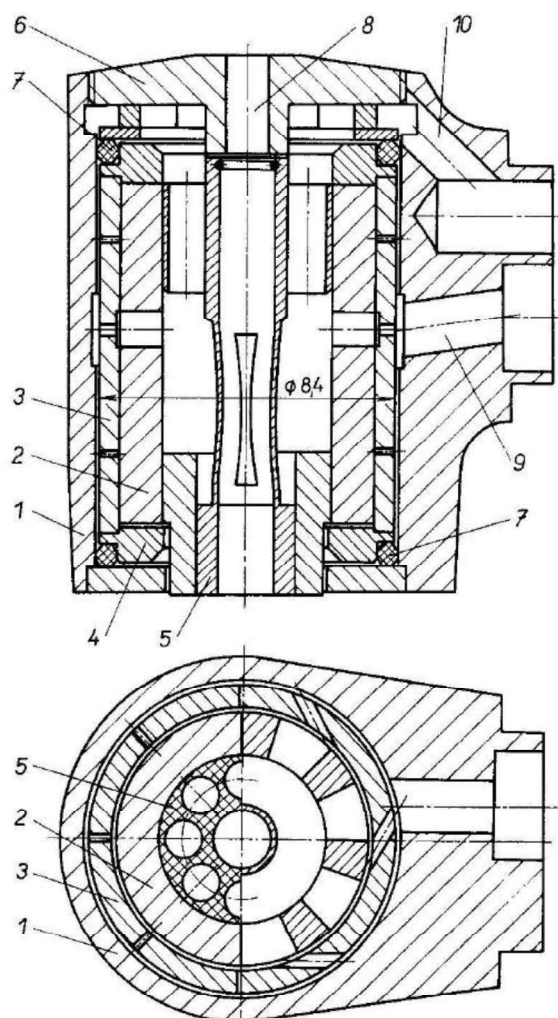


Obr. 30: Příklad hydrostatického mazání [2]



Aerodynamické a aerostatické mazání ložisek jsou jedním z dalších možných způsobů, jak od sebe oddělit dvě kluzné plochy. Předností jsou nízké ztráty třením, malé oteplení. Nezáleží na materiálech ložiska a jsou malé nároky na hladkost styčných ploch, tato ložiska mají velkou životnost. Nevýhodou tohoto způsobu mazání je malá únosnost a nutnost čištění tlakového vzduchu. Únosnost aerodynamických ložisek je maximálně 10 kPa a u aerostatických mazání je tato hodnota až 300 kPa. Nejčastěji používané jsou plyny jako je vzduch, CO_2 nebo He. Na obrázku č. 31 je vidět konstrukce mikrovřetena s aerostatickými ložisky, kde je pod pozicí:

- | | |
|----------------------|--|
| 1 - základní těleso | 6 - víko |
| 2 - rotor | 7 - pružný kroužek |
| 3 - radiální ložisko | 8 - otvor pro vysunutí pracovního nástroje |
| 4 - axiální ložisko | 9 - vstupní otvor stlačeného vzduchu |
| 5 - upínací čelist | 10 - výfukový otvor |

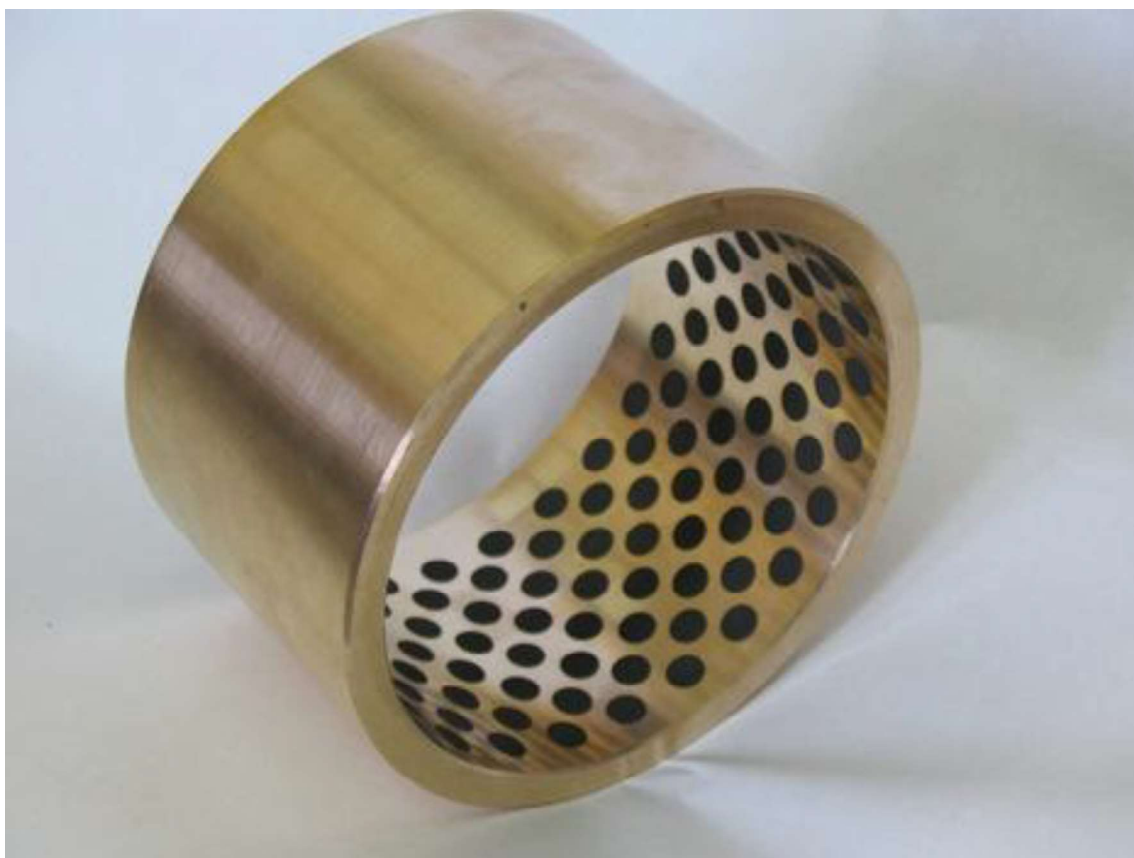


Obr. 31: Příklad použití aerostatického mazání [5]



Mazání tuhými mazivy se používá především tam, kde ložisko musí odolávat vysokým teplotám, kde tyto maziva nejen snižují tření, ale i odvádí teplo. Jako tuhé mazivo se používá grafit a molybden.

Samomazná kluzná ložiska nepotřebují přísun vnějšího maziva. Buď jde o samomazná pórovitá ložiska, která obsahují ve své pórovité kostře mazivo nebo samomazná kluzná ložiska, která obsahují maziva přímo ve své struktuře.



Obr. 32: Samomazné kluzné pouzdro [4]

1.7 Materiály kluzných ložisek [1], [13]

Materiál kluzného ložiska je pro konstruktéra tím nejzásadnějším kritériem při výběru tohoto ložiska. Téměř všechny provozní parametry jako je únosnost, obvodová rychlost, třecí ztráty, provozní teplota nebo i schopnost ložiska tlumit vibraci z velké části ovlivňuje právě materiál, z kterého je ložisko vyrobené. Správná volba materiálu pak může mít vliv nejen na provozní požadavky, ale i na požadavky ekonomické. V případě, že je ložisko mazáno hydrostaticky nebo hydrodynamicky, tak kluzné vlastnosti povrchových vrstev mají až druhořadou úlohu. V tomto případě se hlavní důraz klade na pevnostní a únavové vlastnosti materiálů. Mezi kritéria, která charakterizují materiály kluzných ložisek řadíme:



- odolnost proti zadírání
- zatížitelnost
- únavová pevnost
- korozivzdornost
- otěruvzdornost
- hodnoty součinitele tření
- zabíhavost
- smáčivost mazivem
- tvrdost
- teplotní roztažnost

Výčet některých konvenčních ale i méně používaných materiálů pro výrobu kluzných ložisek:

- cínový bronz CuSn10P
- slinutý bronz
- svinutý bronz CuSn8
- kompozit PTFE (kombinace pevné oceli a kluzné plochy PTFE)
- kompozit POM (kombinace poměděné ocelové vrstvy, slinuté porézní matrice a cínového bronzu)
- PTFE polyamid (kombinace termoplastický materiál s přísadou PTFE a skleněného vlákna)
- vinutá vlákna (kombinace skleněného vlákna, teflon pevné termoplastické polyesterové vlákna)
- kompozit s nerezovým pouzdrem (kombinace nerezové oceli potažené tkaninou tvořenou svazky teflonového vlákna a kovového drátku, kluzná plocha je tvořena vrstvou PTFE)
- iglidur (termoplastické materiály z řady Hannlich)

1.8 Opotřebení kluzných ložisek [14], [15]

Při styku povrchu kluzného ložiska a čepu vznikají vlivem tření změny v struktuře povrchů těchto dvou součástí a vlivem tohoto vzájemného působení se



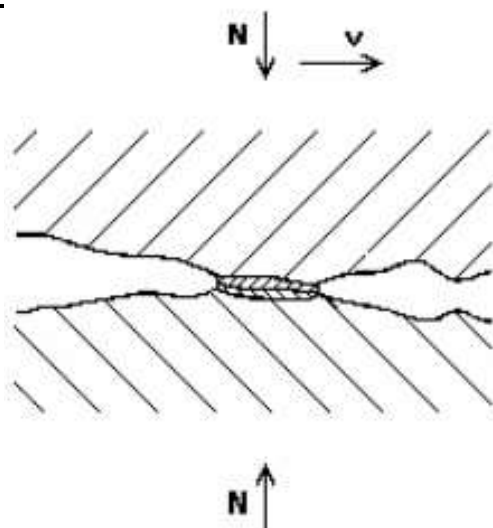
postupně oddělují částice z povrchů relativně se pohybujících těles. Tento proces nazýváme opotřebením.

Opotřebením můžeme charakterizovat takto: *Opotřebením je degradační proces vedoucí k progresivnímu úbytku materiálu z interagujících povrchů. Opotřebením je důsledkem zatížení a relativního pohybu povrchů.*[19]

Ve většině případů je opotřebením nežádoucí. Některé procesy na něm ale přímo závisí. Například u záběhu ložiska nastane ideální chování ložiska až po určité době provozu. Tato doba provozu záběhu má pak většinou přesně předepsané provozní podmínky, které se musí pro správný záběh dodržet. U kluzných ložisek se ale snažíme převážně dosáhnout toho, aby k opotřebení docházelo co nejméně. Opotřebením pak můžeme rozdělit na:

1.8.1 Adhezivní opotřebení

Jde o typické opotřebení vyskytující se u kluzných ložisek. Vyskytuje se tedy v případě tuhých těles tam, kde působí přitlačná normálová síla. To, v jakém měřítku toto opotřebení působí ovlivňuje četnost a tvar povrchových mikronerovností, schopnost materiálu vytvářet adhezní mikrospoje a především přítomnost maziva mezi povrchy kluzného ložiska a čepu.



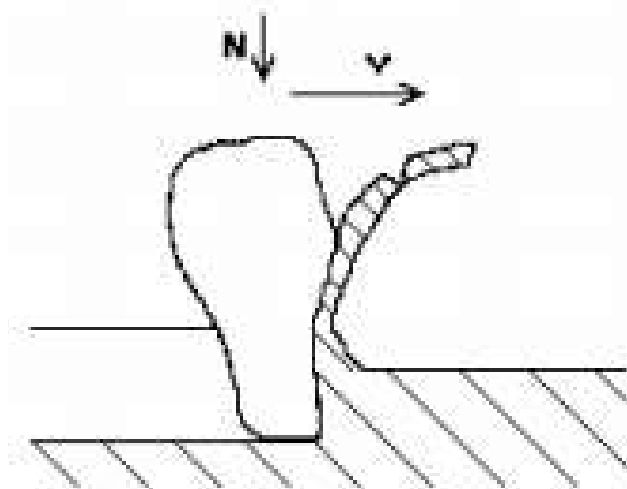
Obr. 33: Adhezivní opotřebení [15]

1.8.2 Abrazivní opotřebení

Vzniká při smýkání tvrdých povrchů vlivem přítomnosti tvrdých částic (u kluzných ložisek například výskyt nečistot) mezi smýkajícími se povrchy. Četnost



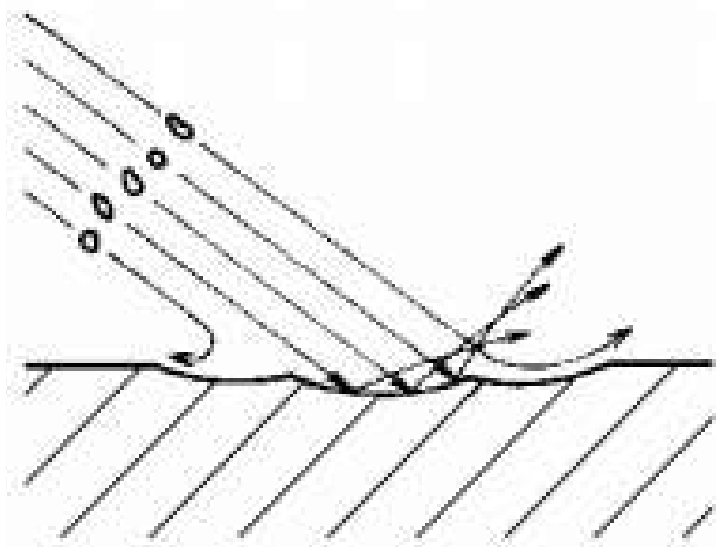
výskytu tohoto opotřebení ovlivňuje množství abrazivních částic, tvrdost a pevnost abrazivních částic a poměr tvrdosti abrazivních částic a kluzného ložiska.



Obr. 34: Abrazivní opotřebení [15]

1.8.3 Erozivní opotřebení

Toto opotřebení nastává u ložisek, kde se tření mezi kluzným ložiskem a čepem eliminuje mazivem nebo plynem. Jde o opotřebení kdy působí proud částic unášených plynem nebo kapalinou. Může jít i o působení částic samotné kapaliny nebo páry. Četnost výskytu tohoto opotřebení ovlivňuje relativní rychlost částic vůči povrchu ložiska, teplota a chemické vlastnosti unášejícího media, velikost a tvar částic, kinetická energie a úhel dopadu částic a neposlední řadě vlastnosti materiálu samotného ložiska.

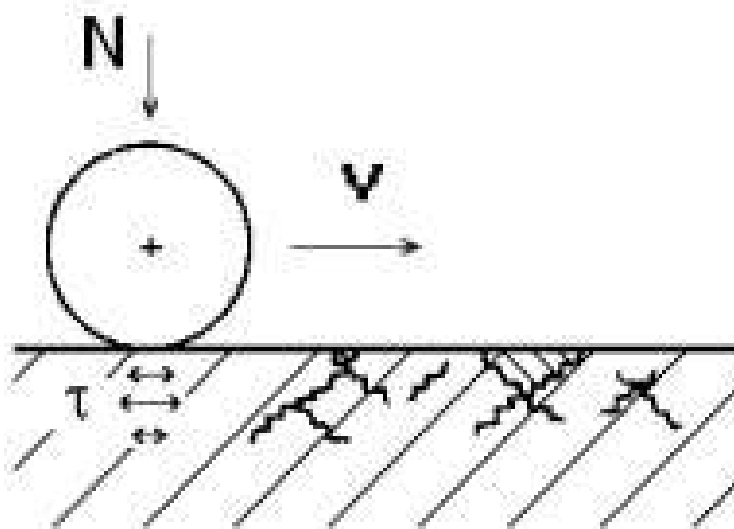


Obr. 35: Erozivní opotřebení [15]



1.8.4 Únavové opotřebení

Toto opotřebení se může vyskytovat u ložiska, kdy dochází k dlouhodobému opakovanému působení kontaktních tlaků. Četnost výskytu tohoto opotřebení ovlivňuje velikost kontaktních ploch, frekvence působení tlaku, vlastnosti povrchových a podpovrchových vrstev materiálu kluzného ložiska. Výskyt únavového opotřebení můžeme eliminovat pečlivou a přesnou výrobou čepu a vhodnou volbou povrchových vlastností ložiska a čepu.



Obr. 36: Únavové opotřebení [15]

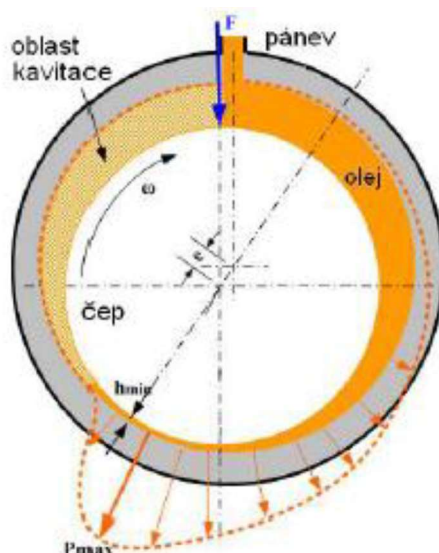
1.8.5 Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení se vyskytuje na povrchu, který je v kontaktu s kapalinou, vzniká-li kavitace. Kavitaci můžeme charakterizovat takto:

*Kavitace (z latinského *cavitas* – dutina) je vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí. Pokles tlaku může být důsledkem lokálního zvýšení rychlosti (hydrodynamická kavitace), případně průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (akustická kavitace). Kavitace je zpočátku vyplněna vakuem, později se vyplní párou okolní kapaliny nebo do ní mohou difundovat plyny z okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku, který kavitaci vytvořil, její bublina kolabuje za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál. Kavitace vzniká například na lopatkách lodních šroubů, turbín, na čerpadlech a dalších zařízeních, která se velkou rychlostí pohybují v kapalině. [20]*



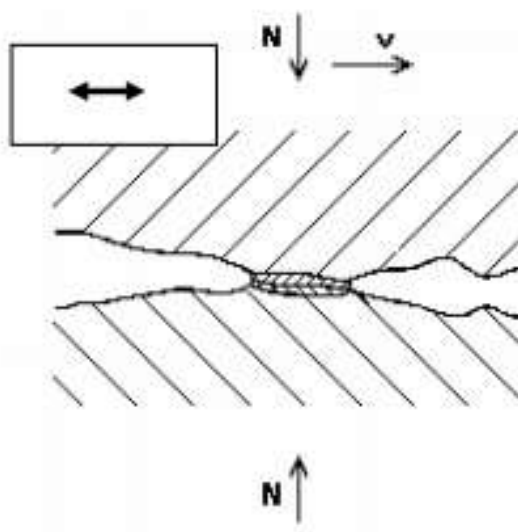
Četnost výskytu kavitačního opotřebení má tedy na svědomí zejména obsah plynů v kapalině, teplota a tlakové poměry v kapalině, povrchové napětí a viskozita kapaliny.



Obr. 37: Vznik kavitačního opotřebení u kluzného pouzdra [16]

1.8.6 Vibrační opotřebení

Výskyt tohoto opotřebení vzniká především v případech radiálních kluzných pouzder, kdy dochází k oscilačnímu pohybu tuhých těles přitlačovaných normálovou silou. Četnost vibračního opotřebení ovlivňuje velikost normálového zatížení, frekvence a amplituda vibrací a vlastnosti materiálů kluzného pouzdra a čepu. Omezení nebo vyloučení vibrací můžeme eliminovat pečlivou a přesnou výrobou ložisek a čepů.



Obr. 38: Vibrační opotřebení [15]



1.9 Výběr předních výrobců kluzných ložisek

Kluzná ložiska jsou konstruktéry stále častěji aplikovaná v technických zařízeních napříč celým strojním průmyslem od aut, zemědělských strojů, lékařské techniky, automatizační techniky až po výrobní linky potravinářského průmyslu. Můžou za to výhody, které tyto ložiska přináší oproti konvenčním ložiskům. Na to reaguje trh a existuje proto řada výrobců, kteří se výrobou těchto ložisek zabývají.

SKF CZ, a.s.: <http://www.skf.com/cz/index.html>

SKF patří mezi vedoucí celosvětové poskytovatele technologií již od roku 1907. SKF se zaměřuje především na rotační stroje. Mimo ložisek se zaměřují i na výrobu těsnění, lineárních os, aktuátorů, magnetických systémů a další.

HENNLICH CZ, s.r.o.: <http://www.hennlich.cz/>

Jde o společnost založenou v roce 1991 v Litoměřicích. Firemní tradice sahá až do roku 1922. Společnost zastupuje v ČR předního světového výrobce pouzder a ložisek Igus. Společnost se dělí na odštěpné závody a divize, které se specializují na jednotlivé skupiny produktů a služeb, kterými jsou, odštěpný závod HENNLICH TĚSNĚNÍ, odštěpný závod HYDRO-TECH, odštěpný závod LIN-TECH, odštěpný závod MERES, odštěpný závod HENNLICH ENGINEERING, odštěpný závod CEMA-TECH, odštěpný závod G-TERM, divize HENNLICH ENERGY, divize PRUŽINY a divize DŮLNÍ HYDRAULIKA.

ELO TOMAN, s.r.o.: <http://www.loziska.com/>

Firma ELO je významná obchodní společnost v oblasti strojírenství. Byla založena v roce 1993. Mimo ložisek patří tato firma k výhradnímu výrobcí těchto produktů: lineární vedení, kuličkové šrouby, gufera, hydraulika, mazací technika, o-kroužky, manžety, hnací řemeny a řemenice, hadice a spony, pojistné kroužky, válečkové řetězy a kola, Lepidla a tmely, maziva a oleje a další.

VK LOŽISKA s.r.o.: <http://www.vkloziska.cz/>

Obchodní skupina VK LOŽISKA s.r.o. patří od roku 1993 k nejvýznamnějším dodavatelům kompletního sortimentu ložisek a dalších souvisejících výrobků, kterými jsou: gufera, řemeny, řetězy, lepidla, maziva, oleje a další.



1.10 Experimentální zkoušení ve strojírenství [17]

V této kapitole se věnuji členění experimentů podle doby trvání, stavbě experimentálních stanovišť a popisem jednotlivých kroků, které je třeba zpracovat před začátkem každého experimentu.

1.10.1 Členění doby experimentu podle doby jeho trvání

Podle doby experimentálního měření můžeme zkoušky rozdělovat na:

- statické zkoušky (krátkodobé)
- dynamické krátkodobé zkoušky
- dynamické střednědobé zkoušky
- dynamické dlouhodobé zkoušky

Statické zkoušky (krátkodobé)

Tyto zkoušky jsou určeny na statická měření veličin, které jsou měřeny po ustálení. Mechanické krátkodobé zkoušky patří k nejrozšířenějším způsobům zkoušení materiálu, kdy principem této zkoušky je namáhání zkušebního tělesa definovaným zatížením, například v tahu, tlaku, smyku, ohybu, krutu malými rychlostmi deformace dokud nedojde k jejich porušení. U krátkodobých statických zkoušek se dále jedná např. o cejchování měřicích zařízení, měření parametrů statické tuhosti nebo cejchování aktivních tenzometrů.

Krátkodobé zkoušky dynamické

Jde o zkoušky určené například pro měření tlumení torzního kmitání soustavy, rozběhové a doběhové charakteristiky součástí pohonů, měření brzdných momentů a závislost jejich velikosti na čase a další. Jde také o měření jevů opakujících se s každým provozním cyklem.

Střednědobé zkoušky

Tyto zkoušky jsou využívány při určování ztrát přenosu výkonu, stanovování průběhu teplot v měřeném mech. systému a podobně.

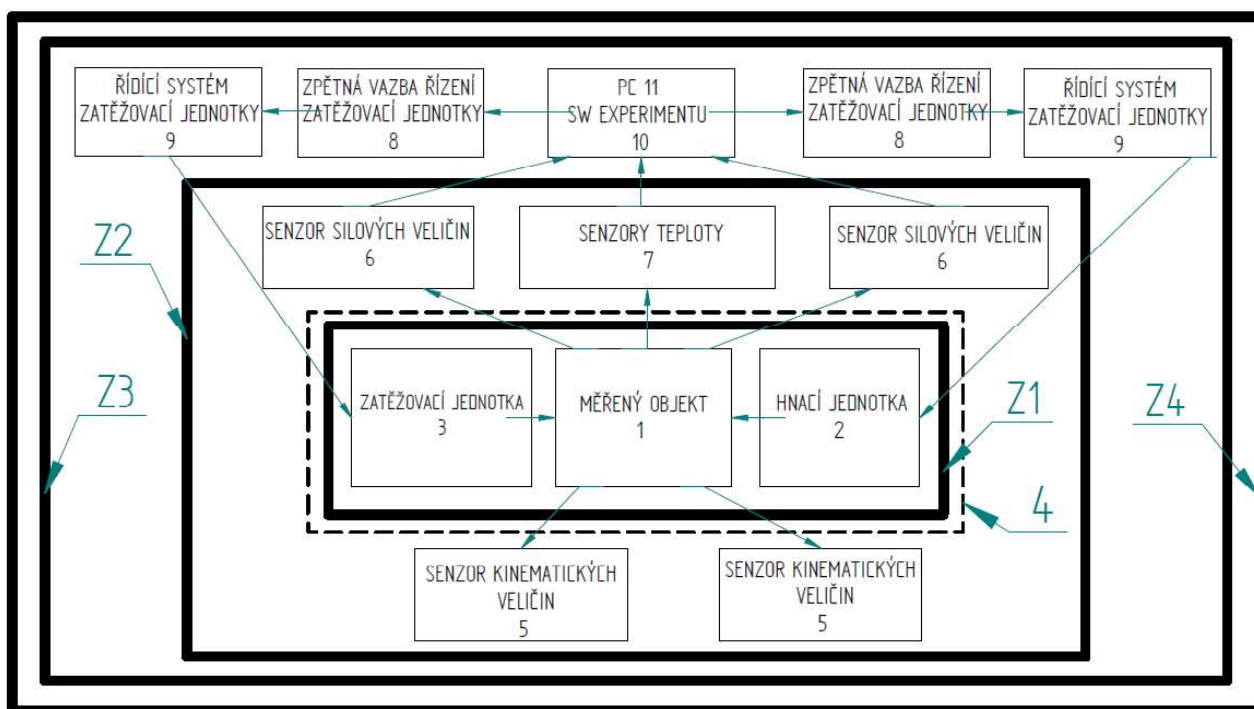


Dlouhodobé zkoušky

Dlouhodobé zkoušky jsou určeny k sledování životnosti a spolehlivosti strojní součástí a mechanismů. Sledovaným prvkem je především opotřebení při stanovené simulaci provozního zatížení.

1.10.2 Stavba experimentálních stanovišť

Základní koncepce jednotlivých prvků experimentálních stanovišť pro reálné mechanismy by měla vycházet z následujícího obrázku č. 39.



Obr. 39: Schéma koncepce experimentálního stanoviště [17]

Zóna 1

Zóna 1 je tvořena základními prvky experimentálního stanoviště:

- Měřený objekt (1)
- Hnací jednotka (2)
- Zatěžovací jednotka (3)
- Základový rám (4)

Zóna 2

Zóna 2 zahrnuje veškeré senzory potřebné k měření.

- Senzor kinematických veličin (5)
- Senzor silových veličin (6)
- Senzor teploty (7)

Zóna 3

Zóna 3 zahrnuje elektrické a elektronické systémy.

- Zpětná vazba řízení zatěžovací jednotky (8)
- Řídicí systém zatěžovací jednotky (9)
- Řídicí software experimentu (10)
- PC (11)

Zóna 4

Zóna 4 je určena pro další zařízení experimentálního stanoviště v případě potřeby nějaké doplňkové metody měření.

1.10.3 Metodika zkoušek

Základními body metodiky experimentálních zkoušek je vypracování teoretických východisek problému, vytčení cílů měření, stanovení typu a počtu potřebných senzorů, návržení způsobu dosažení provozních podmínek, snímání a archivace dat, návržení kritérií hodnocení přenosu výkonu, stanovení způsobu řízení experimentu a zajištění proti havárii, návržení sledu jednotlivých kroků při měření, návržení vhodného systému záznamu o průběhu měření a návržení způsobu zpracování naměřených dat.

Vypracování teoretických východisek problému

Základním úspěchem úspěšného experimentálního zkoušení je vypracování teoretických východisek daného problému. Způsob provedení daného experimentu by se pak měl opírat o teoretické informace získané během tohoto prvního kroku. Je důležité provést silové rozbory a způsob jejich přenosu testované soustavy. Musí být vytipována její kritická místa, analyzovány interakce a vzájemné vlivy prvků na ně. Musí být proveden výpočet všech prvků.

Stanovení cílů měření

Cíle měření jsou přímo závislé na účelu měření. Veškeré další kroky metodiky zkoušek musí být podřízeny právě cílům měření. Cílem měření pak například může být:

- Verifikace katalogových hodnot výrobku
- Sledování stavu záběhu součástí
- Dlouhodobé sledování skutečného stavu zařízení
- Stanovení poměrů mezi reálným ztrátovým výkonem a teplotou měřenou v konkrétním místě
- Sledování životnosti prvků při stanovených provozních podmínkách

Stanovení typu a počtu potřebných senzorů

Určení typu a počtu senzorů testovacího zařízení vychází z množství a charakteru veličin, které potřebujeme pro vyhodnocení experimentu znát. Těmito základními veličinami nejčastěji bývají krotící momenty, síly, úhlové rychlosti, rychlosti přímočarého pohybu nebo teploty v konkrétních místech. Úkolem takovýchto senzorů je stanovení velikostí těchto veličin v závislosti na čase.

Navržení způsobu dosažení provozních podmínek

Správnost výsledků při experimentálním testu v laboratorních podmínkách ovlivňuje zejména to, jak přesně dokážeme simulovat provozní podmínky, které definuje z velké většiny hlavně výkonové zatížení zkoušeného zařízení, tzv. zátěžné spektrum. Zátěžné spektrum je stanoveno např. normou, zadavatelem experimentu nebo je pouze k dispozici provozní cyklus systému, ale není známo konkrétní zatížení měřeného mechanismu. Nedojde-li k přesnému simulování provozních podmínek tak musí dojít k takovým korekcím výsledků, které povedou k výsledkům odpovídajícím experimentu s provozními parametry shodnými s reálným provozem.

Snímání a archivace dat

Pro výklad výsledků je důležité provádět záznam o průběhu zkoušky. Výsledky jsou tím přesnější, čím podrobnější záznam o průběhu dějů během experimentu provedeme. Podrobný záznam nám umožňuje ukázat chyby měření vedoucí k



změně přístupu k experimentu již během zkoušky. To vede následně k realizaci kontrolní krátkodobé nebo střednědobé zkoušky. Proto je důležité vyhodnocovat naměřená data během experimentu.

Navržení kritérií hodnocení přenosu výkonu

Konec správné funkčnosti testovaného mechanismu nebo součásti určují kritéria porušení, které je třeba předem stanovit. Jde o kritéria, po jejichž dosažení testovaný prvek ztrácí schopnost přenášet výkon. V problematice mechanismů jsou nejčastěji používány:

- kritérium porušení
- kritérium deformace
- kritérium lokálního opotřebení
- kritérium tepelných účinků
- kritérium vibračních účinků a hluku

Stanovení způsobu řízení experimentu a zajištění proti havárii

Moderní technika zvyšuje přesnost experimentálního měření. Nejčastěji je tak dosaženo kombinací PC s SW, HW a výkonným členem, např. ovládacím prvkem elektromotoru. Tato kombinace umožňuje provádět experimentální měření v přesně stanovených sledech bez lidského dozoru a je možné následně porovnávat stejné experimentální cykly mezi sebou.

Při experimentálním výzkumu mechanismů hrozí riziko havárie. Proto je třeba myslet i na bezpečnost. Proto se experimentální zařízení proti těmto haváriím zabezpečují buď mechanickými nebo elektronickými prostředky.

Navržení sledu jednotlivých kroků při měření

Navržení sledu jednotlivých kroků při měření vychází z teoretických východisek problému, vytčení cílů měření. Předem připravený sled jednotlivých kroků při měření šetří čas a má za následek hladký průběh měření.



Navržení vhodného systému záznamů o průběhu měření

Jako vhodné se jeví zaznamenávat při experimentální zkoušce její průběh měření. Pro tyto záznamy slouží předem připravené tzv. metodické listy, které následně mohou sloužit jako doklad a průběhu měření pro zadavatele zkoušky.

Způsob zpracování naměřených dat

V současnosti je záznam, archivace, analýza nebo prezentace naměřených dat řešena moderními SW. Pro takovéto řešení platí tyto základní zásady. Citováno z [17].

- *Měřené signály, ať už analogové nebo digitální musí být zaznamenávány jednoznačným způsobem tak, aby bylo možno vždy určit jejich původ(z kterého senzoru pocházejí) a dobu jejich vzniku.*
- *Násobící konstanty, které dávají elektrické veličině fyzikální rozměr, musí být řádně vysvětleny.*
- *Archivace musí být systematická a přehledná, aby při zpracování dat bylo možno vyhledávat příslušné soubory.*
- *Je třeba odlišovat tři typy datových souborů: prostý elektrický signál (primární), signál přepočítaný pomocí konstant na fyzikální signál (sekundární) a signál vzniklý aplikovanou matematickou analýzou (terciální)*
- *Prezentace dat v grafech nebo tabulkách musí být uspořádána přehledně a s vyznačením veličin v prezentaci obsažených*



2 Návrh experimentálního měření pro testování kluzných ložisek

Experimentální stanoviště a samotné testovací zařízení je navrženo s ohledem na požadavky zadavatele (ústav konstruování), kterými jsou:

- nízké výrobní náklady
- jednoduchost konstrukce
- možnost jednoduché manipulace s test. zařízením
- použití pohonu a měřících čidel, které jsou k dispozici v laboratoři ústavu

Zařízení je určeno k testování nízkonákladových bezúdržbových kluzných pouzder, která se v praxi využívají především tam, kde není možnost kluzná ložiska mazat. Tyto ložiska budou na standu podrobována zatěžování v radiálním směru při vysokých kluzných rychlostech, což znamená, že zde půjde o dynamické zatěžování. V souvislosti s požadavky na zařízení byl zvolen jednotný vnitřní průměr testovaných kluzných ložisek 15mm.

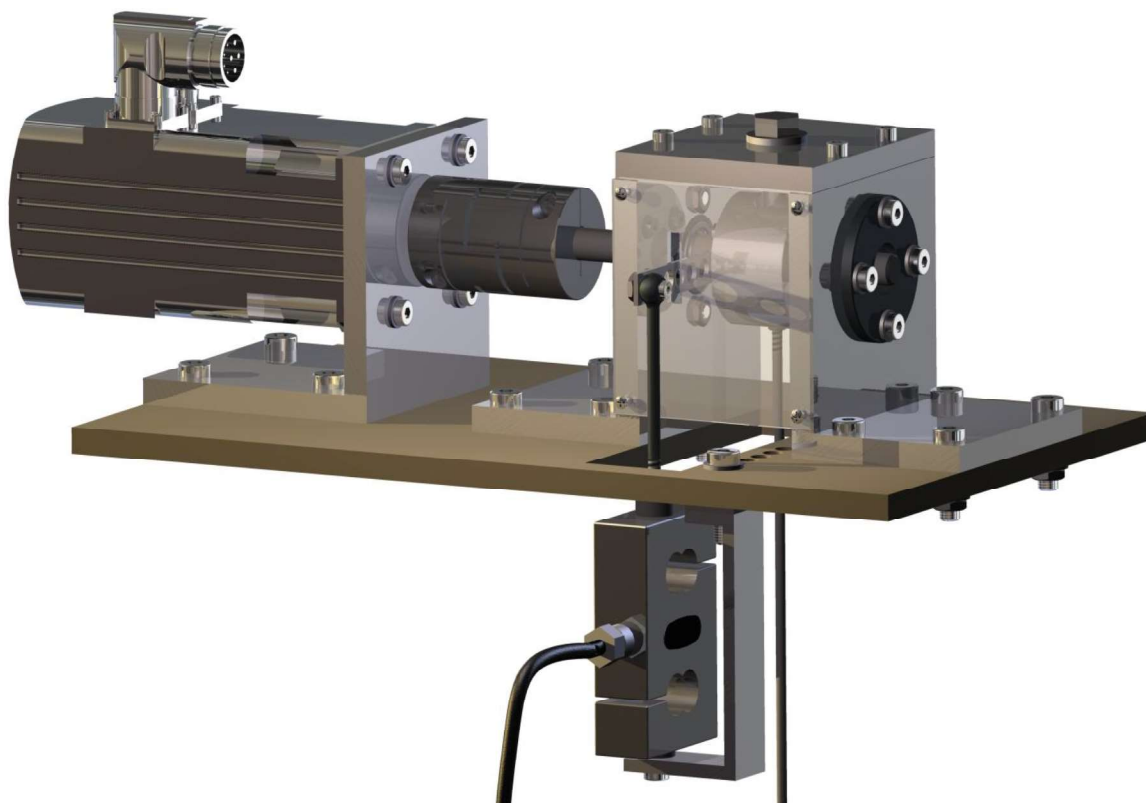
V této kapitole je nejprve popsána konstrukce a způsob uchycení testovacího zařízení. Následně jsou provedeny nezbytné výpočty pro určení parametrů zařízení a dimenzování použitých prvků a testovaných kluzných pouzder.

2.1 Konstrukční řešení testovacího zařízení

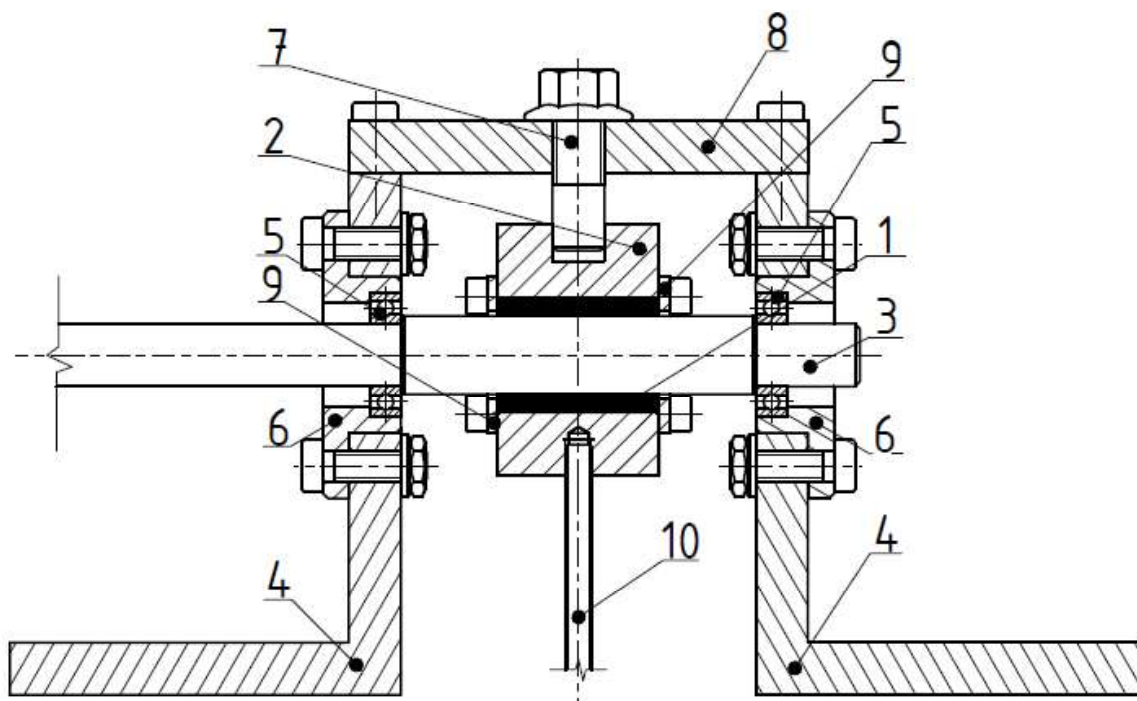
Finální konstrukce testovacího zařízení je zřejmá z obrázku č. 40. a obrázku č. 41, na kterém jsou opozicovány jednotlivé prvky části samotného zařízení. Testované kluzné pouzdro (1) je nasunuto na hřídeli (3), na kterou je přiváděn kroutící moment od servomotoru. Tato hřídel je uložena po stranách ve valivých ložiscích (5), která mají větší únosnost, než testované kluzné pouzdro. To znamená, že pokud se překročí únosnost testovaného ložiska, nebude výrazně ovlivněno ložisko ve kterém je uložena hřídel. Na kluzné pouzdro je nasunut vnější kroužek (2), za který je pověšeno závaží (10). To vyvolá zatížení na kluzné pouzdro v radiálním směru. Kluzné pouzdro je vymezeno proti axiálnímu pohybu bočnicemi (9), které jsou přišroubovány z boku do vnějšího kroužku. Ten je proti axiálnímu pohybu vymezen šroubem (7), který zapadá do drážky v vnějším kroužku. Deska na vrchu zařízení (8) především zpevňuje celé zařízení, ale slouží také k uchycení šroubu (7).



Protože jsou L-profilů (4) z hliníku, jsou použity k uložení valivých ložisek příruby (6) z tvrdšího materiálu.

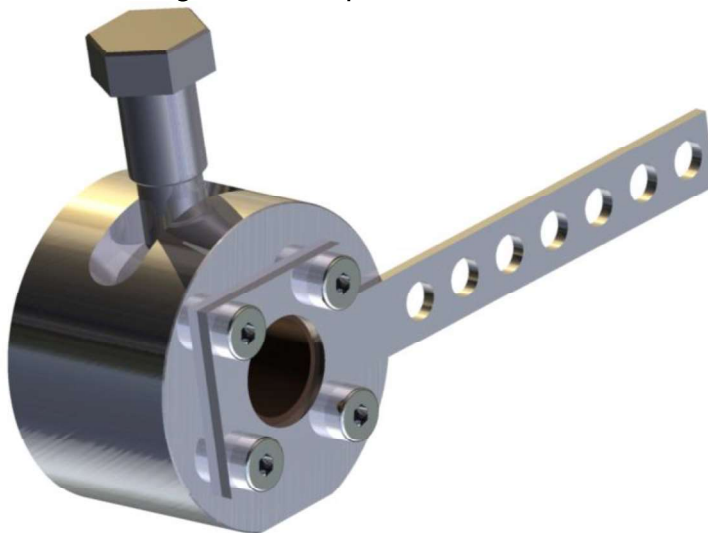


Obr. 40: Experimentální zařízení 3D pohled



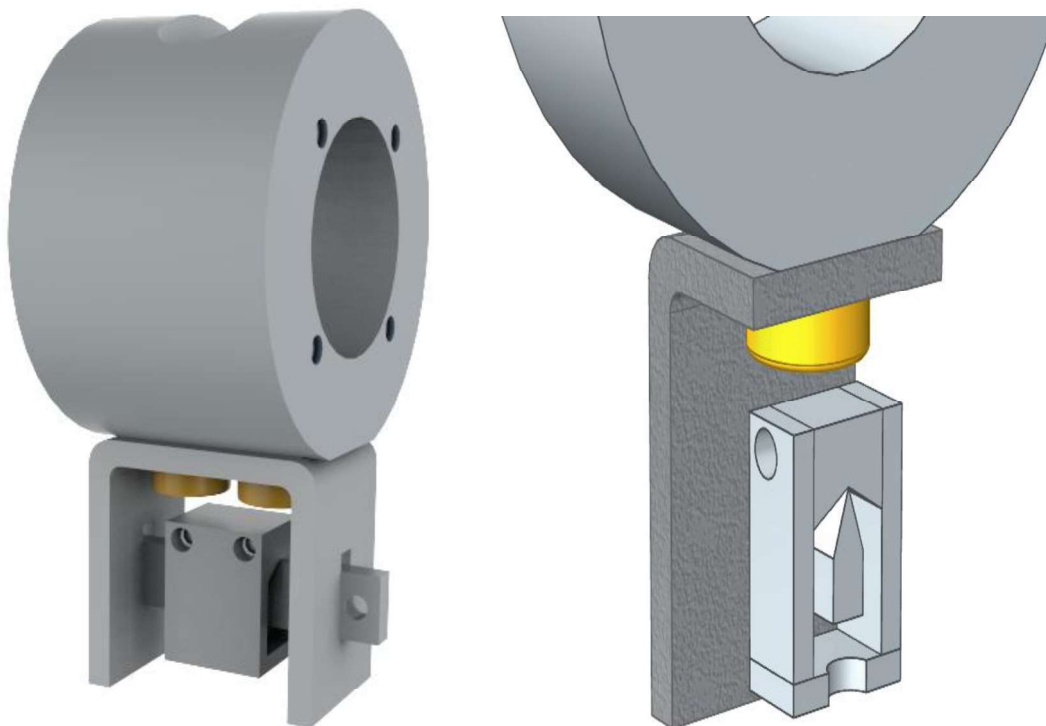
Obr. 41: Řez testovacím zařízením

V radiálním směru šroub natočení vnějšího kroužku umožňuje. Jedna z bočnic (9) sloužící k vymezení axiálních posuvů testovaného kluzného pouzdra plní i funkci táhla, které je otočně uchyceno k snímači síly. Na tomto táhle je hned několik děr k uchycení snímače, čímž se dá regulovat síla působící na snímač.



Obr. 42: Uchycení táhla snímače síly

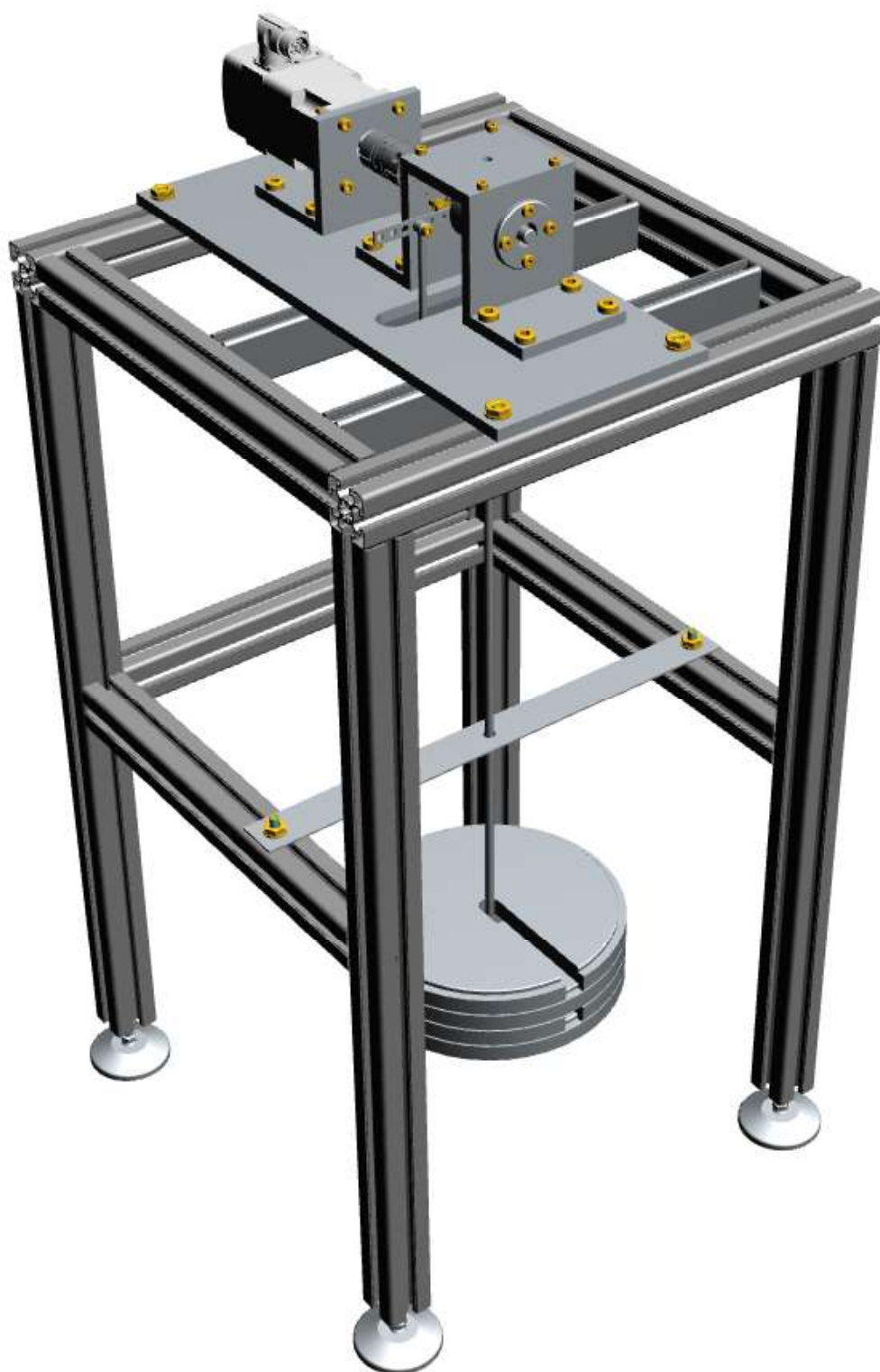
S ohledem na to, aby závaží vyvolávající v radiálním směru zatížení na testované ložisko ovlivňovalo natočení vnějšího kroužku co možná nejméně, je závaží uchyceno k vnějšímu kroužku přes břit obdobně jako je tomu u kyvadlových vahách.



Obr. 43: Břítové uchycení závitové tyče na závaží



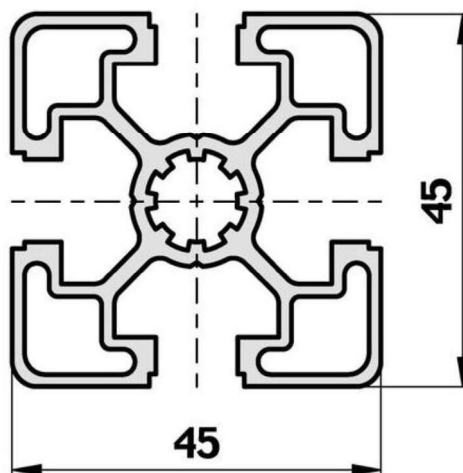
Testovací zařízení je přišroubováno ke stolku viz. obrázek č. 44. Aby nedocházelo k rozkývání závaží a nedocházelo tak k vnášení chyb do měření je ke stolku přišroubován plech, ve kterém je díra pro závitovou tyč, za kterou je přichyceno závaží.



Obr. 44: Experimentální stanoviště 3D pohled



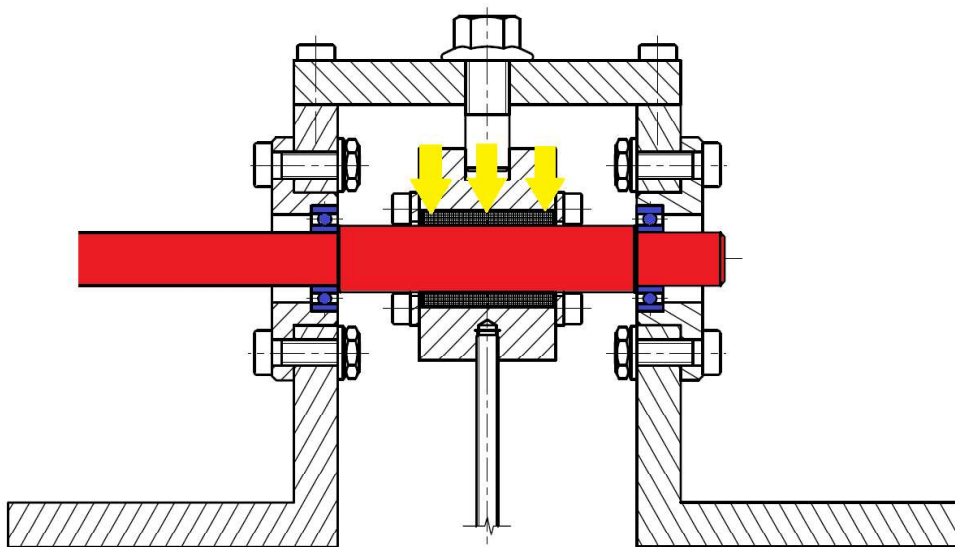
Stolek je navržen ze stavebnicového hliníkového profilu, který nabízí nízkou váhu při zachování vysoké pevnosti. Tento hliníkový profil umožňuje díky T drážkám uchycení dalších prvků experimentálního stanoviště.



Obr. 45: Hliníkový stavebnicový profil 45x45L

2.2 Výpočet průhybu hřídele testovacího zařízení

Kritickým místem tohoto zařízení je hřídel, na kterou je nasunuto testované kluzné pouzdro. Při jeho zatěžování v radiálním směru vlivem závaží je tato hřídel namáhána na průhyb, proto je proveden jeho výpočet. Hřídel představuje nosník na dvou podporách zatížený uprostřed spojitým zatížením, kde podpory tvoří valivá ložiska a spojitě zatížení o délce kluzného pouzdra viz. obrázek č. 46. Výpočet tohoto průhybu jsem provedl dle Mohrova integrálu, dále pak dle výpočtu z katalogu Maytac a pomocí MKP metodu v programu Abaqus 6.12-1.



Obr. 46: Hřídel testovacího zařízení



2.2.1 Výpočet průhybu hřídele dle Mohrova integrálu

Pro výpočet průhybu hřídele je uvažována síla od maximálního závaží, které bude pro testování použito. Toto zatížení je zvoleno na základě provozních parametrů, které jsou typické pro vybraná testovaná kluzná pouzdra. Určení posuvu hřídele ve svislém směru vlivem zatížení v radiálním směru dostaneme pomocí Mohrova integrálu, kde známé veličiny pro tento výpočet jsou:

Síla působící na kluzné ložisko $F = 500 \text{ N}$

Délka $a = 23 \text{ mm}$

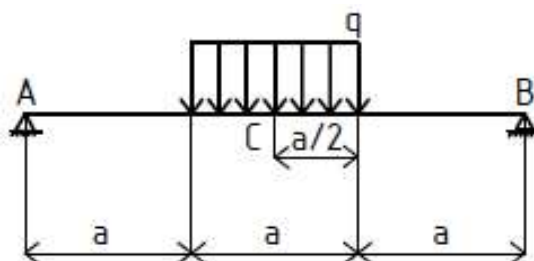
$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$

Důležitým parametrem pro výsledný průhyb hřídele je kvadratický moment průřezu. V tomto případě jde o kruhový průřez.

$$J = \frac{\pi \cdot d_h^4}{64} = 2485,05 \text{ mm}^4 \quad (2)$$

kde:

d_h je průměr hřídele [mm]



Obr. 47: Nosník zatížený spojitým zatížením (kluzným pouzdrem)

Reakce v bodě A a v bodě B vychází z rovnice rovnováhy pro svislé síly.

$$\sum F_y = R_a + R_b - F = 0 \quad [\text{N}] \quad (3)$$

$$R_a = R_b = \frac{F}{2} = 250 \text{ N} \quad (4)$$

kde:

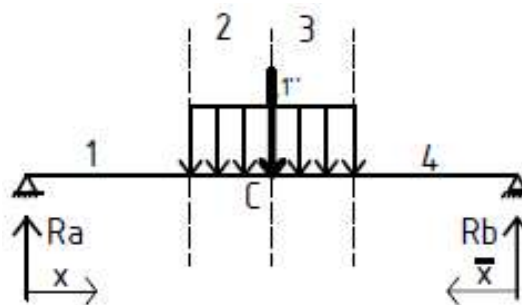
F_y jsou síly působící ve směru osy y (svislém směru) [N]

R_a je reakční síla v bodě A [N]

R_b je reakční síla v bodě B [N]



Nosník rozdělen na 4 části a zavedení souřadnic $\bar{x}$ a x :



Obr. 48: Nosník rozdělen na 4 pole

Průhyb v bodě C vyjádřen pomocí Mohrova integrálu:

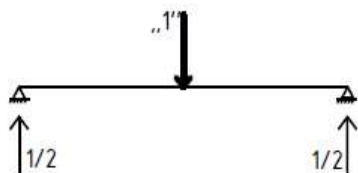
$$v_c = \int_l M_o(x) m_o(x) dx \quad [mm] \quad (5)$$

kde:

$M_o(x)$ je ohybový moment od zatížení [N.mm]

$m_o(x)$ je ohybový moment od jednotkové síly [N.mm]

Reakce od jednotkové síly:



Obr. 49: Zavedení jednotkové síly

Vyjádření ohybových momentů v jednotlivých polích 1 - 4:

$$\text{pole 1} \quad M_o(x) = Rax = \frac{q \cdot a}{2} x, \quad m_o(x) = \frac{x}{2} \quad (6)$$

$$\text{pole 2} \quad M_o(x) = Rax - \frac{q(x-a)^2}{2} = \frac{q \cdot a}{2} x - \frac{q}{2} (x-a)^2 = \frac{q}{2} (3ax - x^2 - a^2),$$

$$m_o = \frac{x}{2} \quad (7)$$



$$\text{pole 3} \quad M_o(\bar{x}) = \frac{q}{2}(3a\bar{x} - \bar{x}^2 - a^2), \quad m_o(\bar{x}) = \frac{\bar{x}}{2} \quad (8)$$

$$\text{pole 4} \quad M_o(\bar{x}) = \frac{q \cdot a}{2}\bar{x}, \quad m_o(\bar{x}) = \frac{\bar{x}}{2} \quad (9)$$

Jednotlivá pole dosadíme do Mohrova integrálu rovnice 5.4 a dostaneme:

$$v_c = \frac{1}{EJ} \left[\int_0^a \frac{q \cdot a}{2} x \frac{x}{2} dx + \int_a^{\frac{3}{2}a} \frac{q}{2} (3ax - x^2 - a^2) \frac{x}{2} dx \right] \cdot 2 \quad (10)$$

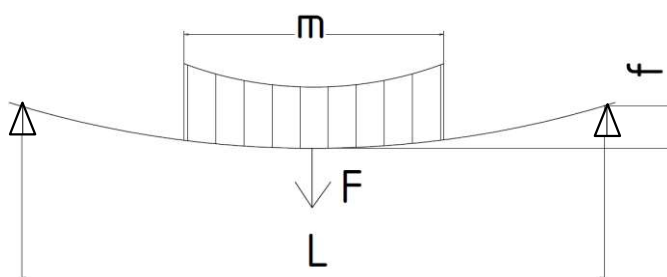
Výpočtem vyjádřený hledaný průhyb hřídele:

$$v_c = \frac{205}{384} \cdot \frac{F \cdot a^3}{EJ} = \frac{500 \cdot 23^3}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 2485,5} = 0,00622 \text{ mm} \quad (11)$$

2.2.2 Výpočet průhybu hřídele dle katalogu Maytec

Pro objektivitu výsledného průhybu hřídele při zatížení silou 500 N proveden výpočet také dle výpočtu z katalogu Maytec, kde se pro výsledný průhyb vychází z rovnice

$$f = \frac{F \cdot L^3}{\left(48 + \frac{29 \cdot m}{L}\right) \cdot E \cdot J} \quad (12)$$



Obr. 50: Výpočet průhybu hřídele dle Maytec [9]



kde známé veličiny pro tento výpočet jsou:

Síla působící na kluzné ložisko $F = 500 \text{ N}$

Délka hřídele mezi valivými ložisky $L = 69 \text{ mm}$

Délka kluzného ložiska $m = 23 \text{ mm}$

$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N.mm}^{-2}$

Kvadratický moment kruhového průřezu z rovnice 5.1 $J = 2485,05 \text{ mm}^4$

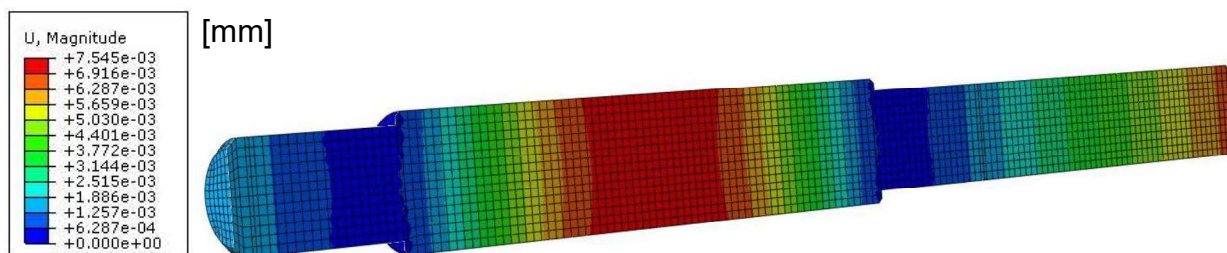
Výsledný průhyb f po dosazení do rovnice č. :

$$f = \frac{500 \cdot 69^3}{\left(48 + \frac{29,23}{69}\right) \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 2485,05} = 0,00508 \text{ mm} \quad (13)$$

2.2.3 Výpočet průhybu hřídele dle programu Abaqus

Dále jsem průhyb hřídele testovacího zařízení provedl pomocí MKP v programu Abaqus 6.12-1. Opět počítám se silou zatížení 500 N. Na obrázku č. 51 je patrné, že největší průhyb červenou barvou v místech pod kluzným pouzdrem, kde je největší hodnota průhybu hřídele $v=0,00754 \text{ mm}$.

Pro MKP analýzu byl využit zjednodušený model sestavy hřídele s testovaným kluzným pouzdrem. Hřídel byla uložena vetknutím v řídicích bodech, které byly přivazbené k plochám simulující uložení ve valivém ložisku. Na hřídel byl přivazbný model kluzného ložiska pomocí kontaktní vazby Tie. Spojité zatížení kluzného pouzdra bylo nahrazeno v referenčním bodě silou v radiálním směru. Tento řídicí bod byl přivazbený k hornímu opěrnému segmentu kluzného ložiska. Pro výpočet jsem použil síť s šestihrannými prvky přiměřené velikosti. Vzhledem k jednoduchosti úlohy bylo možné využít osu symetrie a tak byla úloha MKP modelována jako symetrická.



Obr. 51: Vykreslení průhybu hřídele



2.2.4 Souhrn výsledků průhybu hřídele pro jednotlivé výpočetní metody

Výsledný průhyb hřídele, který je zatížen v radiálním směru vlivem hmotností zavěšeného závaží byl vypočítán třemi způsoby. Výpočet průhybu hřídele pomocí Mohrova integrálu, pomocí metody MKP v programu Abaqus 6.12-1 a dle výpočtu průhybu hřídele uvedeném v katalogu Maytec.

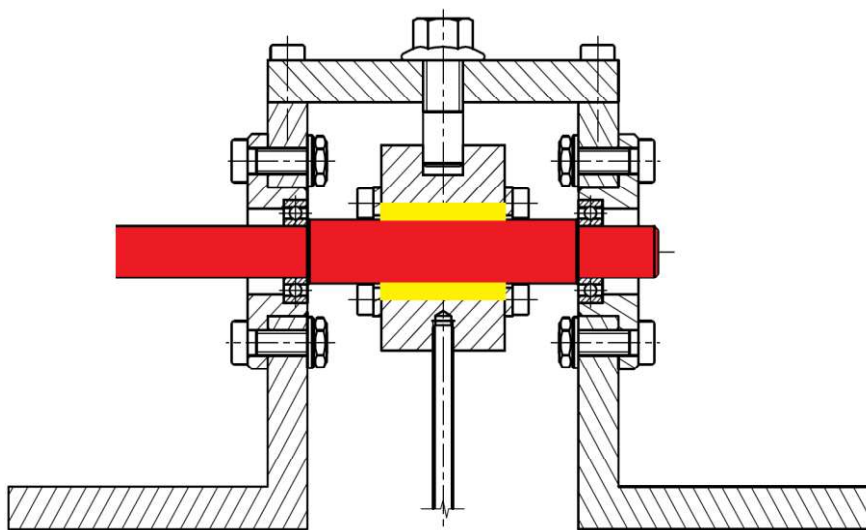
Jako referenční hodnotu průhybu hřídele volím výsledek určený výpočtem dle Mohrova integrálu. Referenční meze hodnoty průhybu pak podle metody MKP a podle výpočtu Maytec. Výsledná velikost průhybu je malá a tedy odchylky vzhledem k vypočtené velikosti průhybu lze považovat za zanedbatelné.

Výpočet	Hodnota průhybu [mm]	[%]
Mohrův Integrál	0,00622	0%
MKP	0,00754	18,07%
Výpočet dle Maytec	0,00508	21,30%

Tab. 1: Souhrn výsledků průhybu hřídele pro jednotlivé výpočetní metody

2.3 Analýza vzájemné interakce hřídele a kluzného pouzdra

Dále byla provedena MKP kontrola hřídele (červeně) a kluzného ložiska (žlutě) testovacího zařízení viz. obrázek č. 52. MKP výpočet byl proveden v programu abaqus 6.12-1.

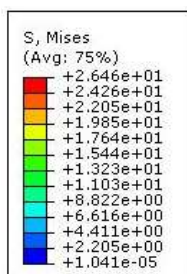


Obr. 52: Vyznačení částí zařízení pro MKP kontrolu

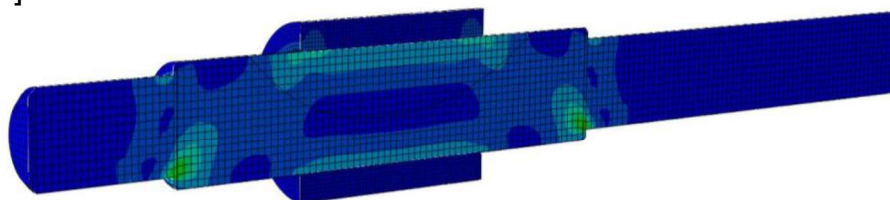
Z obrázku č. 53 je patrné, že k většímu výskytu napětí dochází v oblasti podpor, kde se hřídel opírá o valivá ložiska. U samotného testovaného kluzného pouzdra dochází k výskytu největšího napětí při okrajích vnitřního průměru ložiska



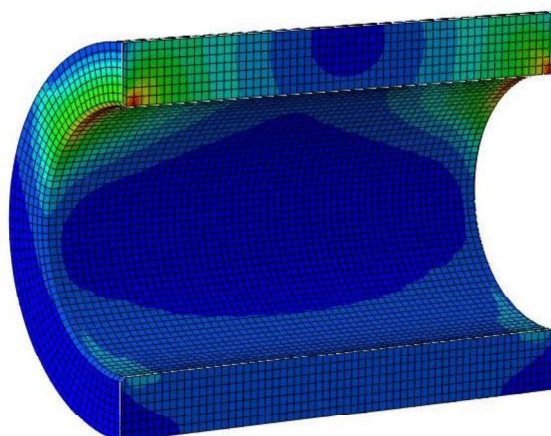
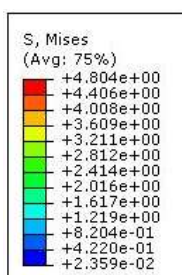
viz. obrázek č. 54. Maximální napětí u hřídele zařízení vzniká v místech podpor od valivých ložisek. Při vyvinutí síly 500 N vlivem závaží dosahuje toto napětí $2,646 \text{ N.mm}^{-2}$.



[N.mm⁻²]



Maximální napětí u kloubového pouzdra vzniká v místech zkosení. Při vyvinutí síly 500 N vlivem závaží dosahuje toto napětí $4,804 \text{ N.mm}^{-2}$.



Obr. 54: Vykreslení napětí na kluzném pouzdru

2.4 Vybraná kluzná pouzdra pro experimentální měření a valivá ložiska použitá k uložení hřídele test. zařízení

Pro toto experimentální měření byla vybrána tyto tři kluzná pouzdra:

- SKF slinutý bronz **PSM 152 230**
- HENNLICH iglidur **H tvar S HSM-1517-15**
- Elo Toman **B10 - 1525KU**

V této kapitole se budu věnovat jejich technickým parametrům, oblasti použití, výpočtu kluzných odporů, pevnostním výpočtům a výpočtu maximálních provozních parametrů v závislosti na $P \cdot v$ faktoru.



2.4.1 SKF slinutý bronz PSM 152 230

Materiál tohoto ložiska tvoří slinutá bronzová matrice. Tato matrice obsahuje plně napuštěné póry minerálním olejem, což znamená, že ložisko nepotřebuje vnější zdroj domazávání ani žádnou jinou údržbu. Přípustná kluzná rychlost pouzder ze slinutého bronzu dosahuje vysokých hodnot, proto jsou vhodná především při dynamickém zatížení. Kluzná pouzdra SKF Slinutý bronz se vyznačují řadou předností. Mezi zařízení, kde se toto ložisko používá patří:

- elektrické spotřebiče
- domácí spotřebiče
- tiskařské stroje
- obráběcí stroje



Obr. 55: kluzné ložisko SKF slinutý bronz

Výhody

- Samomazné vlastnosti
- Provoz bez domazávání
- Vysoké kluzné rychlosti
- Nízké tření
- Nízká cena



Nevýhody

- Náchylné na znečištěné prostředí
- Protikorozní odolnost
- Nízké provozní teploty
- Vysoká zatížení
- Rázové zatížení, vibrace
- Malé provozní vůle
- Malá schopnost vyrovnání nesouosost

Je důležité, aby toto ložisko nepřišlo během montáže a skladování do kontaktu s absorpčními materiály, které z nich mohou v krátké době odčerpat veškerý olej. Proto by se měla tato ložiska uchovávat co nejdéle v původním balení. Domazávání zpravidla není zapotřebí. SKF dodává kluzné pouzdro z tohoto materiálu jednak ve tvaru PSM, ale také ve tvaru PSMF viz obrázek č. 57 a obrázek č. 58.



Obr. 57: tvar PSM [13]



Obr. 56: tvar PSMF [13]

V následující tabulce jsou uvedeny technické parametry kluzného materiálu SKF slinutý bronz.

Součinitel tření	[μ]	0,05...0,10
Přípustné dynamické zatížení	[N/mm²]	10
Přípustné statické zatížení	[N/mm²]	50
Teplotní rozsah	[°C]	..-10...+100
Přípustná kluzná rychlost	[m/s]	0,25...10
Tolerance hřídele		f7-f8
Tolerance tělesa		H7
Povrchová drsnost hřídele	[μm]	0,2...0,8
Tvrдость hřídele	[HB]	200-300

Tab. 2: Technické parametry k.l. SKF slinutý bronz



Pro maximální otáčky kluzného pouzdra PSM 152 230 platí:

$$v_{\max} = \frac{\pi \cdot d \cdot n_{\max}}{60 \cdot 1000} \quad \Rightarrow \quad n_{\max} = \frac{v_{\max} \cdot 6 \cdot 10^4}{\pi \cdot d} = \frac{10 \cdot 6 \cdot 10^4}{\pi \cdot 15} = 12\,738,85 \text{ min}^{-1} \quad (14)$$

kde:

d je vnitřní průměr ložiska, $d=15\text{mm}$

Ložiska se při experimentálním měření budou podrobovat dynamickému zatěžování. Maximální přípustné dynamické zatížení pro kluzný materiál SKF slinutý bronz je 10 N/mm^2 . V závislosti na této hodnotě zatížení platí pro rozměr kluzného pouzdra PSM 152 230 maximální přípustná síla F_n v radiálním směru:

$$P = \frac{F_n}{S} = \frac{F_n}{d \cdot l} \quad \Rightarrow \quad F_n = P \cdot d \cdot l = 10 \cdot 15 \cdot 30 = 4500 \text{ N} \quad (15)$$

kde:

l je délka kluzného pouzdra SKF PSM 152 230

Pro třecí sílu, která vzniká na vnitřním poloměru tohoto ložiska při radiálním zatížení $F_n=500 \text{ N}$ platí následující vztah:

$$M_t = F_t \cdot r \quad (16)$$

$$F_t = \mu \cdot F_n \quad (17)$$

kde:

μ je konstantní součinitel tření pro kluzná ložiska, $\mu \Rightarrow 0,05-0,10$

r je vnitřní poloměr kluzného ložiska $r = 7,5\text{mm}$

Dosazením do rovnic č. a č. dostáváme třecí sílu pro kluzné pouzdro SKF slinutý bronz:

$$F_t = \mu \cdot F = 0,07 \cdot 500 = 35 \text{ N} \quad (18)$$

2.4.2 HENNLICH iglidur H tvar S HSM-1517-15

Jde o kluzná pouzdra z termoplastického materiálu, která mohou být použita zcela bez jakéhokoliv mazání. Tyto **pouzdra** najdou uplatnění především ve vlhkém



prostředí nebo přímo pod vodou. Toto vlhké prostředí má zároveň funkci mazacího přídavného prostředku. Jsou schopny pracovat při vysokých teplotách a jsou odolné vůči chemikáliím. V případě, že je na ložisko kladen důraz vůči vysokým odolnostem proti opotřebení, není tento typ kluzných pouzder výrobcem doporučen. Stejně tak pokud je kladen důraz na odolnost proti maximálním tlakům při vyšších teplotách.



Obr. 58: Kluzné ložisko Hennlich iglidur H

V následující tabulce jsou uvedeny technické parametry kluzného materiálu Hennlich iglidur H.

Základní vlastnosti		
Hustota	g/cm ³	1,64
Barva		šedá
Max. absorpce vlhkosti při 23°C	[%]	<0,1
Max. absorpce vlhkosti	[%]	0,3
Koeficient smykového tření	[-]	0,07 - 0,20
P.V faktor	[Mpa.m/s]	1,37
Mechanické vlastnosti		
Modul pružnosti	Mpa	12,5
Mez pevnosti v tahu při 20°C	Mpa	175
Pevnost v tlaku	Mpa	81
Max. statický povrchový tlak	Mpa	90
Tvrдость dle Shoreho		87
Fyzikální a tepelné vlastnosti		
Max. dlouhodobě působící teplota	°C	200
Max. krátkodobě působící teplota	°C	240
Min. teplota	°C	-40
Tepelná vodivost	W/m.K	0,6
Koeficient tepelné roztažnosti při 23°C	K ⁻¹ .10 ⁻⁵	4
Elektrické vlastnosti		
Specifická hodnota odporu	Ωcm	<10 ⁵
Peovrchový odpor	Ω	<10 ²

Tab. 3: Technické parametry k.l. Hennlich iglidur H



To, jakým způsobem bude kluzné ložisko v průběhu zkoušky zatěžováno bude vycházet z předpokladu, jakou maximální hodnotu $P.v$ [$N/mm^2.m/s$] výrobce u tohoto ložiska uvádí. Jde o součin provozního zatížení P a obvodové rychlosti v . Obecně se dá říci, že čím větším zatížením P bude ložisko namáháno, tím menší musí být obvodová rychlost v ložiska tak, aby byla dodržena tato maximální hodnota $P.v$. To platí i obráceně. Čím vyšší bude obvodová rychlost ložiska v , tím menší musí být zatížení ložiska P .

Maximální $P.v$ hodnota pouzdra Hannlich iglidur H, tvar S při použití za sucha je $1,37 N/mm^2.m/s$. Maximální obvodová rychlost v_{max} pro trvalý rotační pohyb je $1 m/s$. Pro maximální otáčky n_{max} testovaného kluzného ložiska platí:

$$v_{max} = \frac{\pi \cdot d \cdot n_{max}}{60 \cdot 1000} \quad \Rightarrow \quad n_{max} = \frac{v \cdot 6 \cdot 10^4}{\pi \cdot d} = \frac{1,6 \cdot 10^4}{\pi \cdot 15} = 1273,24 \text{ min}^{-1} \quad (19)$$

kde:

d je vnitřní průměr ložiska, $d=15mm$

Při dodržení maximální $P.v$ hodnoty při použití otáček n_{max} platí pro maximální zatížení P :

$$P.v = 1,37 \frac{N}{mm^2} \cdot \frac{m}{s} \quad \Rightarrow \quad P = \frac{1,37}{v_{max}} = \frac{1,37}{1} = 1,37 \frac{N}{mm^2} \quad (20)$$

kde:

P je zatížení ložiska při dodržení $P.v$ hodnoty

Pro maximální hodnotu síly F_n , kterou se v radiálním směru kluzné ložisko zatěžuje pak platí:

$$P = \frac{F_n}{S} = \frac{F_n}{d \cdot l} \quad \Rightarrow \quad F_n = P \cdot d \cdot l = 1,37 \cdot 15 \cdot 15 = 308,25 \text{ N} \quad (21)$$

kde:

l je délka ložka, $l=15mm$



Pro třecí sílu, která vzniká na vnitřním poloměru tohoto ložiska při radiálním zatížení $F_n=500\text{ N}$ platí následující vztah:

$$M_t = F_t \cdot r \quad (22)$$

$$F_t = \mu \cdot F_n \quad (23)$$

kde:

μ je konstantní součinitel tření pro kluzná ložiska, $\mu \Rightarrow 0,07-0,20$

r je vnitřní poloměr kluzného ložiska $r = 7,5\text{ mm}$

Dosazením do rovnic č. a č. dostáváme třecí sílu a třecí moment pro kluzné pouzdro HENNLICH iglidur H:

$$F_t = \mu \cdot F = 0,14 \cdot 500 = 70\text{ N} \quad (24)$$

2.4.3 Elo Toman B10 - 1525KU

Jde o třívrstvé ložisko skružené z kovového pásu s vrstvou PTFE. Dá se použít především tam, kde je obtížné přivádět pro kluzné pouzdro mazání. Je důležité aby při montáži těchto ložisek nedošlo k poškození tenké vrstvy, která tvoří funkční povrch.



Obr. 59: Kluzné ložisko Elo Toman



V následující tabulce jsou uvedeny technické parametry kluzného materiálu ELO Toman s vrstvou PTFE.

Maximální zatížení	Statické	[Mpa]	250
	Velmi nízké rychlosti	[Mpa]	140
	Rotační oscilace	[Mpa]	60
Maximální zatížení bez použití maziva	Krátkodobý provoz	[Mpa.m/s]	3,6
	Dlouhodobý provoz	[Mpa.m/s]	1,8
Teplotní rozsah		[°C]	..- 195...+280
Maximální rychlost	bez maziva	[m/s]	2
	s mazivem	[m/s]	>2
Tepelná vodivost		[W(m.K) ⁻¹]	42
Koeficient tření		[-]	0,03-0,20

Tab. 4: Technické parametry k.l. Elo Toman

Mezi hlavní přednosti těchto kluzných ložisek patří možnost jejich provozu bez nutnosti přívodu maziva, velký teplotní rozsah a vysoký stupeň tepelné vodivosti. Elo Toman nabízí tyto ložiska ve speciálním provedení s podkladem z nerez oceli nebo z bronzu a možnost kluzné vrstvy bez olova. Tyto ložiska nacházejí využití u:

- pákové zdviháky
- osobní výtahy
- hydraulická čerpadla
- pneumatické válce
- textilní stroje

Stejně jako testování kluzného pouzdra HANNLICH iglidur H vychází z $P.v$ hodnoty tak i způsob simulování provozních parametrů při testování kluzného pouzdra Elo Toman B10 bude vycházet z této hodnoty, která je pro případ použití ložiska bez přivádění maziva 1,8 N/mm².m/s

Maximální obvodová rychlost v_{max} pro trvalý rotační pohyb za sucha je 2 m/s. Pro maximální otáčky n_{max} testovaného kluzného ložiska platí:

$$v_{max} = \frac{\pi \cdot d \cdot n_{max}}{60 \cdot 1000} \Rightarrow n_{max} = \frac{v \cdot 6 \cdot 10^4}{\pi \cdot d} = \frac{2 \cdot 6 \cdot 10^4}{\pi \cdot 15} = 2546,48 \text{ min}^{-1} \quad (25)$$



kde:

d je vnitřní průměr ložiska, $d=15mm$

Při dodržení maximální $P.v$ hodnoty při použití otáček n_{max} platí pro maximální zatížení P :

$$P.v = 1,8 \frac{N}{mm^2} \cdot \frac{m}{s} \quad \Rightarrow \quad P = \frac{1,8}{v_{max}} = \frac{1,8}{2} = 0,9 \frac{N}{mm^2} \quad (26)$$

kde:

P je zatížení ložiska při dodržení $P.v$ hodnoty

Pro maximální hodnotu síly F_n , kterou se v radiálním směru kluzné ložisko zatěžuje pak platí:

$$P = \frac{F_n}{S} = \frac{F_n}{d.l} \quad \Rightarrow \quad F_n = P.d.l = 0,9.15.15 = 202,5 \text{ N} \quad (27)$$

kde:

l je délka ložka, $l=15mm$

Pro třecí sílu, která vzniká na vnitřním poloměru tohoto ložiska při radiálním zatížení $F_n=500 \text{ N}$ platí následující vztah:

$$M_t = F_t.r \quad (28)$$

$$F_t = \mu.F_n \quad (29)$$

kde:

μ je konstantní součinitel tření pro kluzná ložiska, $\mu \Rightarrow 0,03 - 0,08$

r je vnitřní poloměr kluzného ložiska $r = 7,5mm$

Dosazením do rovnic č. a č. dostáváme třecí sílu a třecí moment pro kluzné pouzdro ELO Toman:

$$F_t = \mu.F = 0,12.500 = 60 \text{ N} \quad (30)$$



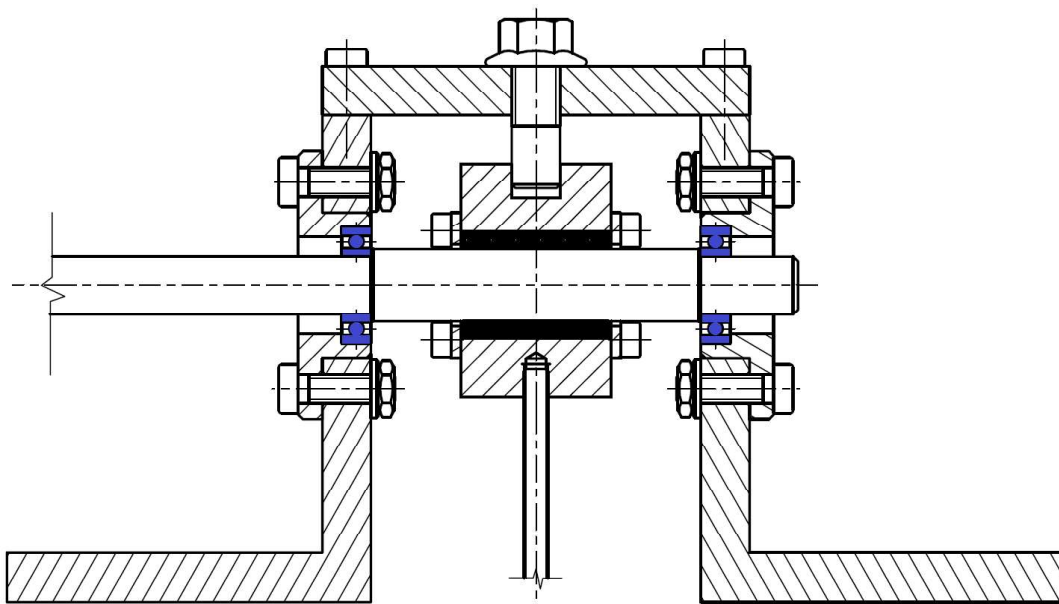
2.4.4 Valivá jednořadá ložiska SKF 61901 použitá v podporách hřídele

Pro uložení hřídele testovacího zařízení byla použita valivá jednořadá ložiska SKF 61901.



Obr. 60 Valivá jednořadá ložiska SKF 61901

Tyto ložiska mají daleko větší únosnosti, než má testované kluzné pouzdro. To znamená, že pokud se překročí únosnost testovaného ložiska, nebude výrazně ovlivněno toto valivé ložisko, ve kterém je uložena hřídel. Na obrázku č. 7.2 valivá ložiska zobrazena modře.



Obr. 61: SKF 61901 v podporách hřídele zobrazena modře



Výpočet třecího momentu kuličkových ložisek

Pro výpočet třecího momentu těchto ložisek je důležitým parametrem dynamické zatížení kuličkového ložiska v radiálním směru. V tomto případě se vychází ze zatížení kluzného ložiska radiální silou 500 N. Proto bude dynamické zatížení působící na jednořadá valivá kuličková ložiska 250 N. Viz rovnice č. 31.

$$M_t = \mu \cdot F \cdot \frac{d_k}{2} = 0,0015 \cdot 250 \cdot \frac{12}{2} = 2,25 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (31)$$

kde:

μ je konstantní součinitel tření pro valivá jednořadá kuličková ložiska, $\mu=0,0015$

F je dynamické zatížení kuličkového ložiska v radiálním směru, $F = 250 \text{ N}$

d_k je vnitřní průměr kuličkového ložiska, $d=12 \text{ mm}$

Výpočet trvanlivosti jednořadých ložisek SKF 61901 použitých v podporách hřídele

U ložisek se kontroluje jejich základní trvanlivost. Je to počet provozních hodin nebo otáček, než se projeví první známky únavy povrchu materiálu kroužků nebo valivých tělísek. Životnost je skutečná doba provozu až do vyřazení z jiných důvodů, než jsou známky únavy, například velká hlučnost, velká radiální vůle. Může být výrazně kratší než je základní trvanlivost vlivem přetížení, nesprávné montáže, nedostatečného mazání a podobně. Životnost, ale může být i výrazně větší. [18].

Označení L10 se používá proto, že hodnota C je udávána v katalogích ložisek obvykle pro pravděpodobnost poruchy $H = 10 \%$.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (32)$$

$$L_{10H} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (33)$$



kde:

L_{10} je trvanlivost ložiska v milionech otáčkách

L_{10H} je trvanlivost ložiska v hodinách

C je základní dynamická únosnost ložiska $C=2,25$ N (z katalogu ložisek)

P je zatížení ložiska $P=250$ N

p je exponent typu ložiska, kuličkové = 3

n jsou maximální laboratorního standu $n=2500$ min⁻¹

Dosazením do rovnic č. 32 a č. 33 dostaneme trvanlivost jednořadého valivého tohoto zařízení v milionech otáčkách a v hodinách.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \left(\frac{2250}{250}\right)^3 = 729 \text{ mil ot}^{-1}$$

$$L_{10H} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} = 4860 \text{ Hodin}$$



3 Metodika testování

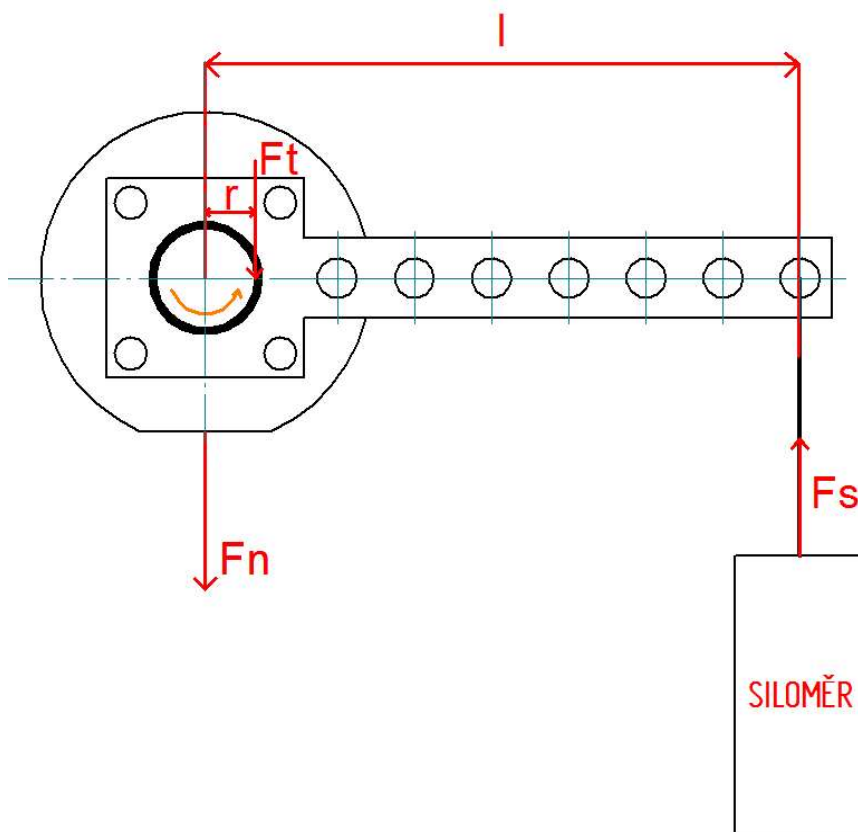
V této kapitole je při popisu metodiky experimentálního měření pojednáno dle odstavce 2.2 publikace [17]

3.1 Vypracování teoretických východisek problému

V následující tabulce jsou uvedeny jednotlivé fyzikální veličiny popisující funkci zařízení pro testování kluzných ložisek.

Značka	Jednotka	Název
MFs	[N.mm]	Měřený moment
Mt	[N.mm]	Třecí moment
Fs	[N]	Měřená síla
Fn	[N]	Normálová síla (od závaží)
Ft	[N]	Třecí síla
l	[mm]	Délka ramene
r	[mm]	Poloměr k. l. (vnitřní)
μ	[-]	Součinitel tření k. l.

Tab. 5: Fyzikální veličiny popisující funkci experimentálního zařízení



Obr. 62: Určení třecí síly a součinitele tření

Celé toto měření vychází z předpokladu, že třecí moment kluzného pouzdra M_t , tedy třecí síla F_t působící na vnitřním poloměru r tohoto kluzného pouzdra je v rovnováze s momentem M_{FS} , který je dán součinem naměřené síly F_s na siloměru a ramene l viz. obrázek č. 62. Rovnováha těchto dvou rovnic nám dává jednu neznámou, třecí sílu F_t , z které jsme schopni dopočítat součinitel tření μ , protože známe normálovou sílu F_N , tedy sílu vyvolanou závažím. Součinitel tření μ je pak roven podílu třecí síly F_t a normálové síly F_N .

Moment M_{FS} :

$$M_{FS} = F_s \cdot l \quad (34)$$

Moment M_t :

$$M_t = F_t \cdot r \quad (35)$$

Rovnováha momentů M_{FS} a M_t :

$$M_{FS} = M_t \quad (36)$$

Po dosazení do momentů M_{FS} a M_t dostáváme rovnováhu:

$$F_s \cdot l = F_t \cdot r \quad (37)$$

Z rovnováhy rovnice č. 37 vyjádříme třecí sílu F_t :

$$F_t = \frac{F_s \cdot l}{r} \quad (38)$$

Třecí síla F_t :

$$F_t = F_n \cdot \mu \quad (39)$$

Součinitel tření:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (40)$$

$$\mu = \frac{F_s \cdot l}{F_n \cdot r} \quad (41)$$



3.2 Určení cílů měření

Cíle tohoto experimentálního měření jsou:

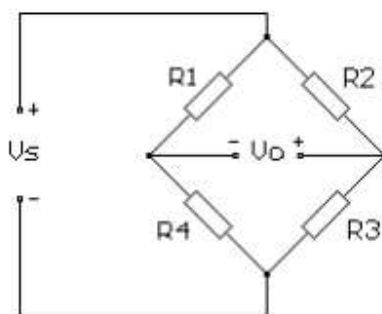
- Kvalitativní porovnání nízkonákladových kluzných ložisek od různým výrobců z odlišných kluzných materiálů.
- Verifikace provozních parametrů udávané výrobcí těchto kluzných ložisek.
- Výstupní grafická závislost součinitele tření kluzných ložisek na čase pro jednotlivé otáčky hřídele a jednotlivá měrná zatížení v radiálním směru.
- Výstupní grafická závislost teploty kluzných ložisek na čase pro jednotlivé otáčky hřídele a jednotlivá měrná zatížení v radiálním směru.

3.3 Stanovení typu a počtu potřebných senzorů

Z teoretických východisek tohoto experimentálního měření je patrné, že půjde o měření reakčního momentu k třecímu momentu kluzného ložiska. Měření tohoto momentu se provádí měřením síly F_s působící na rameni I pomocí snímače síly HBM S2. Měření teploty kluzného ložiska je realizováno pomocí termočlánu typu K.

3.3.1 Snímač síly HBM S2

Snímač síly S2 od firmy HBM je schopný měřit síly v rozsahu 0 - 100 N. Jde o tenzometrický snímač, kde jsou tenzometry zapojené do Wheatstonova můstku, který se skládá ze dvou napěťových děličů R1-R4 a R2-R3. Výstupní napětí (naměřená síla) je pak tvořeno rozdílem jednotlivých děličů. Nastane-li případ, že dojde k stejné změně u obou děličů na výstupním napětí se to neprojeví. Díky tomuto uspořádání Wheatstonova můstku nemá teplota vliv na naměřenou hodnotu výstupního napětí, protože při působení tepla na tenzometry bude toto teplo působit na všechny čtyři tenzometry, což znamená, že změna odporu tenzometrů bude stejná.



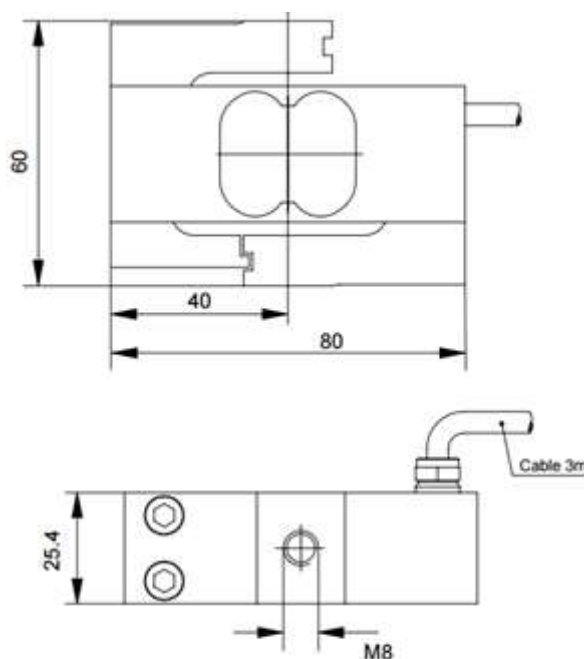
Obr. 63: Zapojení Wheatstonova můstku



Tento siloměr je tvořen hliníkovým tělem. Uspořádání jednotlivých tenzometrů je pak zřejmé z obrázku č. 64.



Obr. 64: Snímač síly HBM S2 + vyznačení tenzometrů [21]



Obr. 65: Zákl. rozměry snímače síly HBM

Kalibrace snímače síly HBM S2 (100 N)

Jmenovitá citlivost tohoto snímače je 2 mV/V. Kalibrace proběhla odečítáním hodnot normovaného napětí [$\mu\text{V/V}$] pro jednotlivé hodnoty závaží, které byly za snímač zavěšené. Závislost těchto hodnot hmotnosti na snímačem vysílaném napětí byla vynesena do grafu. Proložení spojnicí trendu těmito body dostáváme lineární funkci ve tvaru $f(x)=k \cdot x+q$, kde parametr k představuje tzv. směrnici přímky lineární



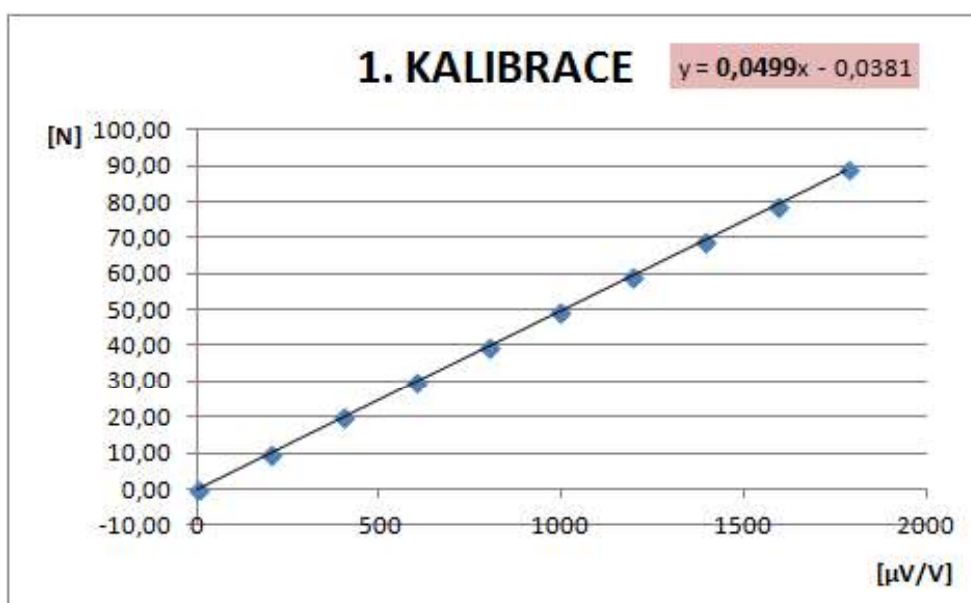
závislosti. Jde o koeficient, kterým se následně budou při experimentu přepočítávat naměřené hodnoty napětí [μV] na sílu [N]. Kalibrace proběhla třikrát.

Naměřené hodnoty napětí odpovídající síle vyvolané závažím při první kalibraci.

1. Kalibrace		
Hmotnost [Kg]	Síla [N]	Napětí [$\mu\text{V/V}$]
0	0,00	0,1
1,0019	9,83	198
2,0113	19,72	396
3,0214	29,63	594
4,0265	39,49	793,5
5,0312	49,34	990,2
6,0389	59,22	1189
7,0478	69,12	1387
8,0533	78,98	1584
9,0617	88,86	1782
8,0533	78,98	1584
7,0478	69,12	1387
6,0389	59,22	1189
5,0312	49,34	990,4
4,0265	39,49	792,6
3,0214	29,63	595,2
2,0113	19,72	396,6
1,0019	9,83	198,4
0	0,00	0,1

Tab. 6: 1. Kalibrace snímače síly HBM S2

Grafická závislost síly na naměřeném napětí a určení parametru k při první kalibraci.



Obr. 66: 1. Kalibrace snímače síly HBM S2

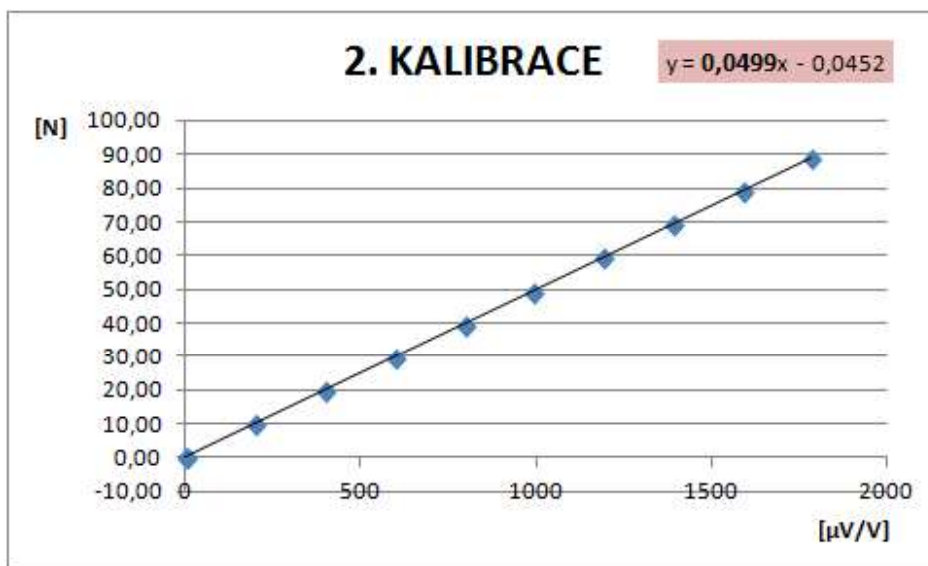


Naměřené hodnoty napětí odpovídající síle vyvolané závažím při druhé kalibraci.

2. Kalibrace		
Hmotnost [Kg]	Síla [N]	Napětí [$\mu\text{V/V}$]
0	0,00	0,1
1,0019	9,83	198,2
2,0113	19,72	396,6
3,0214	29,63	595,2
4,0265	39,49	792,8
5,0312	49,34	990,2
6,0389	59,22	1189
7,0478	69,12	1387
8,0533	78,98	1584
9,0617	88,86	1782
8,0533	78,98	1584
7,0478	69,12	1387
6,0389	59,22	1189
5,0312	49,34	990,4
4,0265	39,49	792,8
3,0214	29,63	595,4
2,0113	19,72	396,6
1,0019	9,83	198,2
0	0,00	0,2

Tab. 7: 2. Kalibrace snímače síly HBM S2

Grafická závislost síly na naměřeném napětí a určení parametru k při druhé kalibraci.



Obr. 67: 2. Kalibrace snímače síly HBM S2

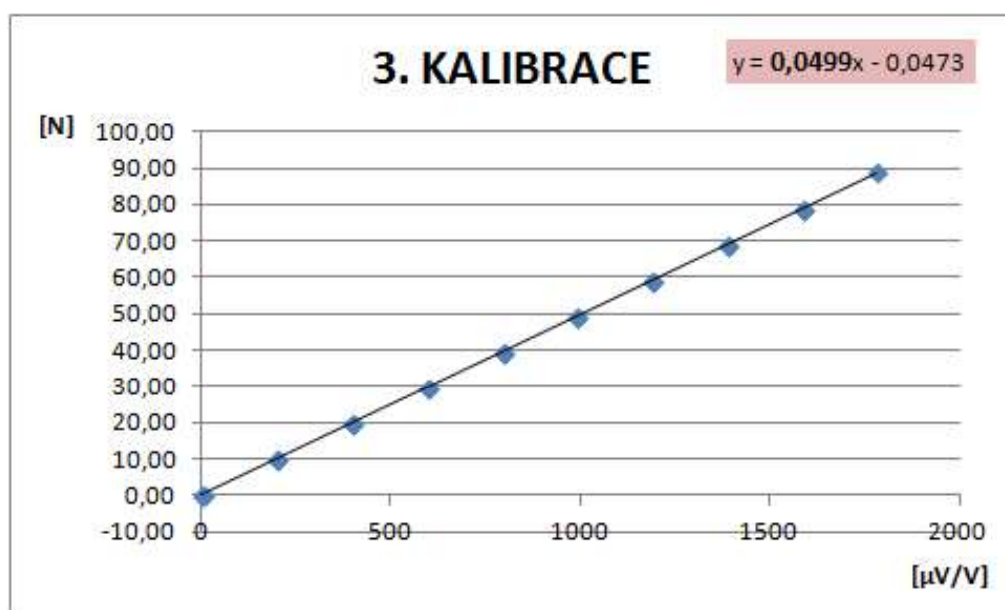


Naměřené hodnoty napětí odpovídající síle vyvolané závažím při třetí kalibraci.

3. Kalibrace		
Hmotnost [Kg]	Síla [N]	Napětí [$\mu\text{V/V}$]
0	0,00	0,1
1,0019	9,83	198
2,0113	19,72	396,5
3,0214	29,63	595,2
4,0265	39,49	792,8
5,0312	49,34	990,4
6,0389	59,22	1188
7,0478	69,12	1387
8,0533	78,98	1584
9,0617	88,86	1782
8,0533	78,98	1584
7,0478	69,12	1387
6,0389	59,22	1189
5,0312	49,34	990,2
4,0265	39,49	792,8
3,0214	29,63	595,4
2,0113	19,72	396,6
1,0019	9,83	198,2
0	0,00	0,2

Tab. 8: 3. Kalibrace snímače síly HBM S2

Grafická závislost síly na naměřeném napětí a určení parametru k při třetí kalibraci.



Obr. 68: 3. Kalibrace snímače síly HBM S2

Výsledná hodnota koeficientu k je dána průměrem koeficientů z těchto tří kalibrací.

	KOEFICIENT k
1. KALIBRACE	0,0499
2. KALIBRACE	0,0499
3. KALIBRACE	0,0499
CELK. KALIBRACE	0,0499

Tab. 9: Koeficient k lineární rovnice

Uchycení snímače síly HBM S9

Pro možnost změny velikosti měřeného reakčního momentu M_{Fs} je snímač k rámu uchycen tak, aby se dala měnit velikost ramene l tohoto moment viz. obr. č. 69.



Obr. 69: Posuvné uchycení snímače síly HBM S2



3.3.2 Termočlánek typu K

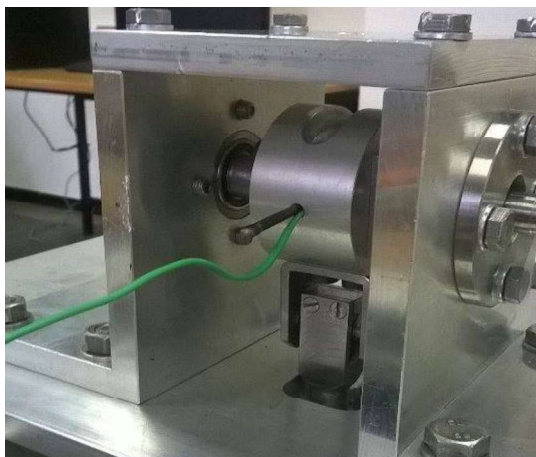
Pro měření teploty testovaného kluzného ložiska je použitý termočlánek typu K. Tento snímač teploty měří teplotu na základě termoelektrického jevu, kde má v uzavřeném el. obvodu z dvou různých kovů každý kov různou teplotu. U termočlánu typu K jde o obvod složený z chromového a niklového vodiče. Tímto obvodem teče proud. Pokud tento obvod rozpojíme, jsme schopni měřit hodnoty termonapětí, které jsou dány rozdílem teploty mezi spoji t_a a t_b . Jeden vodič je vložený do prostředí s referenční teplotou (místnost cca 25 °C) a druhý je vložený do prostředí, kde chceme změřit teplotu. Výsledné termonapětí U_{ab} můžeme vyjádřit vztahem:

$$U_{ab} = k \cdot (t_a - t_b)$$

kde:

k je kalibrační konstanta závisící na typu termočlánu

Termočlánek typu K dokáže měřit teploty v rozmezí - 200 °C až 1250 °C. Do vnějšího kroužku, který je nasunutý na testovaném kluzném pouzdru je vyvrtána díra, do které je vložen vodič termočlánu K viz. obrázek č. 70.



Obr. 70: Umístění termočlánu

3.4 Navržení způsobu dosažení provozních podmínek

Dosažení provozních podmínek bylo provedeno řízením dvěma provozními parametry, kterými jsou otáčky na hřídeli, na kterou je testované ložisko nasunuto a zatížení ložiska v radiálním směru. Tato hřídel je spojena pomocí hřídelové spojky (viz. příloha č. 2) se servomotorem festo 550 115 EMMS-AS-70-S-RM (viz. příloha č. 2), který určuje velikost otáček, kterými bude ložisko zatěžováno. Zatížení v radiálním



směru vyvolává závaží, které je uchycené za vnější kroužek testovaného ložiska. Velikost zatížení je dáno velikostí závaží.

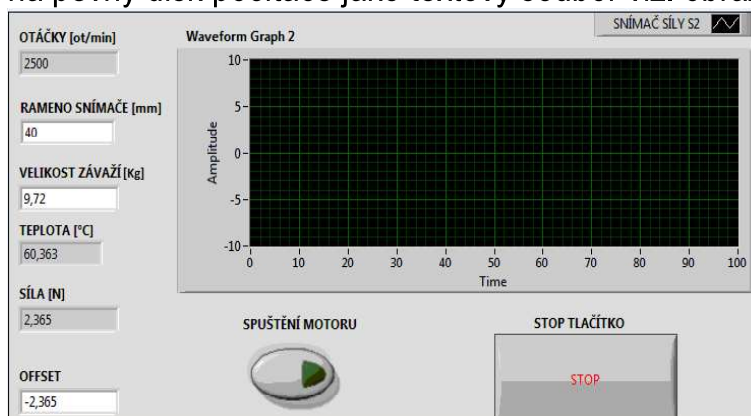
Při experimentu vychází velikost hodnot těchto provozních parametrů u testovaných ložisek HENNLICH iglidur H tvar S HSM-1517-15 a Elo Toman B10 - 1525KU z předem vypočítaných provozních parametrů v kapitole č. 2.4. Každý zkušební cyklus pro jednotlivá testovaná kluzná pouzdra se skládá z těchto částí:

1. Provozní cyklus pro 1000 ot/min při radiálním zatížení vlivem závaží 5 - 50 kg vždy po 5 kg na dobu 3 minut.
2. Provozní cyklus pro 2000 ot/min při radiálním zatížení vlivem závaží 5 - 50 kg vždy po 5 kg na dobu 3 minut.
3. Provozní cyklus pro 2500 ot/min při radiálním zatížení vlivem závaží 5 - 50 kg vždy po 5 kg na dobu 3 minut.

V případě, že je v daném cyklu dosaženo nějakých mezních provozních parametrů měřicího stanoviště přenosu výkonu kluzného ložiska dříve, než je cyklus dokončen, testování je ukončeno dříve.

3.5 Snímání a archivace dat

Snímání měřených veličin síly [N] reakčního momentu M_{Fs} a teploty ložiska [°C] je realizováno pomocí počítače, který je doplněný o měřící kartu. Signály snímačů měřených veličin jsou upraveny tak, aby je mohla snímat měřící karta. Řídící a měřící systém SW je naprogramován v prostředí LabVIEW (National Instruments). Čelní ovládací panel toho programu je na obrázku č. 71. Měřená data jsou snímána se vzorkovací frekvencí 0,5 s a vždy po ukončení jednoho cyklu jsou zaznamenávána na pevný disk počítače jako textový soubor viz. obrázek č. 72.



Obr. 71: Čelní panel ovládacího SW



Textový soubor je vypsaný do sloupce, kde jednotlivé sloupce zleva znamenají: čas, naměřená síla, hmotnost závaží, otáčky, velikost ramene a naměřená teplota.

20160509-172334-SKF1-24,3-2500-40-3_čítač – Poznámkový blok					
Soubor	Úpravy	Formát	Zobrazení	Nápověda	
0,000	15,724	24,300	2500,000	40,000	81,700
0,500	15,717	24,300	2500,000	40,000	81,697
1,000	15,715	24,300	2500,000	40,000	81,643
1,500	15,787	24,300	2500,000	40,000	81,602
2,000	15,698	24,300	2500,000	40,000	81,569
2,500	15,706	24,300	2500,000	40,000	81,522
3,000	15,748	24,300	2500,000	40,000	81,482
3,500	15,759	24,300	2500,000	40,000	81,436
4,000	15,772	24,300	2500,000	40,000	81,391
4,500	15,693	24,300	2500,000	40,000	81,352
5,000	15,694	24,300	2500,000	40,000	81,306
5,500	15,780	24,300	2500,000	40,000	81,257
6,000	15,761	24,300	2500,000	40,000	81,224
6,500	15,749	24,300	2500,000	40,000	81,185
7,000	15,725	24,300	2500,000	40,000	81,133
7,500	15,715	24,300	2500,000	40,000	81,082
8,000	15,801	24,300	2500,000	40,000	81,039
8,500	15,715	24,300	2500,000	40,000	81,009
9,000	15,725	24,300	2500,000	40,000	80,962
9,500	15,763	24,300	2500,000	40,000	80,916
10,000	15,772	24,300	2500,000	40,000	80,875
10,500	15,781	24,300	2500,000	40,000	80,836
11,000	15,715	24,300	2500,000	40,000	80,794
11,500	15,709	24,300	2500,000	40,000	80,741
12,000	15,806	24,300	2500,000	40,000	80,710
12,500	15,750	24,300	2500,000	40,000	80,669

Obr. 72: Textový dokument s výsledky měření

3.6 Navržení kritérií hodnocení přenosu výkonu

Při tomto experimentálním měření byla navržena omezující kritéria hodnocení přenosu výkonu:

- kritérium tepelných účinků
- kritérium opotřebení
- kritérium deformace

Teplota testovaného ložiska výrazně vypovídá o jeho stavu opotřebení a v závislosti na její hodnotě bude docházet k deformaci kluzného ložiska. Dá se předpokládat, že se zvyšující se teplotou opotřebení poroste rychleji. O tom nejvíce



vypovídá výstupní grafická charakteristika závislosti teploty kluzného ložiska na součiniteli tření.

3.7 Stanovení způsobu řízení experimentu a zajištění proti havárii

Řízení otáček servomotoru je realizováno na čelním panelu programu LabVIEW. Velikost otáček servomotoru pak odpovídá zapsané hodnotě v poli otáčky. Řízení zatěžování ložiska v radiálním směru je realizováno manuálně přidáváním a odebráním závaží.

Zajištění proti havárii je provedeno omezením otáček servomotoru na 3000 ot/min. V případě havárie je pak k dispozici STOP tlačítko.

3.8 Navržení sledu jednotlivých kroků při měření

Při experimentálním měření byly testovány tři kluzná ložiska od každého typu. Bylo postupováno podle následujících kroků:

1. Upnutí testovaného kluzného ložiska do testovacího zařízení.
2. Zapnutí PC, laboratorního zdroje, měřícího zesilovač pro tenzometrický snímač síly, propojení termočlásku s PC pomocí WIFI rozhraní.
3. Manuální nasunutí závaží určené pro záběh testovaného ložiska.
4. Otevření řídicího SW s ovládacím čelním panelem.
5. V ovládacím panelu nastavení hodnot použitého závaží, velikosti ramene, za který je snímač síly uchycený a velikost otáček určených pro záběh testovaného ložiska.
6. Spuštění řídicího programu.
7. Provedení offsetu naměřené síly snímačem HBM S2
8. Spuštění servomotoru tlačítkem na čelním panelu..
9. Po ustálení naměřených hodnot snímačem síly ukončit záběh ukončením měření tlačítkem na čelním panelu.
10. Vyčkat na vychladnutí testovaného ložiska na 30 °C.
11. Zahájení samotného testování. Manuální nasunutí závaží o hodnotě 5 Kg.
12. V ovládacím panelu nastavení hodnot otáček 1000 ot/min, závaží 5 Kg a rameno 40 mm.
13. Spuštění řídicího programu.



14. Provedení offsetu naměřené síly snímačem HBM S2.
15. Spuštění servomotoru tlačítkem na čelním panelu.
16. Ukončení testu po 3 min. tlačítkem na čelním panelu.
17. Následně provést znovu krok 11 až 16 s navyšováním závaží po 5 Kg až do 50 Kg.
18. Celý cyklus měření 11 až 17 provést pro 2000 a 2500 ot/min.

3.9 Navržení vhodného systému záznamů o průběhu měření

Celý systém měření je navržený tak, aby se dalo zpětně jednoduše dohledávat jednotlivá měření v příslušném cyklu, pro dané ložisko při nastavení různých provozních podmínek. Snadnou orientaci v jednotlivých cyklech umožňuje název textového dokumentu s výsledky měření, který má tento tvar:

typ ložiska - číslo vzorku - velikost zatížení - velikost otáček - velikost ramene - čas testu

Např. název textového dokumentu s výsledky experimentálního měření SKF-2 - 2500 - 19,37 - 40 - 3 vypovídá o tom, že jde o měření druhého ložiska SKF slinutý bronz při zatížení 2500 ot/min, vlivem závaží 19,37 kg, uchycením snímače síly na rameni o délce 40 mm po dobu testu tří minut.

3.10 Navržení způsobu zpracování naměřených dat

Textový soubor naměřených veličin je následně zpracován v programu Microsoft Office 2007, kde jsou provedeny další kroky zpracování dat, jako je přepočítání naměřené síly na součinitel pro jednotlivé hodnoty naměřené síly vždy po 0,5 s a vynesení grafických závislostí jednotlivých parametrů.

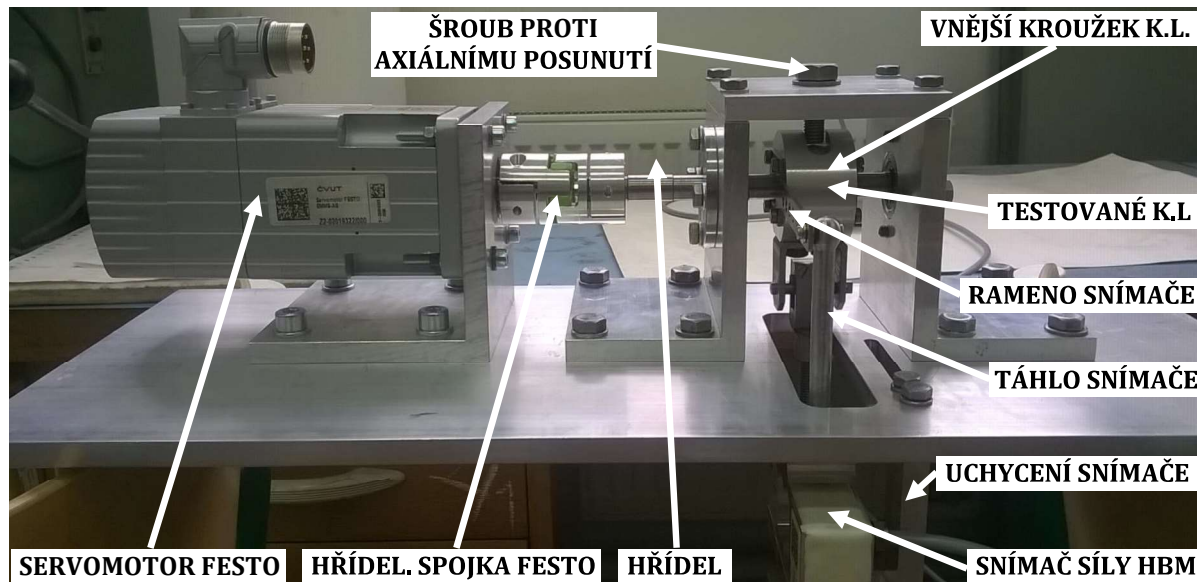
HEN1-SOUČINITEL TŘENÍ [-]										
ZATÍŽENÍ PŘI 1000 ot/min										
SÍLA V RADIALNÍM SMĚRU [N]										
čas [s]	47,76	95,32	142,20	189,95	238,30	285,96	333,13	381,48	430,02	477,58
0,5	0,151	0,119	0,121	0,125	0,098	0,094	0,103	0,090	0,232	0,155
1	0,154	0,118	0,119	0,125	0,096	0,095	0,103	0,093	0,229	0,153
1,5	0,152	0,118	0,125	0,125	0,098	0,095	0,102	0,090	0,222	0,154
2	0,151	0,120	0,121	0,125	0,097	0,095	0,104	0,092	0,223	0,156
2,5	0,152	0,116	0,123	0,124	0,099	0,095	0,103	0,093	0,218	0,158
3	0,152	0,119	0,125	0,125	0,097	0,094	0,104	0,089	0,220	0,162
3,5	0,150	0,119	0,124	0,126	0,100	0,094	0,104	0,093	0,226	0,168
4	0,150	0,119	0,123	0,126	0,099	0,094	0,104	0,093	0,213	0,174
4,5	0,150	0,120	0,123	0,126	0,100	0,094	0,104	0,092	0,217	0,187
5	0,148	0,121	0,125	0,128	0,099	0,095	0,103	0,093	0,221	0,196
5,5	0,151	0,118	0,123	0,128	0,100	0,095	0,105	0,092	0,218	0,205
6	0,150	0,122	0,129	0,128	0,101	0,095	0,104	0,093	0,223	0,214
6,5	0,149	0,119	0,125	0,127	0,101	0,096	0,105	0,093	0,221	0,218
7	0,151	0,120	0,127	0,127	0,101	0,095	0,104	0,095	0,211	0,234
7,5	0,151	0,122	0,129	0,127	0,101	0,095	0,104	0,092	0,219	0,256

Obr. 73: Zpracování naměřených dat v Microsoft Office 2007



3.11 Zkušební stanoviště

Základní mechanickou jednotku experimentálního stanoviště tvoří servomotor Festo a hřídelová spojka (viz. příloha č. 2), hřídel, vnější kroužek testovaného ložiska, testované ložisko, šroub proti axiálnímu posunutí, rameno snímače a táhlo snímače síly, uchycení snímače a snímač síly S2 (viz. kapitola 3.1.1).



Obr. 74: Základní mechanická jednotka experimentálního zařízení

Základní mechanická jednotka je uchycena k základovému rámu. Závitová tyč závaží prochází ocel. plechem tak, aby nedocházelo k rozkývání závaží a nedocházelo tak k vnášení chyb do měření.



Obr. 75: Experimentální stanoviště testování k.l.

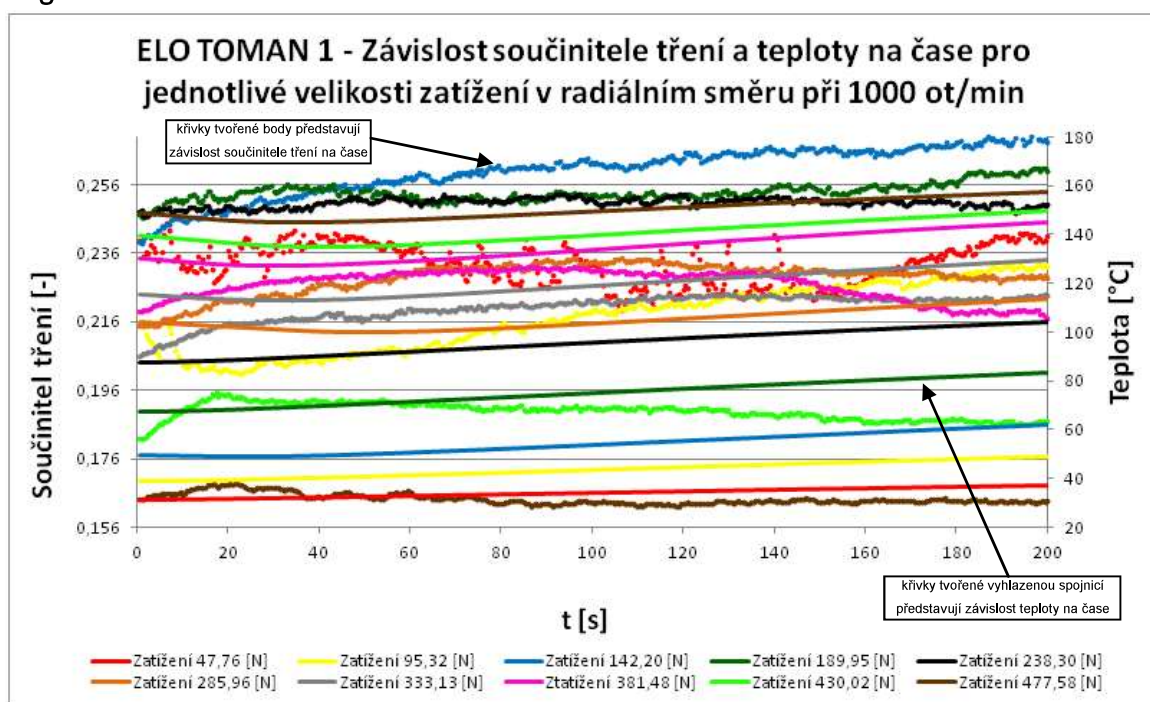


4 Vyhodnocení experimentu

Tato kapitola se věnuje vyhodnocení experimentu vybraných kluzných ložisek. Jsou vyhodnoceny zejména závislosti součinitelů tření a teplot na čase pro otáčky hřídele 1000, 2000 a 2500 ot/min. Každé z měřených ložisek bylo pro statistické porovnání výsledků experimentu změřeno třikrát viz. příloha č. 1 grafické výstupní závislosti. V neposlední řadě se tato kapitola věnuje vzájemnému porovnání těchto ložisek při stejných provozních podmínkách a porovnání naměřených parametrů s parametry, které u těchto ložisek uvádějí jejich výrobci.

4.1 Vyhodnocení experimentu kluzného ložiska Elo Toman

Na obrázku č. 76 je záznam naměřených veličin z jednoho zkušebního cyklu kluzného ložiska Elo Toman. Záznamy ostatních cyklů tohoto ložiska jsou v příloze č. 1 v grafech 1 až 9.



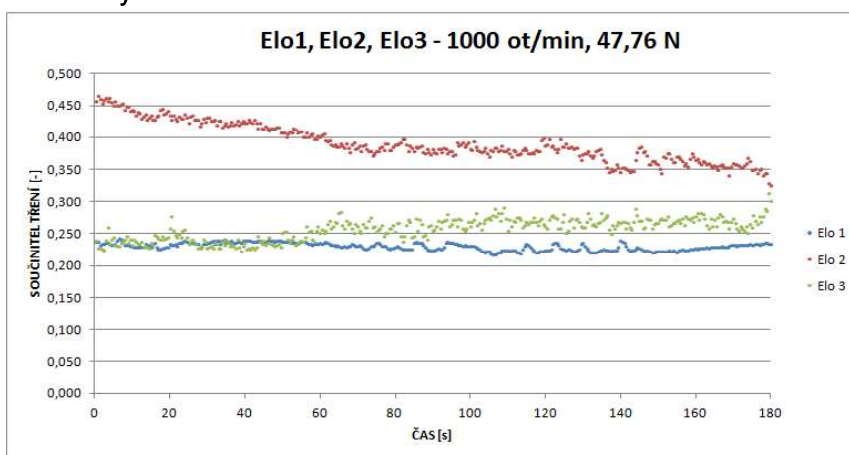
Obr. 76: Závislost součinitele tření a teploty k.l. Elo Toman

Teplotní hranice, při které se ukončí experiment a nedochází dále k navyšování zatížení ložiska je stanovena na 170°C, protože by vlivem těchto teplot mohlo dojít k poškození těsnění valivých ložisek v podporách hřídele. Pro 1000 ot/min této hodnoty nebylo dosaženo, pro 2000 a 2500 ot/min bylo 170°C dosaženo při radiálním zatížení 238,3 N. Z výstupní závislosti zkušebního cyklu při 2500 ot/min (viz. obrázek č. 76) je zřejmé, že s rostoucím zatížením a časem experimentu roste i



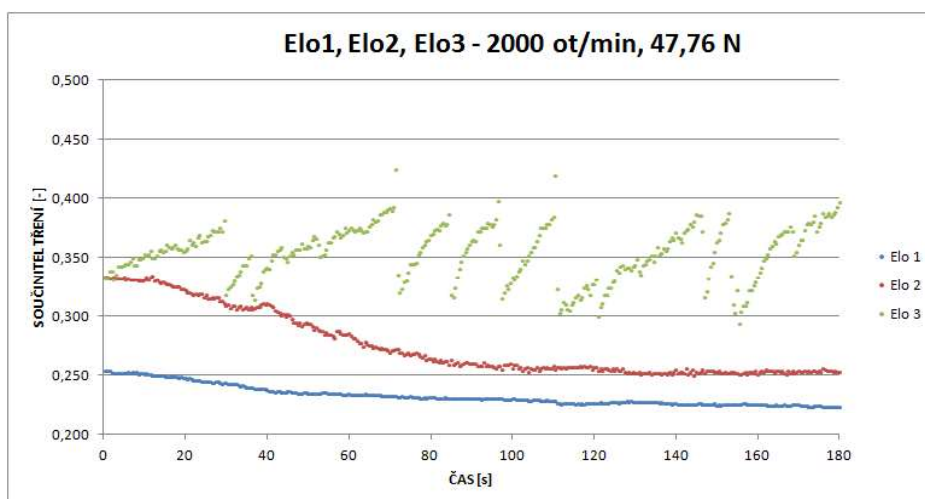
teplota kluzného ložiska. S vyššími otáčkami hřídele pak roste strmost teploty. Při otáčkách hřídele 2000 ot/min vykazuje materiál ložiska větší součinitel tření než při 1000 ot/min, při 2500 ot/min součinitel už nijak neroste. Součinitel tření se pohybuje při tomto zkušebním cyklu v rozmezí 0,16-0,36 v závislosti na radiálním zatížení (viz. obrázek č. 76).

Každé z měřených ložisek bylo pro možnost porovnání výsledků experimentu změřeno třikrát. K.I. Elo Toman vykazuje téměř stejný průběh souč. tření při prvním a třetím měření při 1000 ot/min. U druhého měření při stejných otáčkách dosahuje souč. tření zpočátku vyšších hodnot, ale v průběhu klesá na hodnoty obdobné hodnotám u prvního a třetího měření, což může být způsobeno stále trvajícím záběhem k.l., případně geometrickým tvarem zkrouženého pásu a drobným přesahem v místě styku viz. obrázek č. 79.



Obr. 77: Porovnání k.l. Elo Toman při 1000 ot/min a rad. zatížení 47,76 N

Při navýšení otáček na 2000 ot/min dochází u třetího ložiska k velkým rozptylům hodnot součinitele tření. To má za následek uložení ložiska.



Obr. 78: Porovnání k.l. Elo Toman při 2000 ot/min a rad. zatížení 47,76 N

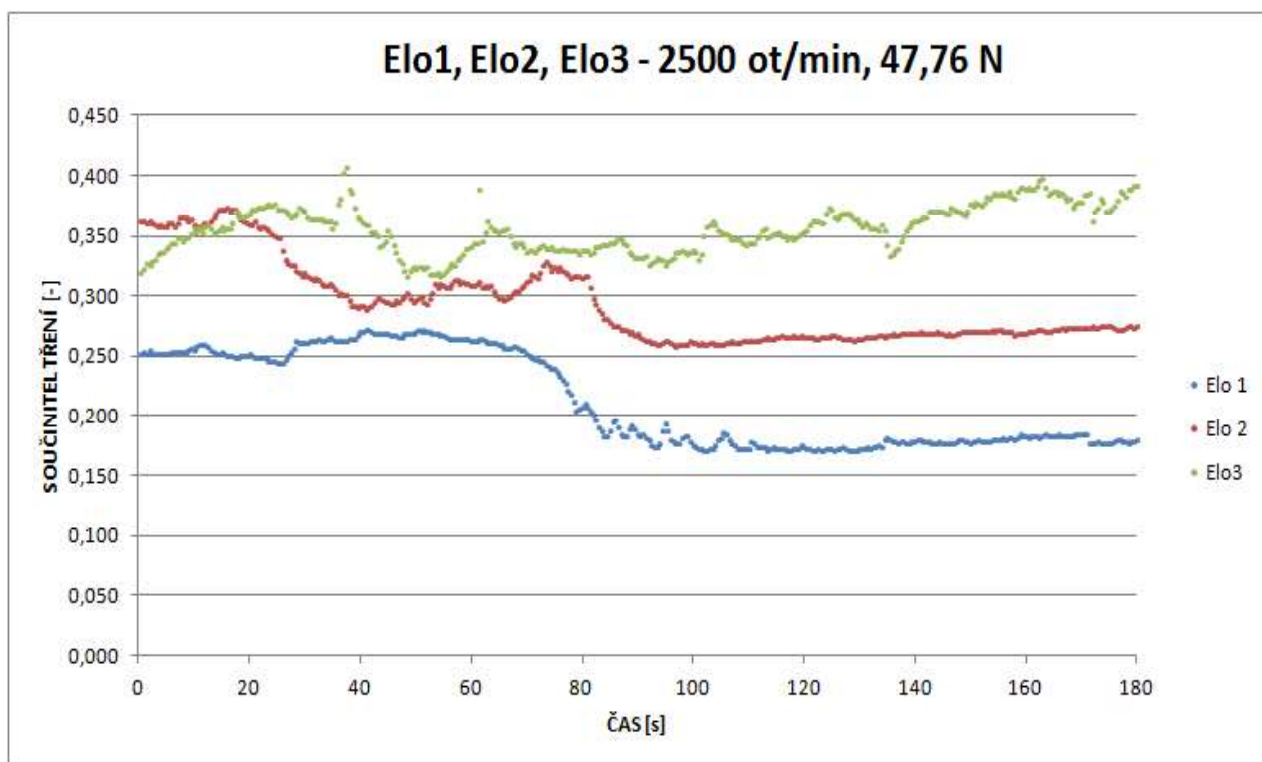


Kontaktní plocha mezi hřídelí a k.l. byla přesně v místě rozdělení jeho válcové plochy. Na obrázku č.79 je vidět, že k opotřebení teflonové vrstvy došlo v místě rozdělení k.l..



Obr. 79: Opotřebení v místě rozdělení k.l.

Maximální otáčky pro k.l. Elo Toman výrobce stanovuje na 2546 ot/min. Při zatěžování ložiska otáčkami 2500 ot/min se dostáváme na tuto hranici, což se projevuje rozkmitaným průběhem křivky v prvních 100 s měření viz. obrázek č. 80.

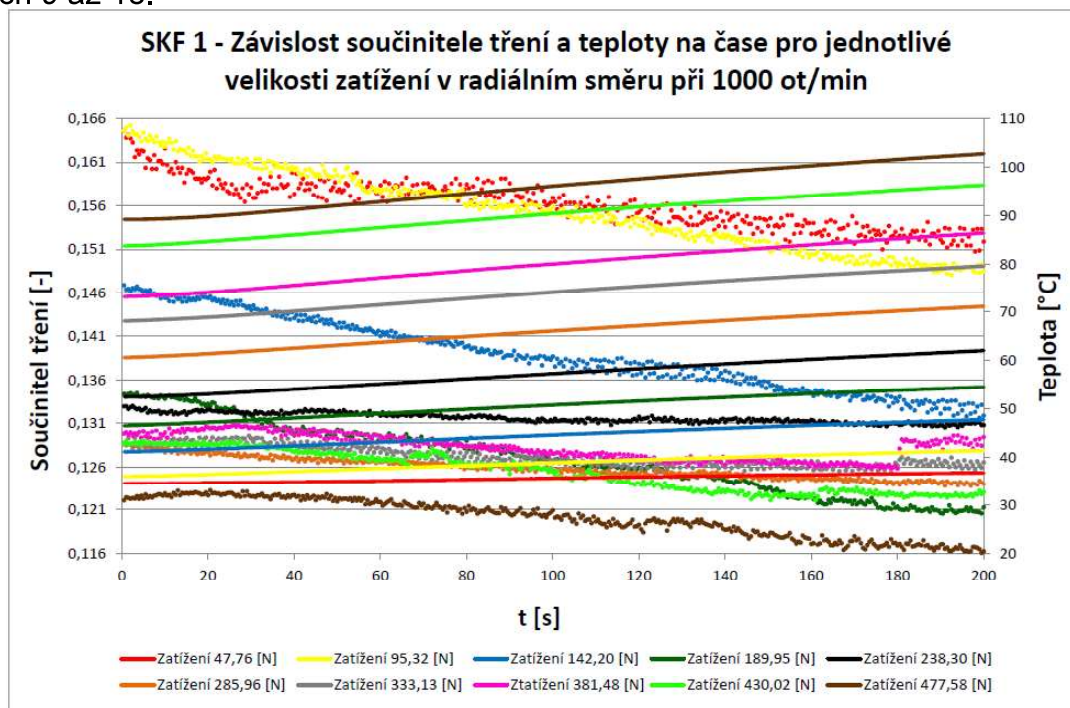


Obr. 80: Porovnání k.l. Elo Toman při 2500 ot/min a rad. zatížení 47,76 N



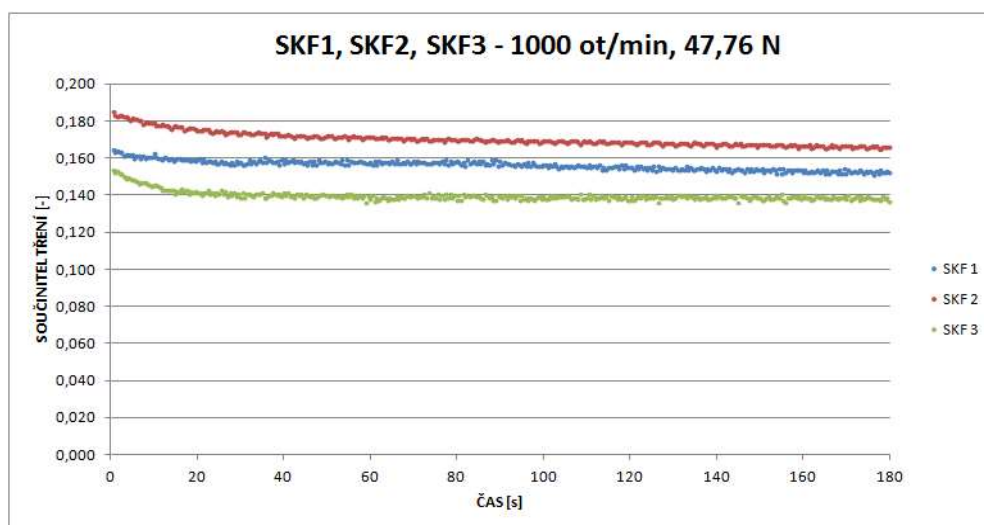
4.2 Vyhodnocení experimentu kluzného ložiska SKF

Na obrázku č. 81 je záznam naměřených veličin z jednoho zkušebního cyklu kluzného ložiska SKF. Záznamy ostatních cyklů tohoto ložiska jsou v příloze č. 1 v grafech 9 až 18.



Obr. 81: Závislost součinitele tření a teploty k.l. SKF

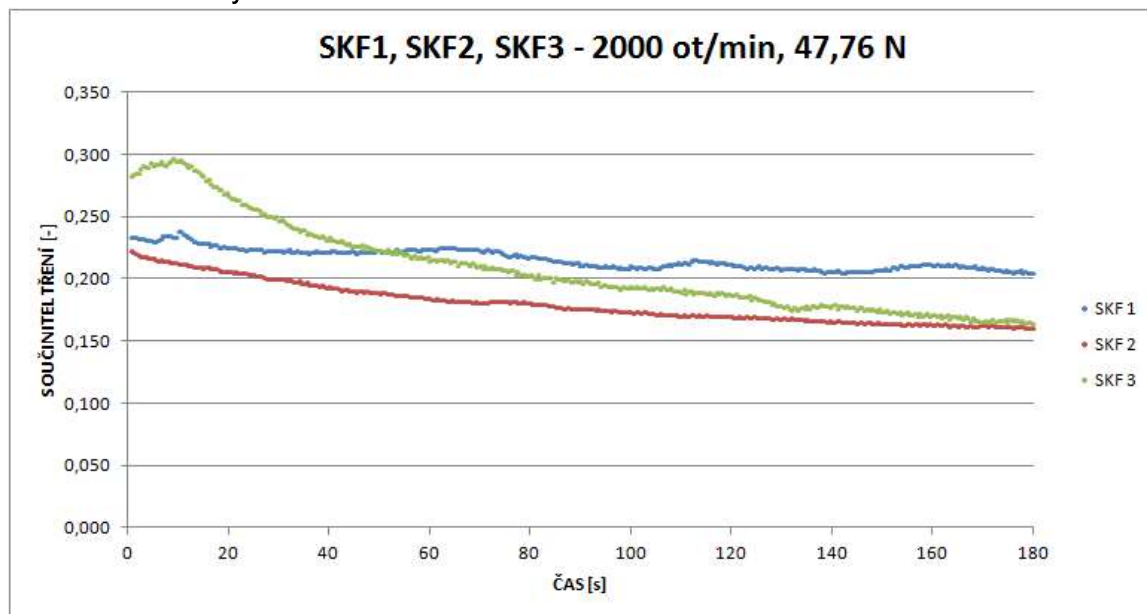
Z obrázku č. 81 je vidět, že teplota stejně jako u ložiska Elo Toman s rostoucím zatížením a časem experimentu roste. S vyššími otáčkami hřídele pak roste strmost teploty. Kluzné ložisko SKF slinutý bronz je napuštěné olejem. Tento olej se s narůstajícím zatížením více uvolňuje, což má za následek klesající charakter součinitele tření při jednotlivých zatížení.



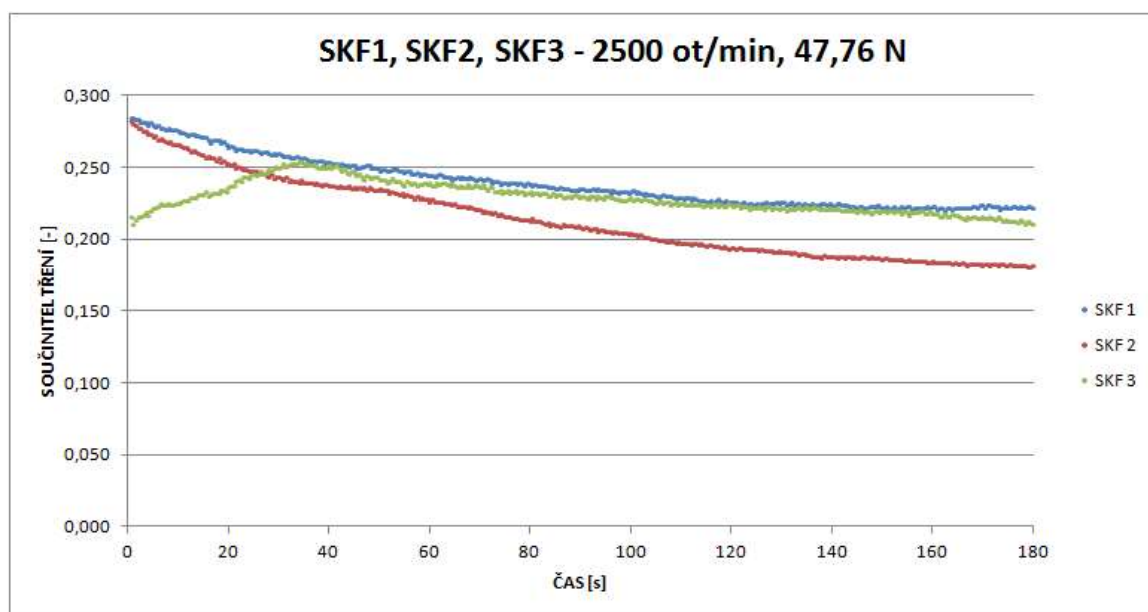
Obr. 82: Porovnání k.l. SKF Slinutý Bronz při 1000 ot/min a rad. zatížení 47,76 N



Součinitel tření u tohoto ložiska pro 2000 a 2500 ot/min vykazuje pro všechny tři měření obdobný charakter viz. obrázek č. 83 a č. 84.



Obr. 83: Porovnání k.l. SKF Slinutý Bronz při 2000 ot/min a rad. zatížení 47,76 N



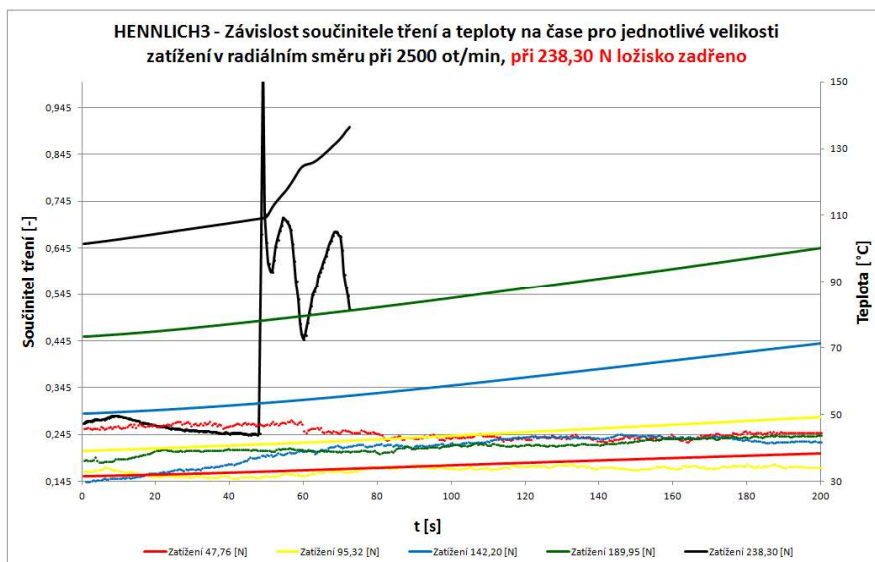
Obr. 84: Porovnání k.l. SKF Slinutý Bronz při 2500 ot/min a rad. zatížení 47,76 N

Výrobce těchto ložisek udává jako maximální provozní teplotu tohoto ložiska 100 °C. Při experimentu se dosahovalo větších teplotních hodnot a tak byla stanovena teplota 110 °C, při které se ukončil experiment a nedocházelo dále k navyšování zatížení ložiska. Této teploty bylo dosaženo při testu SKF1 u cyklů 2000 a 2500 ot/min při radiálním zatížení ložiska 333,13 N.



4.3 Vyhodnocení experimentu kluzného ložiska Hennlich

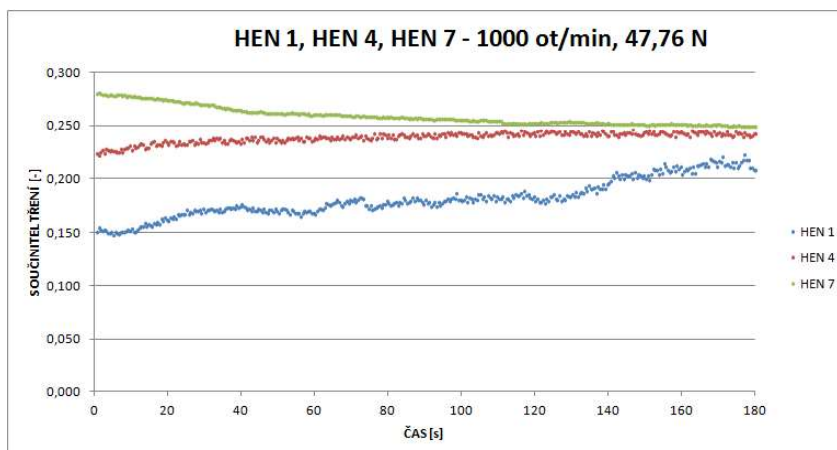
Na obrázku č. 85 je záznam naměřených veličin z jednoho zkušebního cyklu kluzného ložiska Hennlich. Záznamy ostatních cyklů tohoto ložiska jsou v příloze č. 1 v grafech 18 až 27.



Obr. 85: Závislost součinitele tření a teploty k.l. Hennlich

U předchozích ložisek se provedlo testování tak, že vždy jedno ložisko bylo testováno pro všechny tři cykly 1000, 2000 a 2500 ot/min tak, aniž by došlo k jeho zadření a muselo se vyměňovat za jiné. U kluzného ložiska Hennlich došlo k jeho zadření při každém cyklu. Pro 1000 ot/min dojde k zadření v první sérii k.l. při 477,58 N, pro 2000 ot/min při 285,96 N a pro 2500 ot/min při 238,3 N radiální síle, což vypovídá o vlivu tzv. Pv faktoru (více viz. kapitola č. 1,5 Základní parametry k.l.).

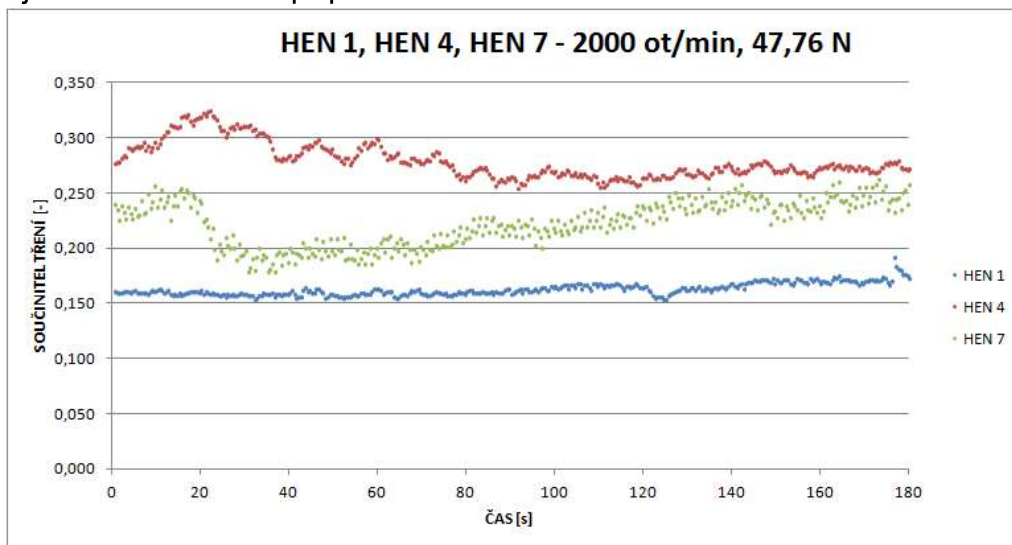
Součinitel tření vykazuje pro první dvě měření při zatížení radiální silou 47,76 N a 1000 ot/min obdobný průběh. V případě třetího měření součinitel vykazuje klesající charakter, což může být způsobeno stále trvajícím záběhem k.l.



Obr. 86: Porovnání k.l. Hennlich při 1000 ot/min a rad. zatížení 47,76 N

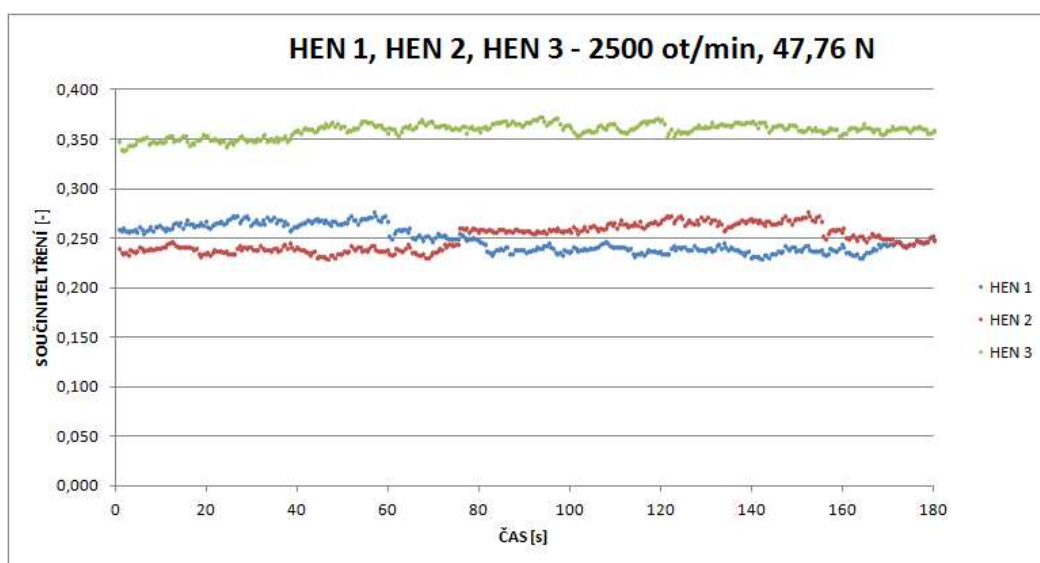


Součinitel tření u tohoto ložiska pro 2000 ot/min vykazuje u prvního měření ustálenější charakter než v případě druhého a třetího měření



Obr. 87: Porovnání k.l. Hennlich při 2000 ot/min a rad. zatížení 47,76 N

Pro 2500 ot/min má součinitel tření obdobný charakter u všech třech měření s tím rozdíle, že u třetího měření k.l. dosahuje vyššího součinitele tření než v případě prvního dvou měření.



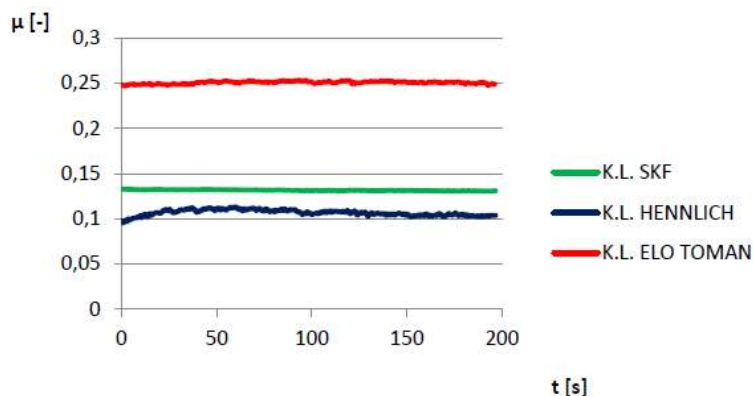
Obr. 88: Porovnání k.l. Hennlich při 2500 ot/min a rad. zatížení 47,76 N

Z obrázku č. 85 je zřejmé že teplota stejně jako u předchozích ložisek s rostoucím zatížením a časem experimentu roste. S vyššími otáčkami hřídele pak roste strmost teploty. Součinitel tření se pohybuje při tomto cyklu v intervalu 0,145 - 0,25 v závislosti zatížení, při zadření ložiska vyleze součinitel tření vysoko nad tyto hodnoty.



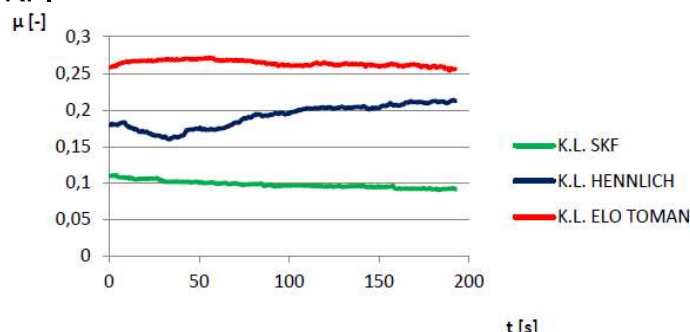
4.4 Porovnání kluzných ložisek při stejných provozních podmínkách

Z obrázku č. 79 je vidět, že při zatížení ložisek silou o velikosti 238,3 N a 1000 ot/min vykazuje materiál k. I. Hennlich nejmenší součinitel tření, největší pak k.l. Elo Toman.



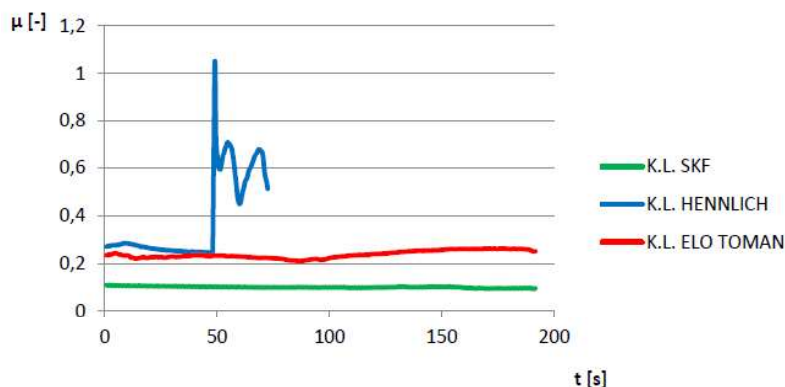
Obr. 89: Porovnání vybraných k.l. při zatížení 238,3 N a 1000 ot/min

Při stejném radiálním zatížení a otáčkách 2000 ot/min vykazuje nejmenší součinitel tření k.l. SKF.



Obr. 90: Porovnání vybraných k.l. při zatížení 238,3 N a 2000 ot/min

Při navýšení otáček na 2500 ot/min a stejném radiálním zatížení jako v předchozích dvou případech, tedy 238,3 N dochází k zadření k.l. Hennlich a k.l. SKF vykazuje nejmenší tření.



Obr. 91: Porovnání vybraných k.l. při zatížení 238,3 N a 2500 ot/min



4.5 Porovnání naměřených provozních parametrů s parametry udávanými výrobcí kluzných ložisek

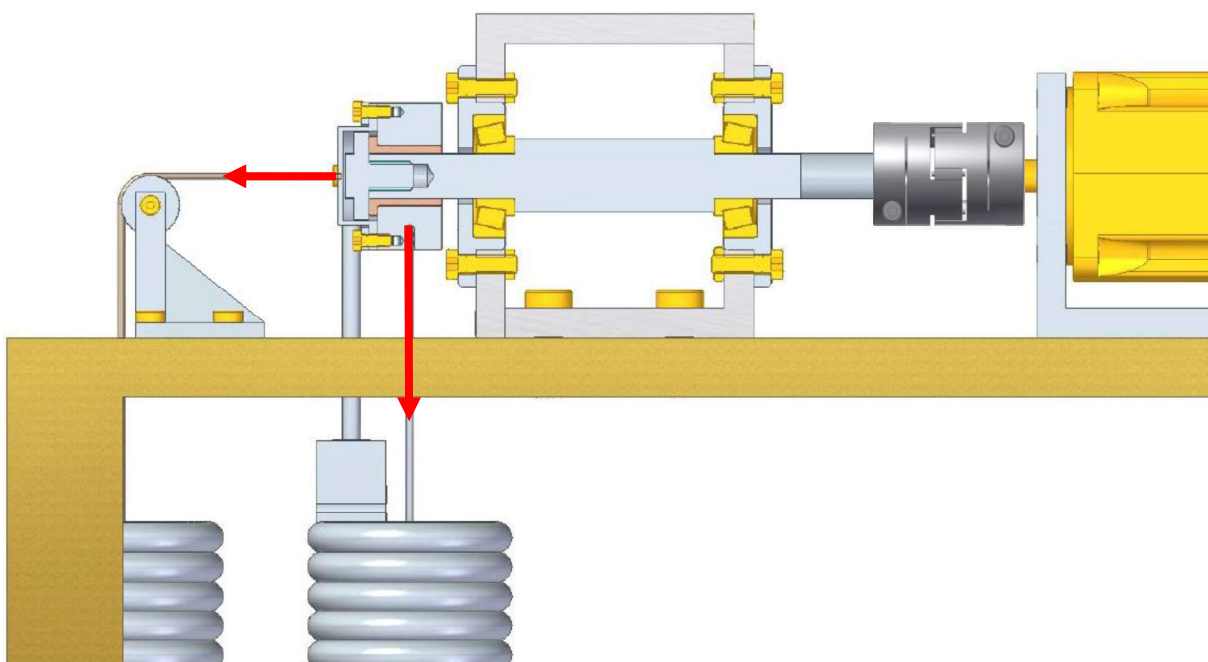
O verifikaci naměřených parametrů nejlépe pojednává tabulka č. 10, kde jsou vidět hodnoty součinitele tření, kterých bylo dosahováno při experimentu a hodnoty součinitele tření uváděné výrobcí těchto ložisek. Stejně tak teploty kluzných ložisek při experimentu v porovnání s teplotami, pro které tyto ložiska jejich výrobci určují.

KLUZNÉ POUZDRO	SOUČ. TŘENÍ udávaný výrobcem	SOUČ. TŘENÍ naměřený	TEPLOTA udávaná výrobcem [°C]	TEPLOTA dosahovaná [°C]
HENNLICH	0,07 - 0,2	0,1 - 0,26	..-50...+240	150
ELO TOMAN	0,03 - 0,08	0,16 - 0,4	..-200...+250	170
SKF	0,05 - 0,10	0,05 - 0,28	..-10...+100	110

Tab. 10: Porovnání naměřených parametrů

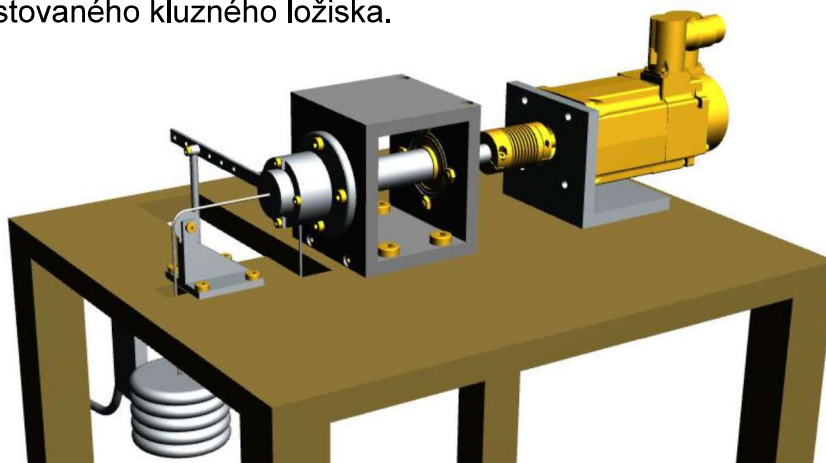
5 Konceptní návrh zařízení pro testování radiálně axiálních kluzných ložisek

Konceptní návrh experimentálního zařízení pro radiálně axiální kluzná pouzdra vychází z principu zařízení pro radiální pouzdra. S tím rozdílem, že je ložisko na hřídeli uložené letmo, díky čemuž je možné zařízení doplnit o zatížení v axiálním směru viz. obrázek č. 92. To je realizované opět pomocí závaží, které je uchycené za ocelové lanko a vedené přes kladku.



Obr. 92: Konceptní návrh testování radiálně-axiálních ložisek - směry zatížení a vyznačení k.l.

Třecí moment je měřen obdobně jako u radiální varianty měřením reakčního momentu k momentu třecímu pomocí snímače síly uchyceného na rameni vnějšího kroužku testovaného kluzného ložiska.



Obr. 93: Konceptní návrh testování radiálně-axiálních ložisek



Závěr

Byl proveden návrh laboratorního standu za účelem ověření provozních parametrů nízkonákladových radiálních kluzných pouzder. V první části byla zpracovaná rešerše problematiky kluzných ložisek včetně výběru experimentálních zařízení používaných ve světě. Dále se rešerše věnuje experimentálnímu zkoušení ve strojírenství včetně metodiky zkoušek ve výkonové metrologii.

V další části této práce se věnuji konstrukčnímu řešení laboratorního standu. Byl proveden kontrolní výpočet průhybu hřídele experimentálního zařízení vlivem maximální zatěžovací síly v radiálním směru, která je při experimentu použita. Jako referenční hodnotu průhybu hřídele je zvolen výsledek určený výpočtem dle Mohrova integrálu. Referenční meze hodnoty průhybu pak podle metody MKP a podle výpočtu Maytec, které se liší od referenční hodnoty přibližně o 20%. Součástí konstrukčního řešení je i analýza vzájemné interakce hřídele a kluzného ložiska pomocí MKP metody. Pro určení zatěžovacích parametrů při experimentu byl proveden u vybraných k.l. výpočet maximálních provozních parametrů v závislosti na $P \cdot v$ faktoru.

Dle kompletní výkresové dokumentace bylo zařízení v rámci ústavní dílny vyrobeno a byla navržena metodika průběhu experimentálního měření vč. navazující problematiky zpracování dat. Pro vybraná ložiska byl proveden experiment k ověření navržené metodiky. V případě k.l. Hennlich iglidur H naměřený součinitel tření odpovídá hodnotám, které udává jeho výrobce, stejně tak u k.l. SKF slinutý bronz. Naměřené hodnoty součinitele tření u k.l. Elo Toman jsou přibližně pětikrát větší než hodnoty součinitele tření materiálu, které u tohoto ložiska uvádí výrobce viz. tabulka č. 10. Možnou příčinou těchto vyšších hodnot součinitele tření je případ, kdy kontaktní plocha mezi hřídelí a k.l. byla přesně v místě rozdělení válcové plochy k.l.. Nutno podotknout, že výrobce neurčuje, v kterých místech má být tato kontaktní plocha umístěna. V poslední kapitole této práce je proveden koncepční návrh zařízení pro testování radiálně axiální kluzných pouzder.



Seznam použité literatury

- [1] BOLEK Alfred, KOCHMAN Josef a kolektiv. Části strojů 1. svazek. Páté, přepracované vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [2] VINŠ Jindřich. Kluzná ložiska. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
- [3] VELÍČKOVÁ Eva. Stroje a zařízení, Části strojů. [online].[cit 2016-03-2]. Dostupné z: <<http://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/040/.content/sys-cs/resource/PDF/castistroju.pdf>>
- [4] Spojené slévárny. [online]. [cit 2014-06-10]. Dostupné z: <http://www.spojeneslevarny.cz/editor/images/obrob_1_full.jpg>
- [5] Techlab. [online]. [cit 2016-20-3]. Dostupné z: <<http://www.techlab.cz/cs/Historie.pdf/>>
- [6] Wikipedie. [online]. [cit 2016-20-4]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Osborne_Reynolds>
- [7] Douglas. [online]. [cit 2016-22-3]. Dostupné z: <<http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/tower/btpic1a.jpg>>
- [8] Gunt. [online]. [cit 2015-18-12]. Dostupné z: <http://www.gunt.de/static/s3138_1.php?p1=&p2=&pN=#>
- [9] icc-central. [online]. [cit 2016-2-2]. Dostupné z: <<http://www.iccmcentral.org/Proceedings/ICCM17proceedings/Themes/Behaviour/WEAR/F24%203%20Rezaei.pdf>>
- [10] Soetelaboratory. [online]. [cit 2016-2-2]. Dostupné z: <http://www.soetelaboratory.ugent.be/05_services/LSB-1.JPG>
- [11] WIKSTRIIM, V., E. HOGLUND a R. LARSSON. Wear of bearing liners at low speed rotation of shafts with contaminated oil. Division of Machine Elements, Lulea University of Technology, S-951 81 L&d Sweden, 1993, s. 996-1001.

- [12] UNLU, Bekir Sadık a Enver ATIK. Materials and Design: Determination of friction coefficient in journal bearings. Celal Bayar University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, 45140 Muradiye-Manisa, Turkey, 2007, s. 973–977.
- [13] SKF. [online]. [cit 2016-1-5]. Dostupné z:
< <http://www.loziskavilim.cz/files/KluznaPouzdraSKF.pdf> >
- [14] PRIESTER, Jozef, Klzné ložiská, ALFA/ Státní nakladatelství technické literatury Bratislava/Praha 1980. 360s.
- [15] CZU. [online]. [cit 2016-1-5]. Dostupné z:
< http://tf.czu.cz/~pexa/Budejovice/Prednasky/P-Poskozeni_stroju.pdf >
- [16] Substech. [online]. [cit 2016-1-5]. Dostupné z:
<[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=hydrodynamic_journal_beari](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=hydrodynamic_journal_bearing)
ng >
- [17] Vojtěch DYNBYL a kolektiv. Výkonová metrologie, experimentální podpora vývoje a inovací mechanismů ve strojírenství. Praha: ČVUT, 2009
- [18] Ložiska valivá, radiální a axiální. [online]. [cit 2016-06-15]. Dostupné z:
<[www.ingjars.estranky.cz/file/94/\(94\)loziska-valiva-radialni-i-axialni.pdf](http://www.ingjars.estranky.cz/file/94/(94)loziska-valiva-radialni-i-axialni.pdf)>
- [19] Konstruování strojů VUT Brno.[online].[cit 2016-5-13]. Dostupné z:
<<http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/prednasky/prednaska4.pdf>>
- [20] Wikipedie. [online].[cit 2016-6-15]. Dostupné z:
<<https://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace>>
- [21] Snímač síly HBM S2. [online]. [cit 2016-06-22], Dostupné z:
<[http://www.linhorn.com/uploadfile/lianhang/20160204/201602040905242545.](http://www.linhorn.com/uploadfile/lianhang/20160204/201602040905242545.png)
png>



Seznam obrázků

Obr. 1: Beauchamp Tower [7]	12
Obr. 2: Osborne Reynolds [6].....	13
Obr. 3: Zkušební stend radiálních ložisek o průměru 500 mm [5]	15
Obr. 4: Stend pro axiální ložiska se svislým hřídelem [5]	16
Obr. 5: Stend pro axiální ložiska s vodorovným hřídelem [5]	16
Obr. 6: Zkušební stend na technické univerzitě Karlshure [5]	17
Obr. 7: Schéma zkušebního stendu SVÚSS pro ložiska o průměru 90 mm [5]	18
Obr. 8: Zubní vrtačka s ložisky mazanými plynem [5]	19
Obr. 9: Zařízení od firmy G.U.N.T. Gerätebau GmbH [8]	20
Obr. 10: Zařízení na ústavu materiálových věd a materiálového inženýrství na Univerzitě Ghent v Belgickém Ghentu. [10].....	21
Obr. 11: Popis zařízení na ústavu materiálových věd a materiálového inženýrství na Univerzitě Ghent v Belgickém Ghentu. [9].....	22
Obrázek 12 Zařízení pro zkoumání problematiky malých obvodových rychlostí při rozběhu a doběhu kluzného ložiska [11]	24
Obr. 13 Experimentální zařízení využívající číselníkového úchylkoměru [12]	25
Obr. 14: Přípustné dynamické měrné zatížení při kluzné rychlosti nižší než 0,01 m/s a přípustné statické měrné zatížení při nulové rychlosti pro různé druhy kluzných materiálů SKF [13].....	27
Obr. 15: Dlouhodobě přípustná kluzná rychlost kluzných materiálů SKF při měrném zatížení nižším než 1 N/mm ² za sucha nebo při počátečním mazání [13]	28
Obr. 16: Součinitel tření za sucha nebo při počátečním mazání běžným množstvím maziva pro různé typy kluzných materiálů SKF. [13].....	29
Obr. 17: Rozsah teploty pracovního prostředí pro jednotlivá kluzná pouzdra SKF za běžných pracovních podmínek. [13].....	30
Obrázek 18 Radiální kluzné ložisko	31
Obr. 19: Axiální kluzné ložisko	31
Obr. 20 Prstencový tvar [3].....	32
Obr. 21: Válcový tvar [3].....	32
Obr. 22: Kuželový tvar [3].....	33
Obr. 23: Kulový tvar [3].....	33
Obr. 24: Hřebenový tvar [3]	33

Obr. 25: Patní tvar [3]	33
Obr. 26: Suché tření [2]	34
Obr. 27: Mezní tření [2]	34
Obr. 28: Kapalinné tření [2]	34
Obr. 29: Princip hydrodynamického [2]	35
Obr. 30: Příklad hydrostatického mazání [2].....	35
Obr. 31: Příklad použití aerostatického mazání [5].....	36
Obr. 32: Samomazné kluzné pouzdro [4]	37
Obr. 33: Adhezivní opotřebení [15].....	39
Obr. 34: Abrazivní opotřebení [15]	40
Obr. 35: Erozivní opotřebení [15]	40
Obr. 36: Únavové opotřebení [15]	41
Obr. 37: Vznik kavitačního opotřebení u kluzného pouzdra [16]	42
Obr. 38: Vibrační opotřebení [15]	42
Obr. 39: Schéma koncepce experimentálního stanoviště [17]	45
Obr. 40: Experimentální zařízení 3D pohled	51
Obr. 41: Řez testovacím zařízením	51
Obr. 42: Uchycení táhla snímače síly	52
Obr. 43: Břítové uchycení závitové tyče na závaží	52
Obr. 44: Experimentální stanoviště 3D pohled	53
Obr. 45: Hliníkový stavebnicový profil 45x45L.....	54
Obr. 46: Hřídel testovacího zařízení	54
Obr. 47: Nosník zatížený spojitým zatížením (kluzným pouzdem)	55
Obr. 48: Nosník rozdělen na 4 pole.....	56
Obr. 49: Zavedení jednotkové síly	56
Obr. 50: Výpočet průhybu hřídele dle Maytec [9]	57
Obr. 51: Vykreslení průhybu hřídele.....	58
Obr. 52: Vyznačení částí zařízení pro MKP kontrolu	59
Obr. 53: Vykreslení napětí na hřídeli	60
Obr. 54: Vykreslení napětí na kluzném pouzdru.....	60
Obr. 55: kluzné ložisko SKF slinutý bronz	61
Obr. 56: tvar PSMF [13].....	62
Obr. 57: tvar PSM [13].....	62



Obr. 58: Kluzné ložisko Hennlich iglidur H	64
Obr. 59: Kluzné ložisko Elo Toman	66
Obr. 60: Valivá jednořadá ložiska SKF 61901	69
Obr. 61: SKF 61901 v podporách hřídele zobrazena modře	69
Obr. 62: Určení třecí síly a součinitele tření	72
Obr. 63: Zapojení Wheatstonova můstku	74
Obr. 64: Snímač síly HBM S2 + vyznačení tenzometrů [21].....	75
Obr. 65: Zákl. rozměry snímače síly HBM	75
Obr. 66: 1. Kalibrace snímače síly HBM S2	76
Obr. 67: 2. Kalibrace snímače síly HBM S2	77
Obr. 68: 3. Kalibrace snímače síly HBM S2	78
Obr. 69: Posuvné uchycení snímače síly HBM S2	79
Obr. 70: Umístění termočlásku.....	80
Obr. 71: Čelní panel ovládacího SW	81
Obr. 72: Textový dokument s výsledky měření.....	82
Obr. 73: Zpracování naměřených dat v Microsoft Office 2007	84
Obr. 74: Základní mechanická jednotka experimentálního zařízení	85
Obr. 75: Experimentální stanoviště testování k.l.	85
Obr. 76: Závislost součinitele tření a teploty k.l. Elo Toman.....	86
Obr. 77: Porovnání k.l. Elo Toman při 1000 ot/min a rad. zatížení 47,76 N	87
Obr. 78: Porovnání k.l. Elo Toman při 2000 ot/min a rad. zatížení 47,76 N	87
Obr. 79: Opotřebení v místě rozdělení k.l.....	88
Obr. 80: Porovnání k.l. Elo Toman při 2500 ot/min a rad. zatížení 47,76 N	88
Obr. 81: Závislost součinitele tření a teploty k.l. SKF	89
Obr. 82: Porovnání k.l. SKF Slinutý Bronz při 1000 ot/min a rad. zatížení 47,76 N...89	
Obr. 83: Porovnání k.l. SKF Slinutý Bronz při 2000 ot/min a rad. zatížení 47,76 N...90	
Obr. 84: Porovnání k.l. SKF Slinutý Bronz při 2500 ot/min a rad. zatížení 47,76 N...90	
Obr. 85: Závislost součinitele tření a teploty k.l. Hennlich	91
Obr. 86: Porovnání k.l. Hennlich při 1000 ot/min a rad. zatížení 47,76 N	91
Obr. 87: Porovnání k.l. Hennlich při 2000 ot/min a rad. zatížení 47,76 N	92
Obr. 88: Porovnání k.l. Hennlich při 2500 ot/min a rad. zatížení 47,76 N	92
Obr. 89: Porovnání vybraných k.l. při zatížení 238,3 N a 1000 ot/min.....	93
Obr. 90: Porovnání vybraných k.l. při zatížení 238,3 N a 2000 ot/min.....	93



Obr. 91: Porovnání vybraných k.l. při zatížení 238,3 N a 2500 ot/min.....	93
Obr. 92: Koncepční návrh testování radiálně-axiálních ložisek - směry zatížení a vyznačení k.l.....	95
Obr. 93: Koncepční návrh testování radiálně-axiálních ložisek	95



Seznam tabulek

Tab. 1: Souhrn výsledků průhybu hřídele pro jednotlivé výpočetní metody.....	59
Tab. 2: Technické parametry k.l. SKF slinutý bronz	62
Tab. 3: Technické parametry k.l. Hennlich iglidur H	64
Tab. 4: Technické parametry k.l. Elo Toman	67
Tab. 5: Fyzikální veličiny popisující funkci experimentálního zařízení	72
Tab. 6: 1. Kalibrace snímače síly HBM S2	76
Tab. 7: 2. Kalibrace snímače síly HBM S2	77
Tab. 8: 3. Kalibrace snímače síly HBM S2	78
Tab. 9: Koeficient k lineární rovnice	79
Tab. 10: Porovnání naměřených parametrů	94



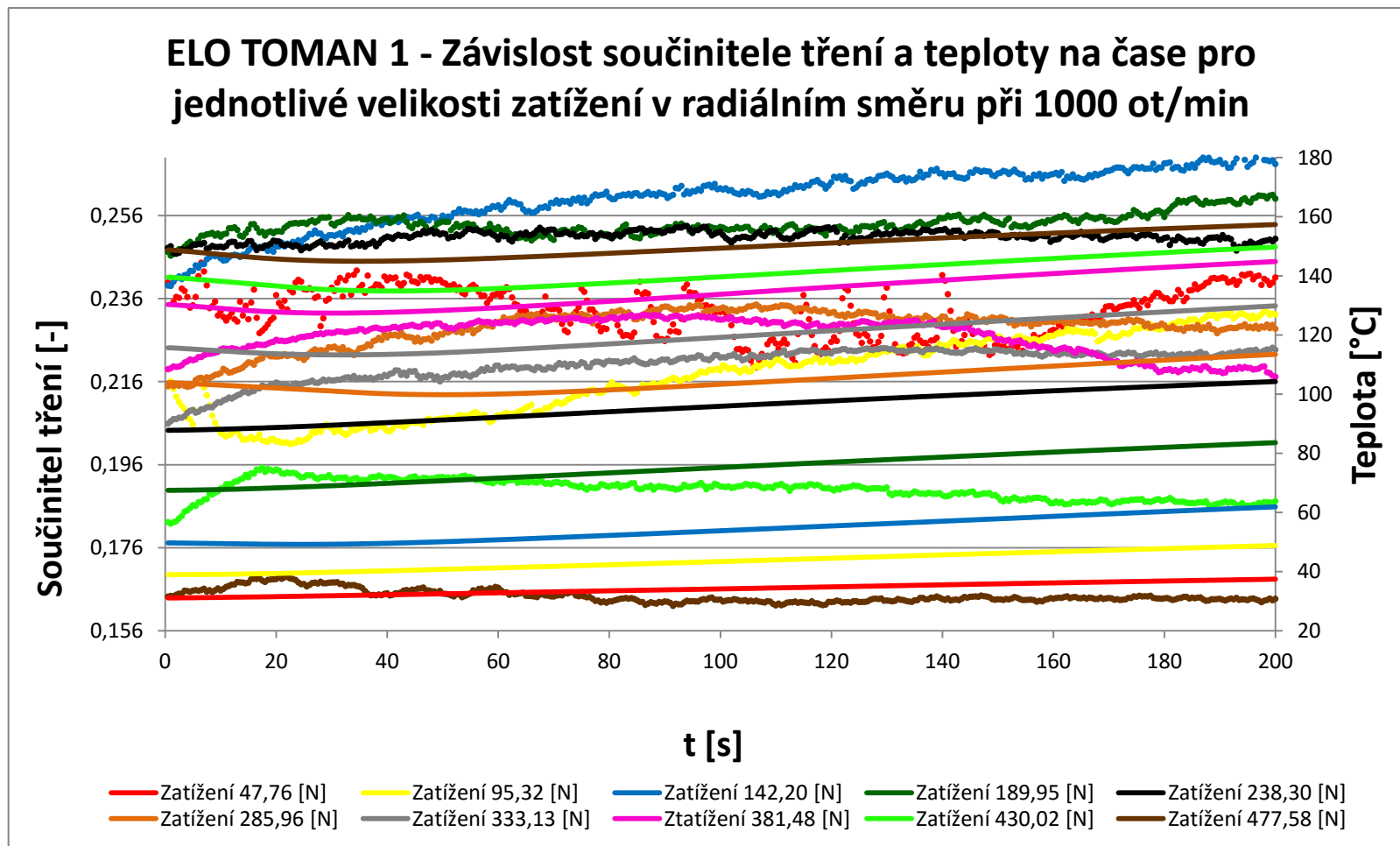
Seznam příloh

Příloha č. 1: Grafické výsledky experimentálního měření vybraných k.l.

Příloha č. 2: Základní informace servomotoru a hřídelové spojky Festo

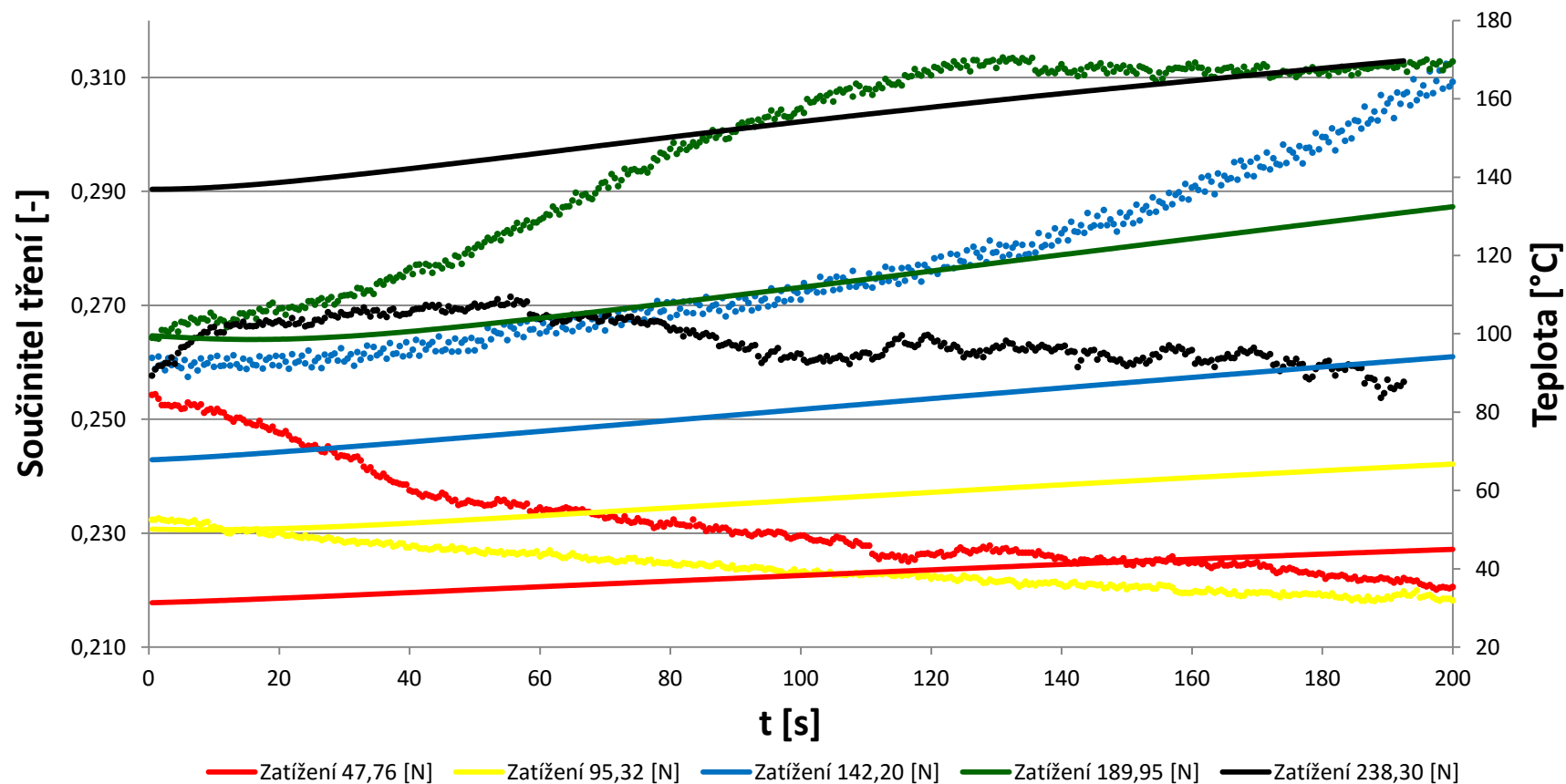
Příloha č. 3: Výkresová dokumentace experimentálního zařízení

PŘÍLOHA Č. 1 - Grafické výsledky experimentálního měření vybraných k.l.

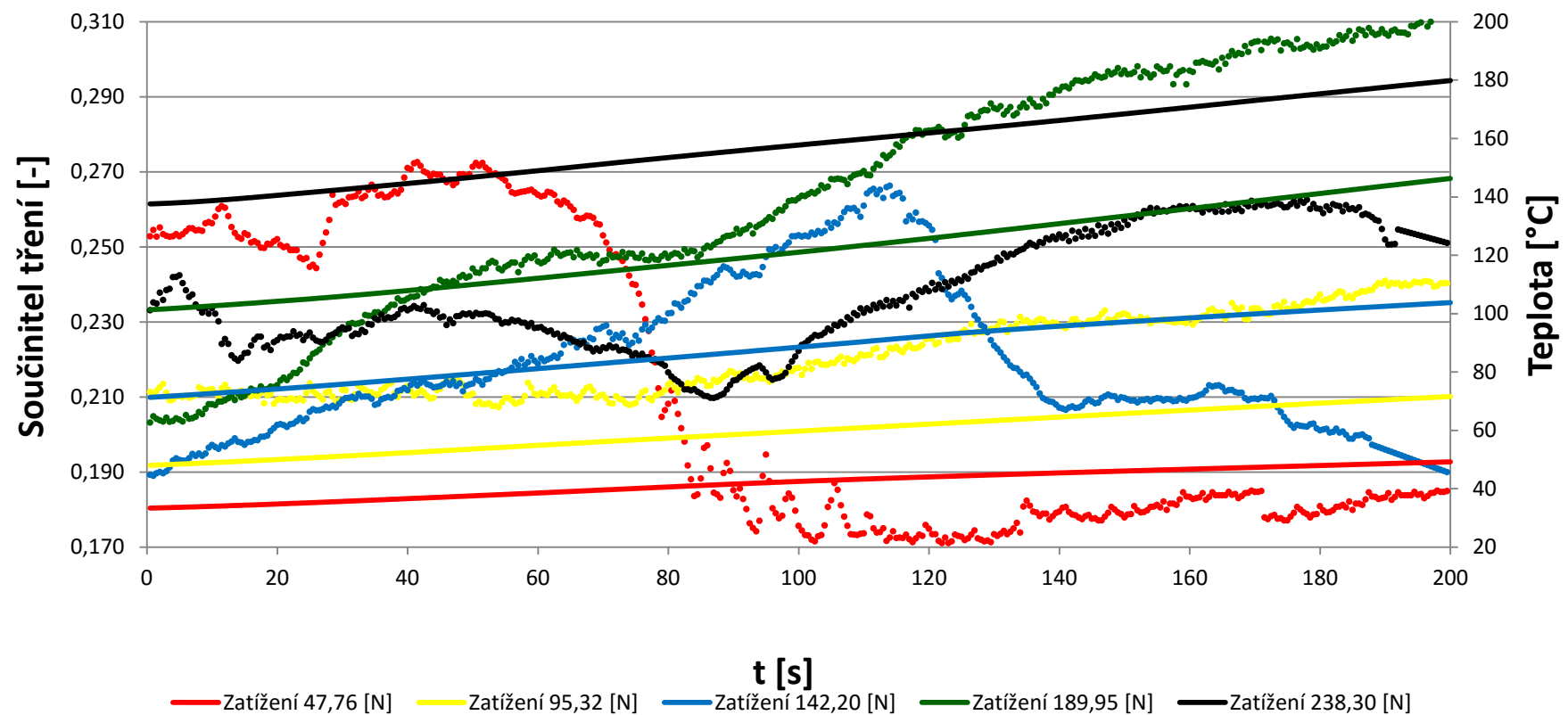


GRAF 1

ELO TOMAN 1 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2000 ot/min, při 238,30 [N] dosaženo 170°C

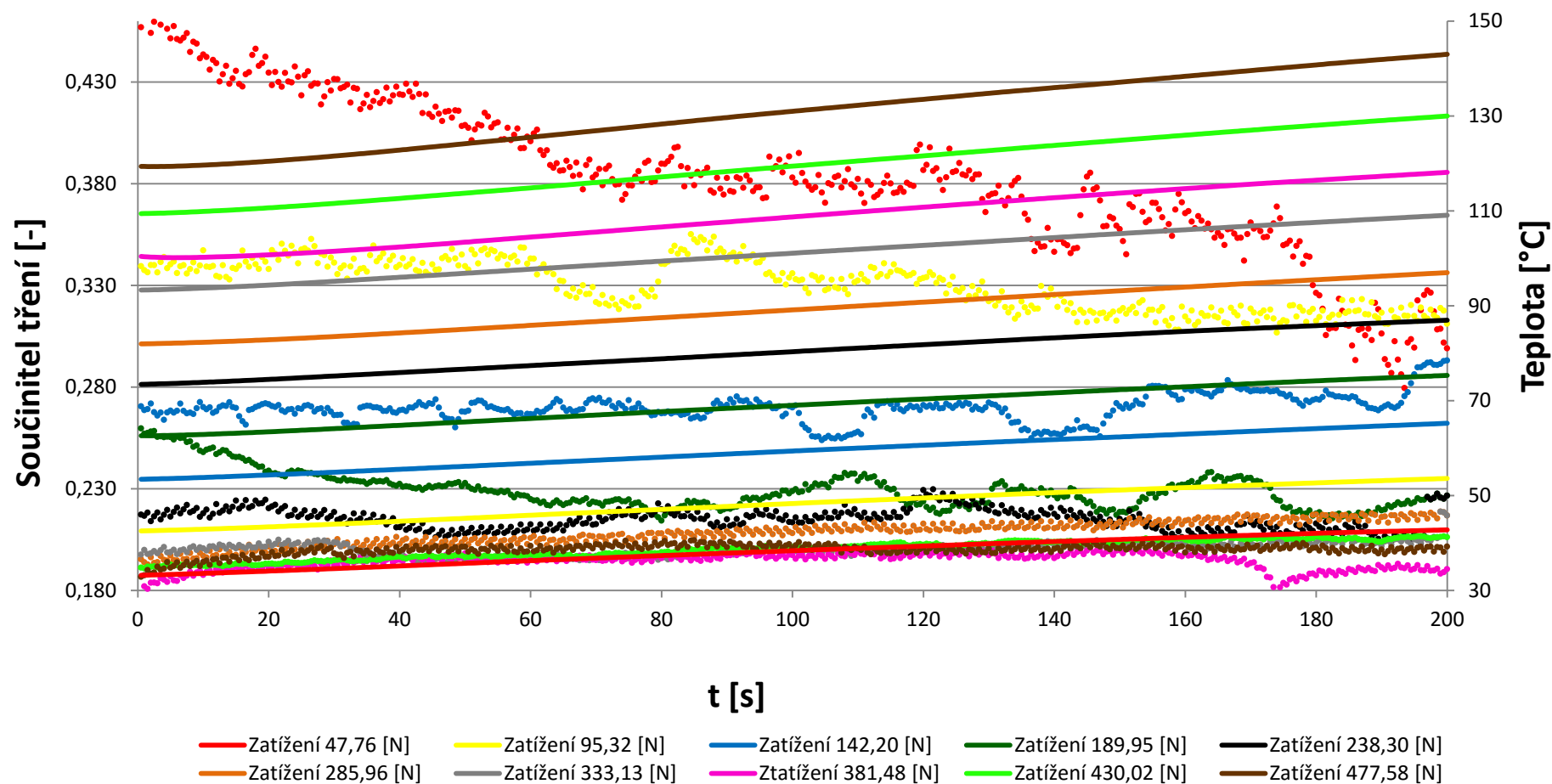


ELO TOMAN 1 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2500 ot/min, při 238,30 [N] dosaženo 170°C



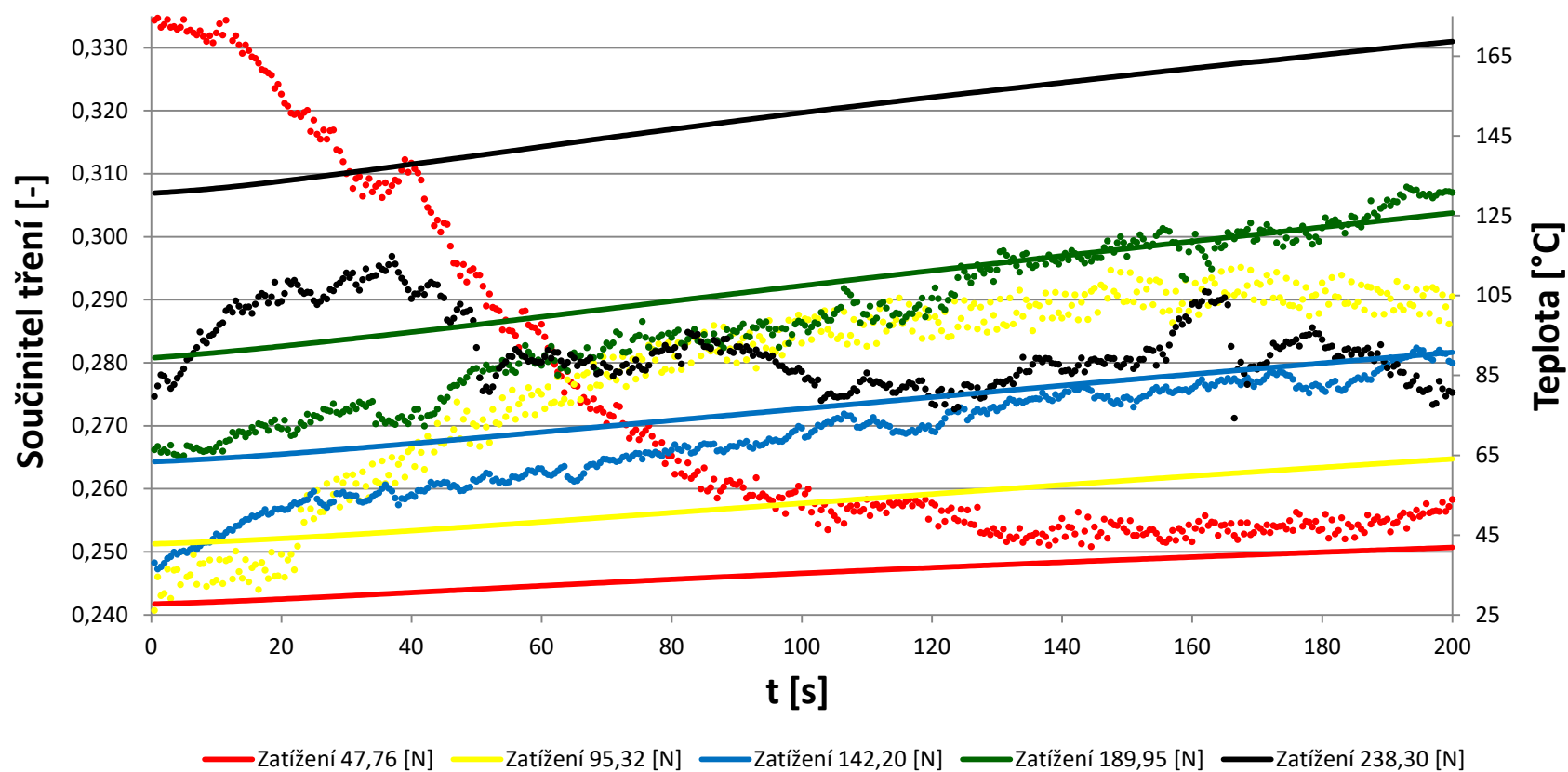
GRAF 3

ELO TOMAN 2 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 1000 ot/min

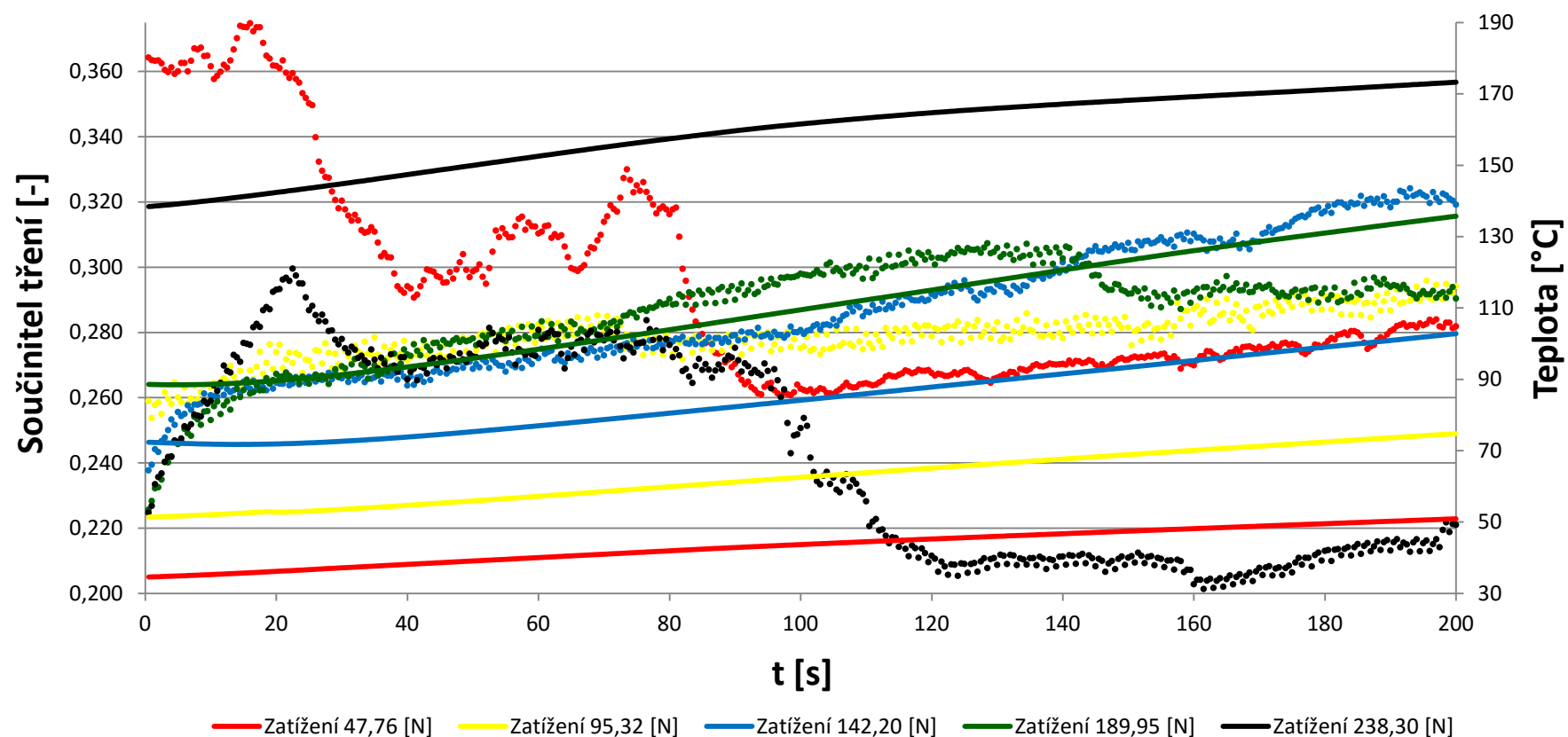


GRAF 4

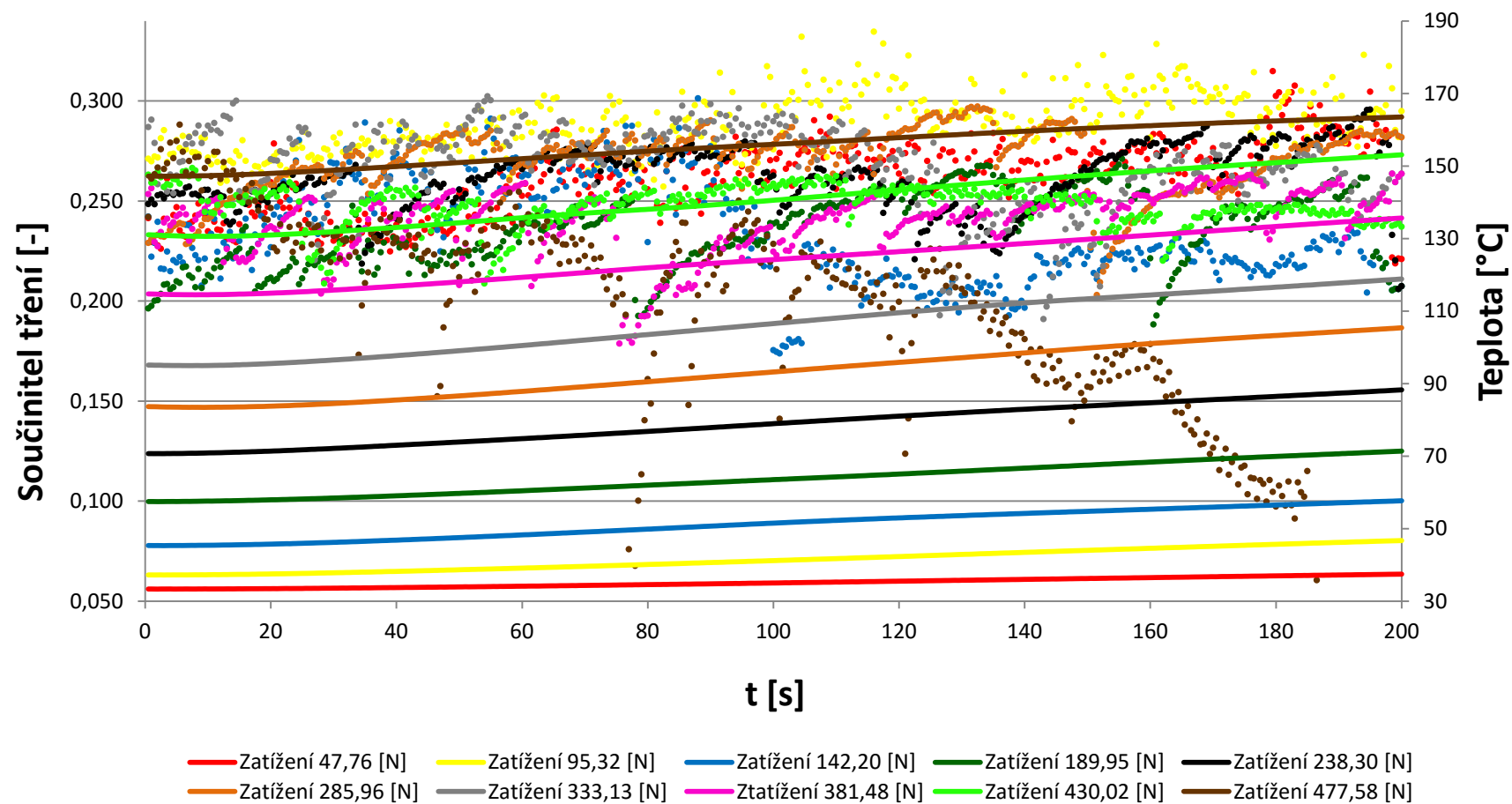
ELO TOMAN 2 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2000 ot/min, při 238,30 dosaženo 170°C



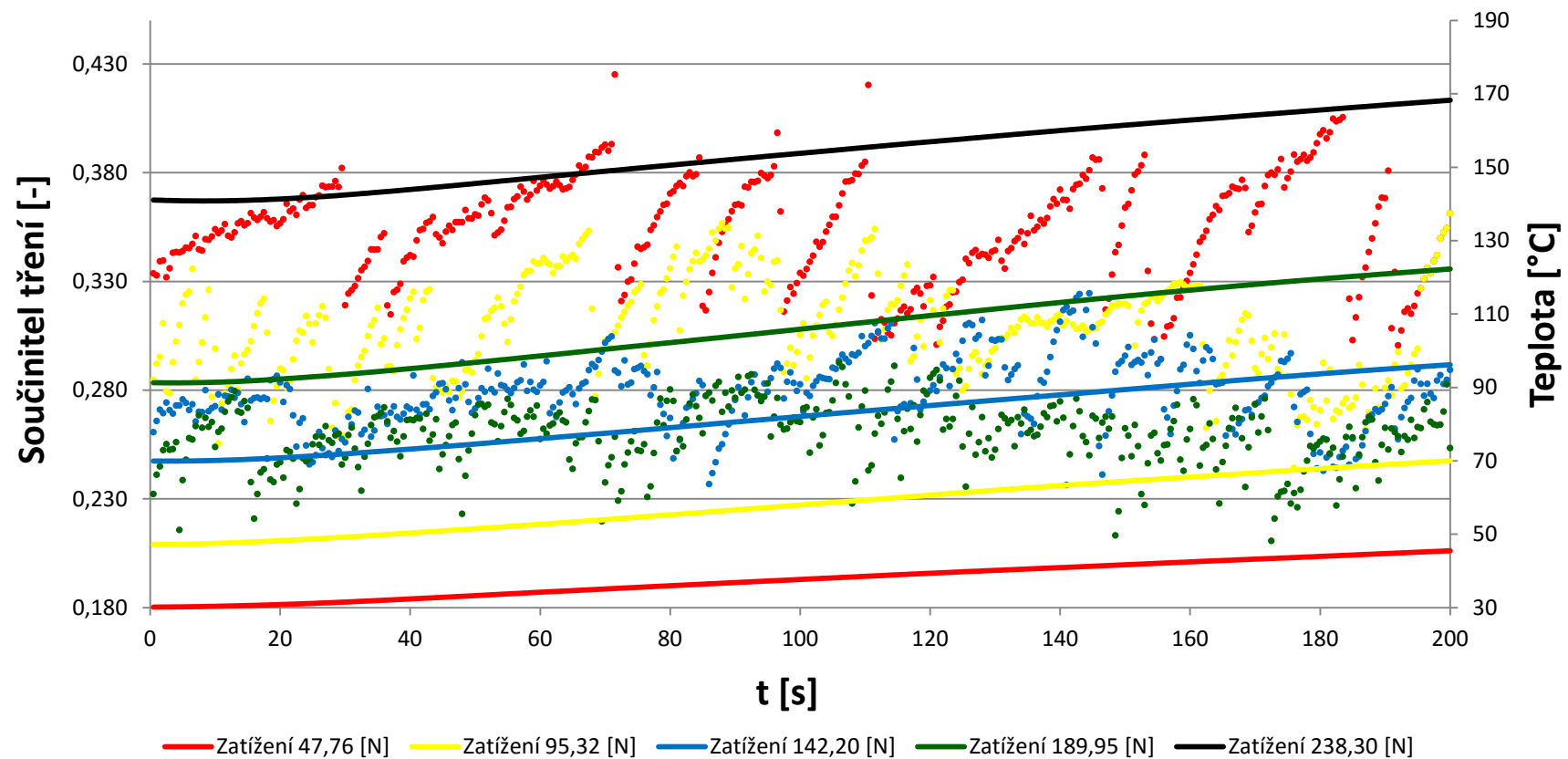
ELO TOMAN 2 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2500 ot/min, při 238,30 N dosaženo 170°C



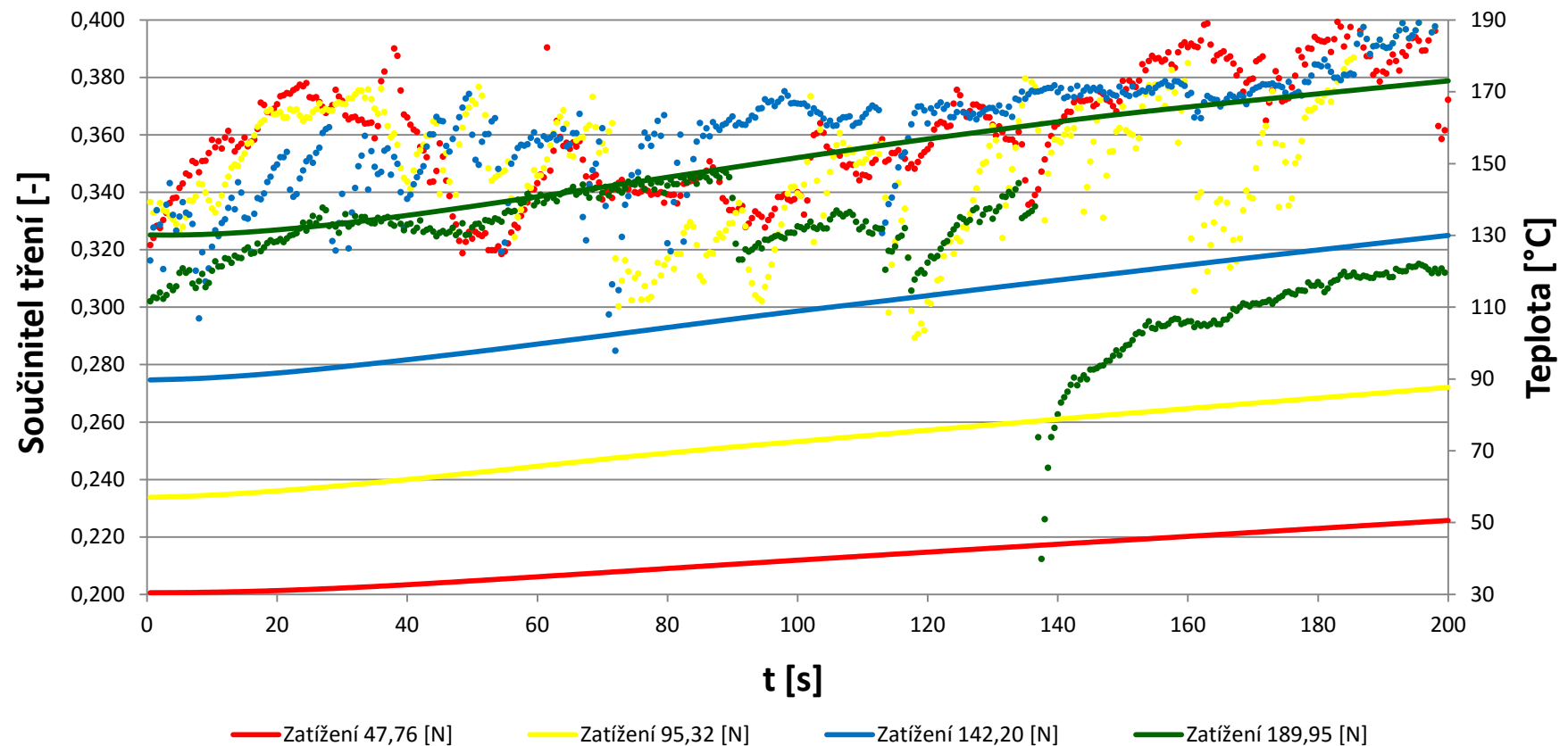
ELO TOMAN 3 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 1000 ot/min



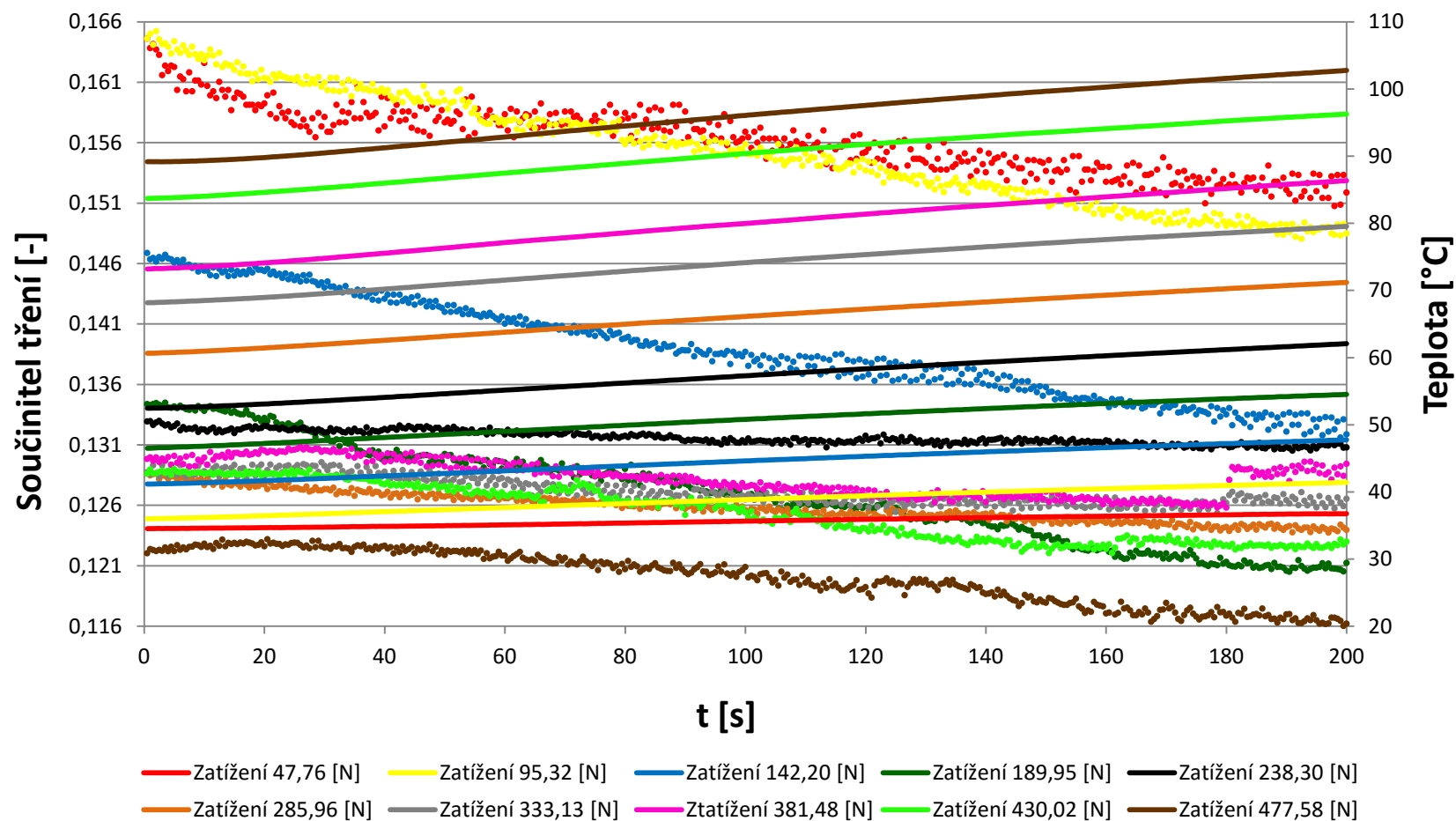
ELO TOMAN 3 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2000 ot/min, při 238,30 dosaženo 170°C



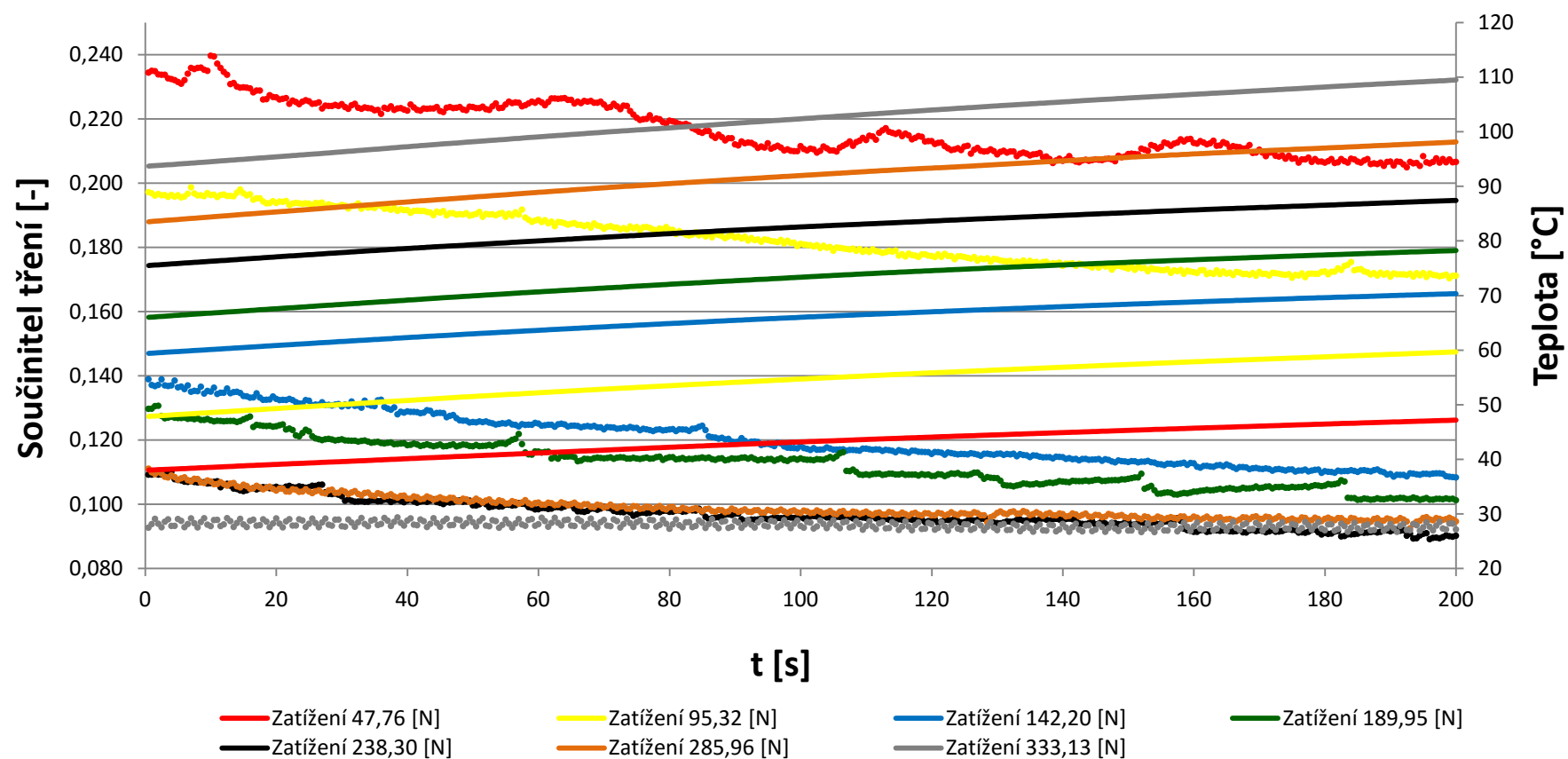
ELO TOMAN 3 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2500 ot/min, při 189.95 N dosaženo 170°C



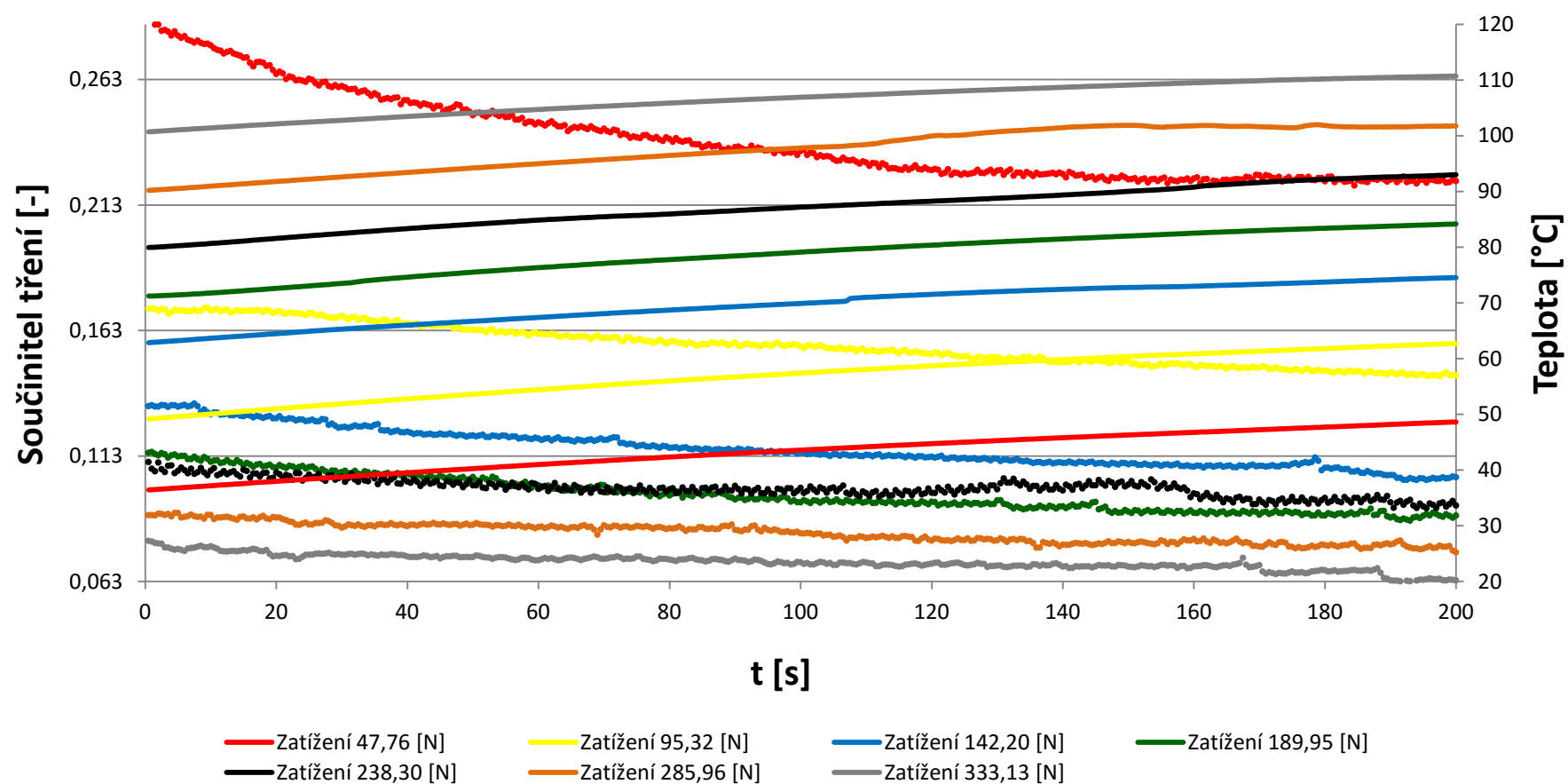
SKF 1 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 1000 ot/min



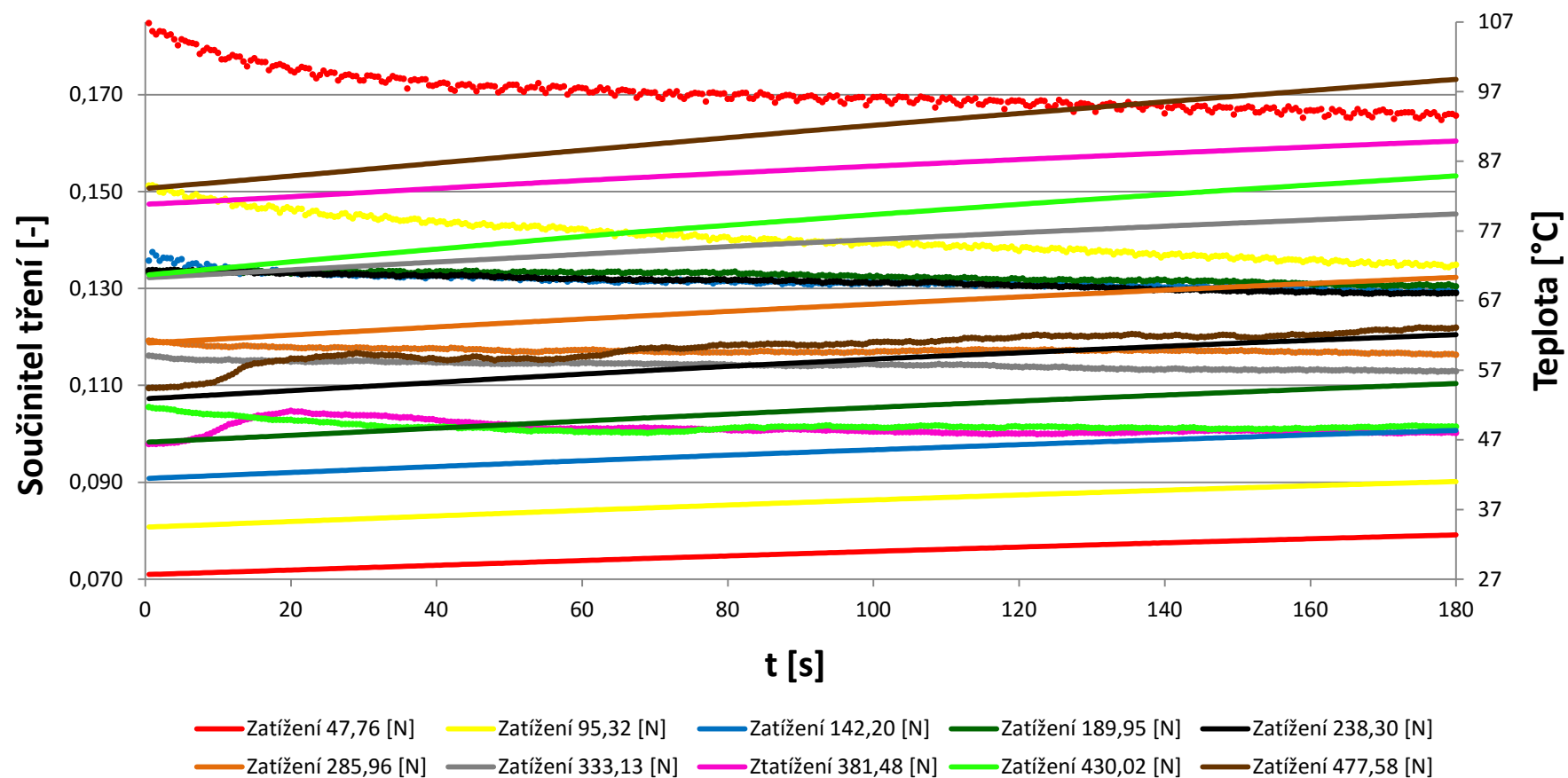
SKF 1 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2000 ot/min, při 333,13 N dosaženo 110°C



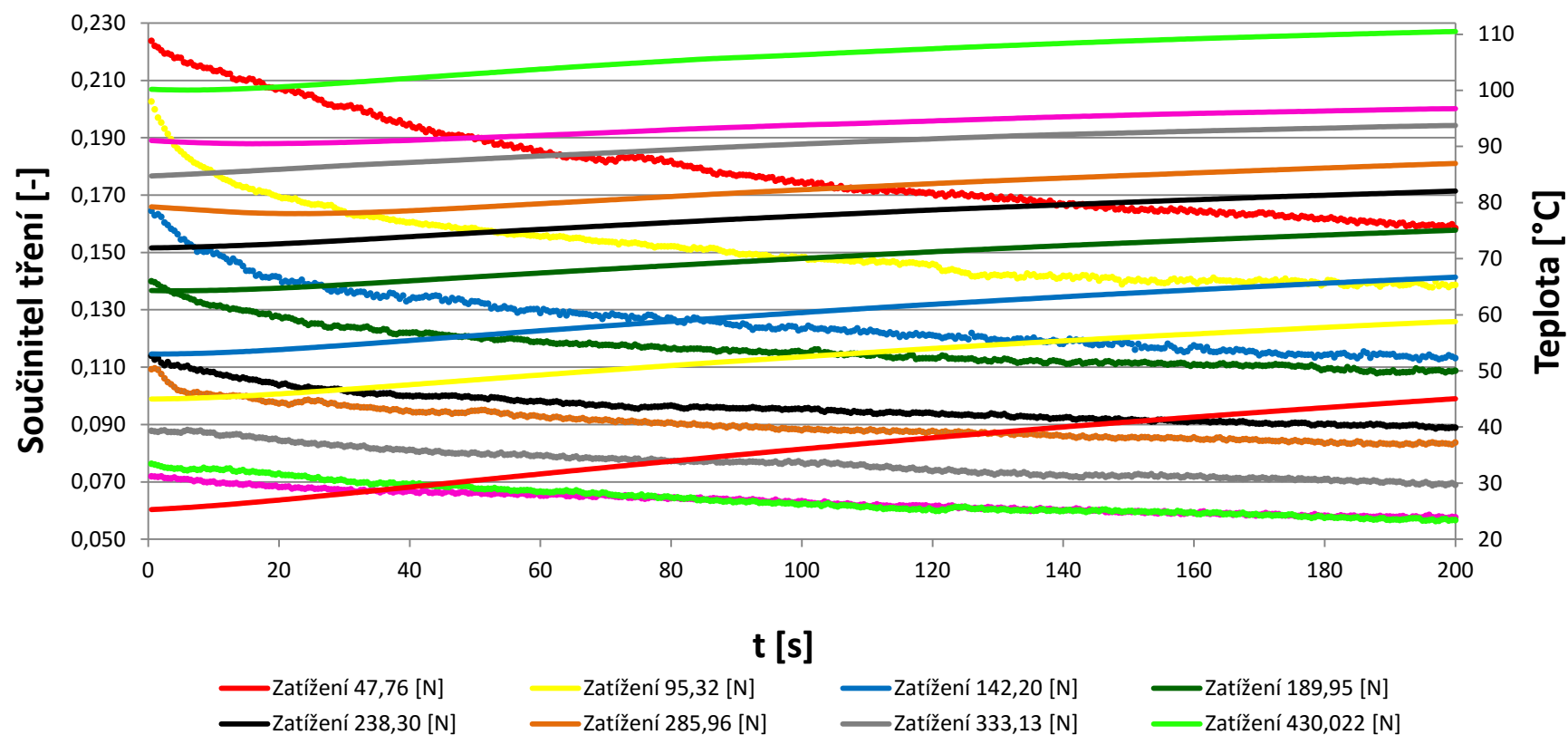
SKF 1 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2500 ot/min, při 333,13 N dosaženo 110°C



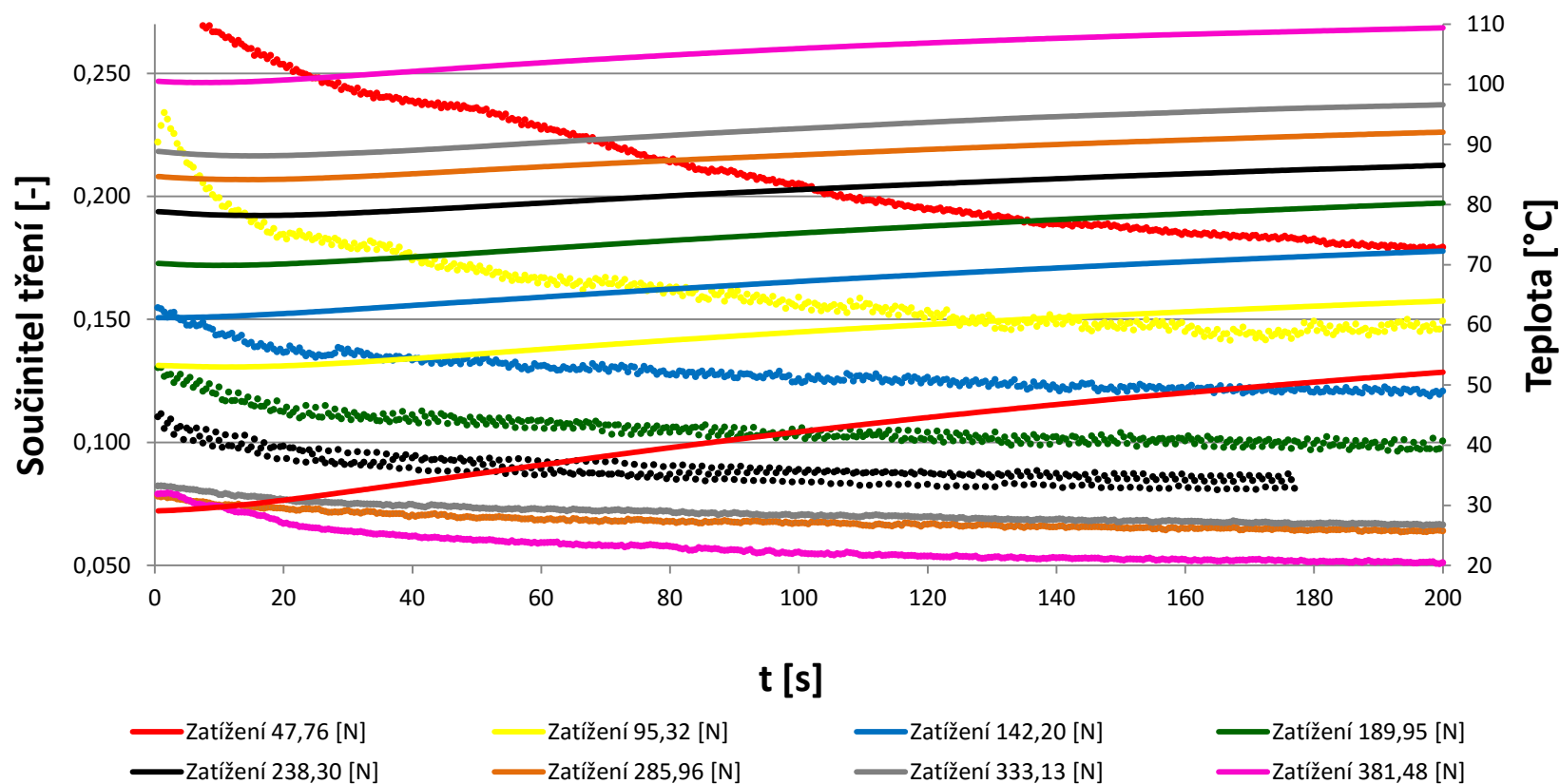
SKF 2 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 1000 ot/min



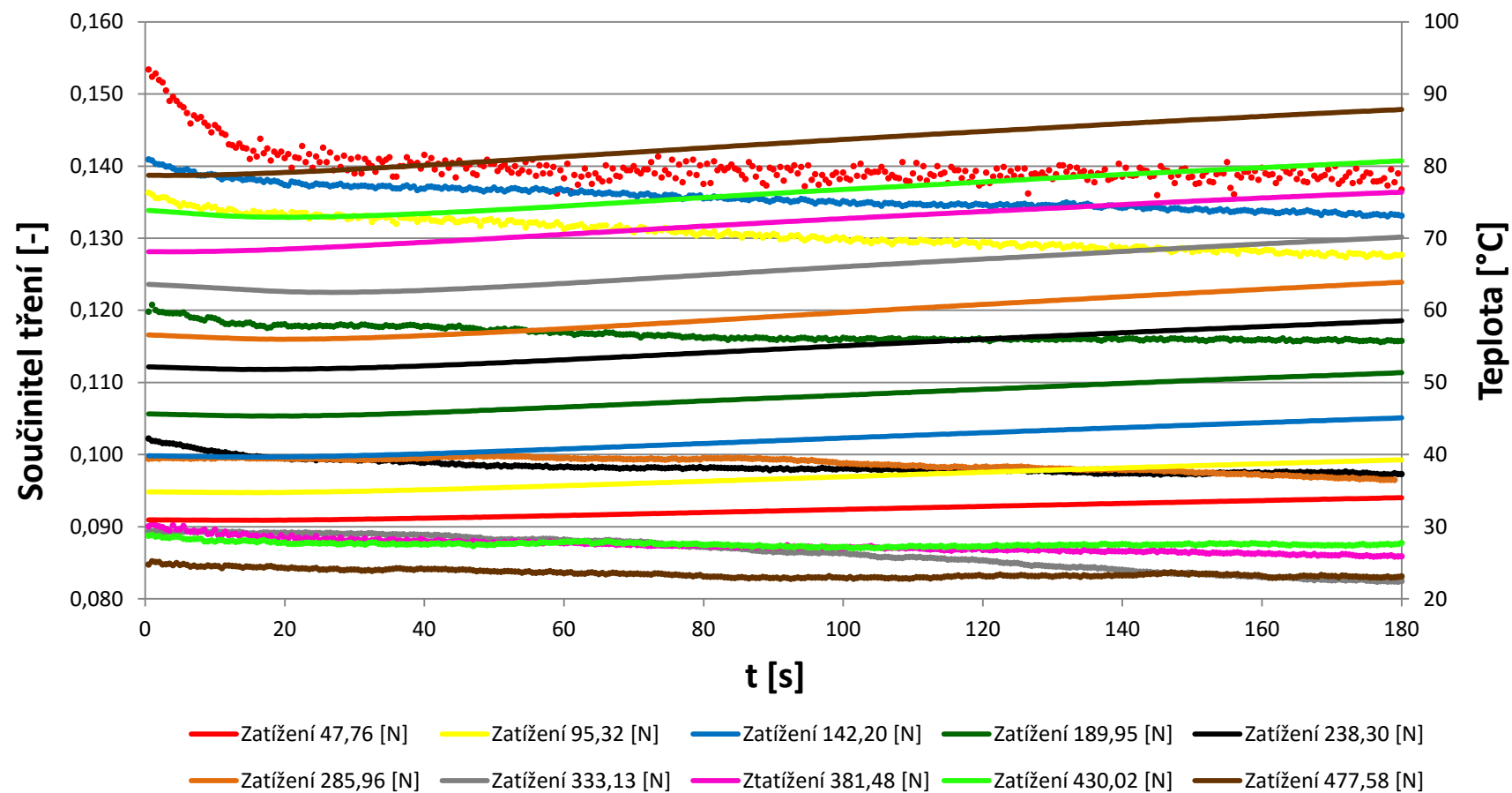
SKF 2 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2000 ot/min, při 430,022 N dosaženo 110°C



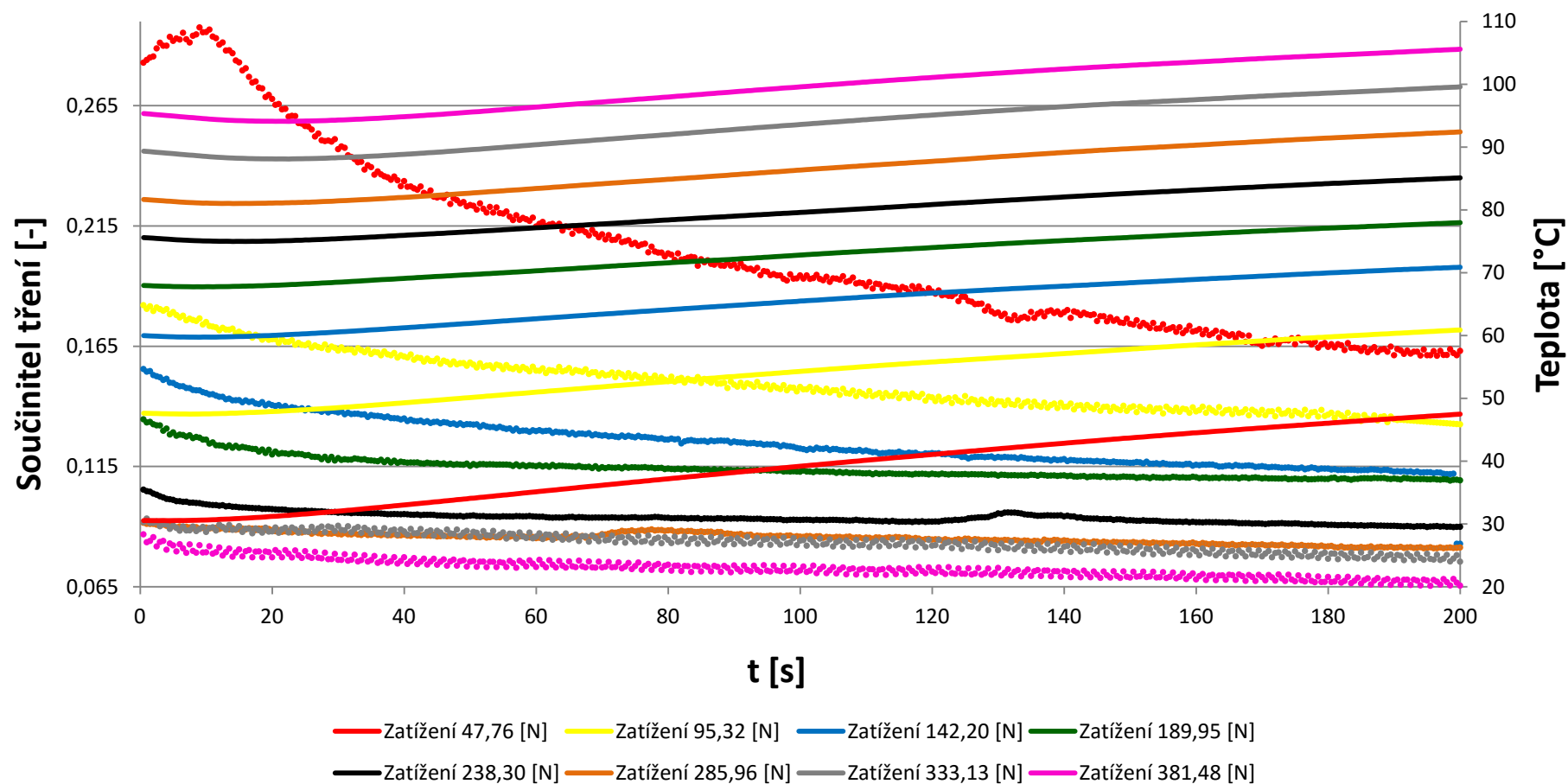
SKF 2 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2500 ot/min, při 381,48 N dosaženo 110°C



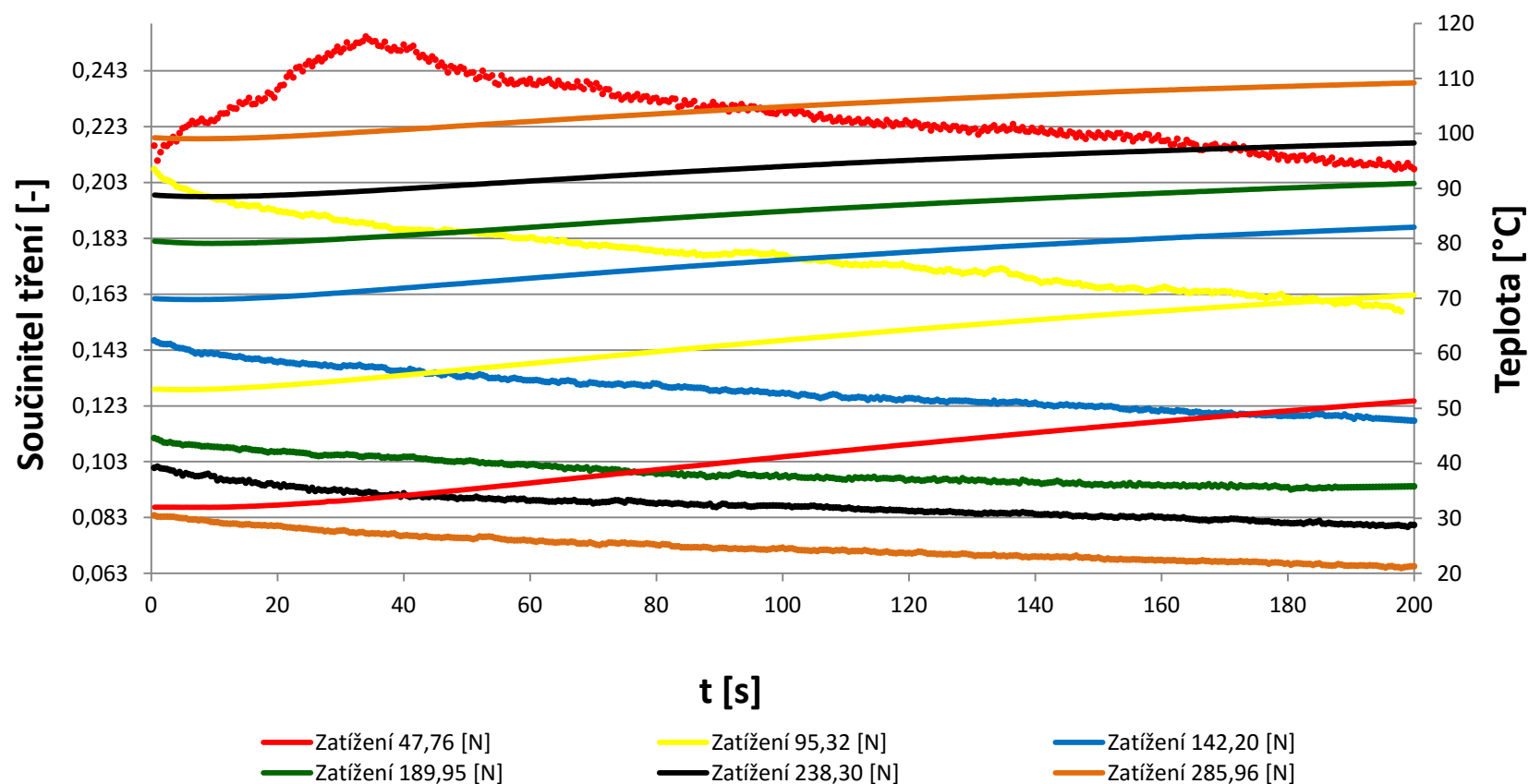
SKF 3 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 1000 ot/min



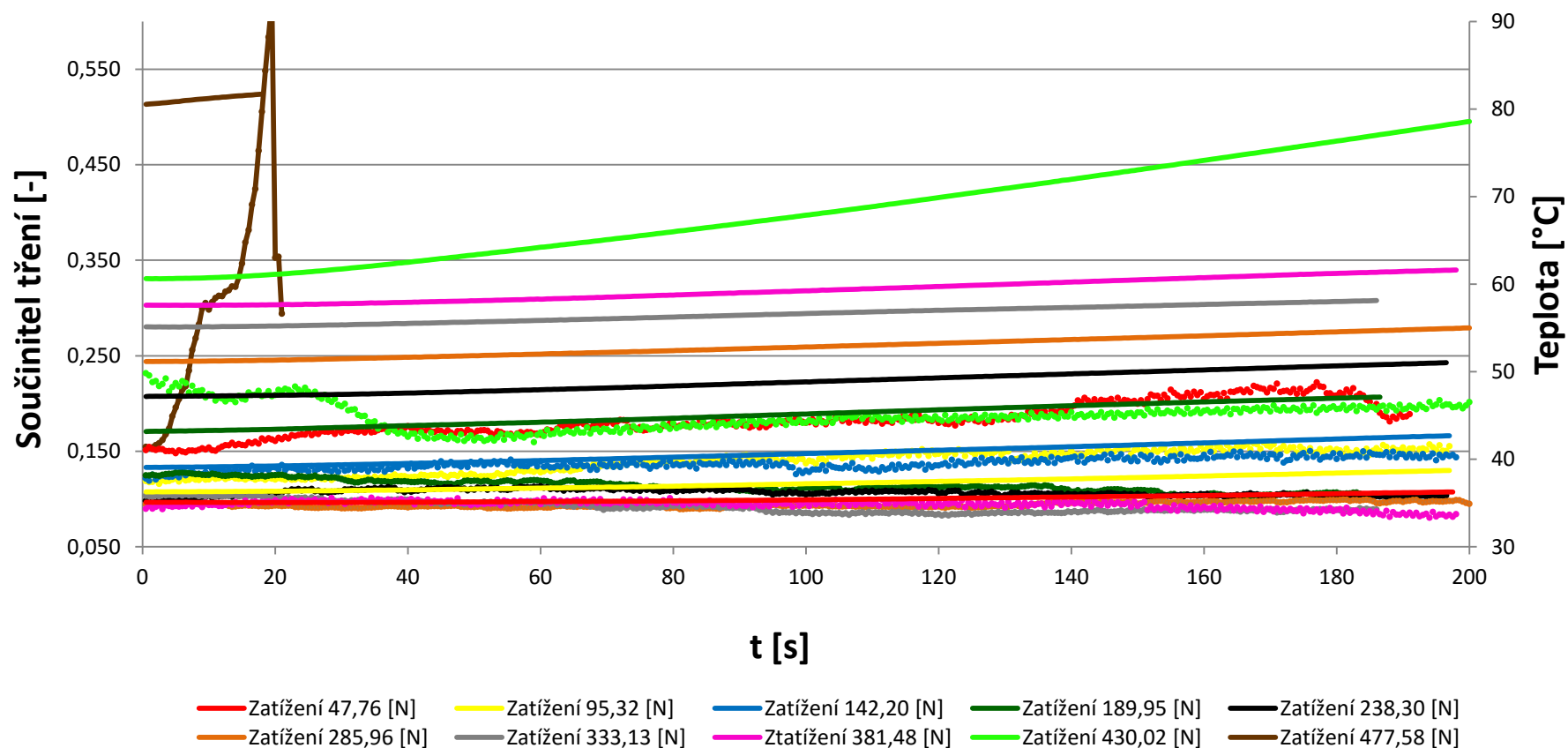
SKF 3 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2000 ot/min, při 381,48 N dosaženo 110°C



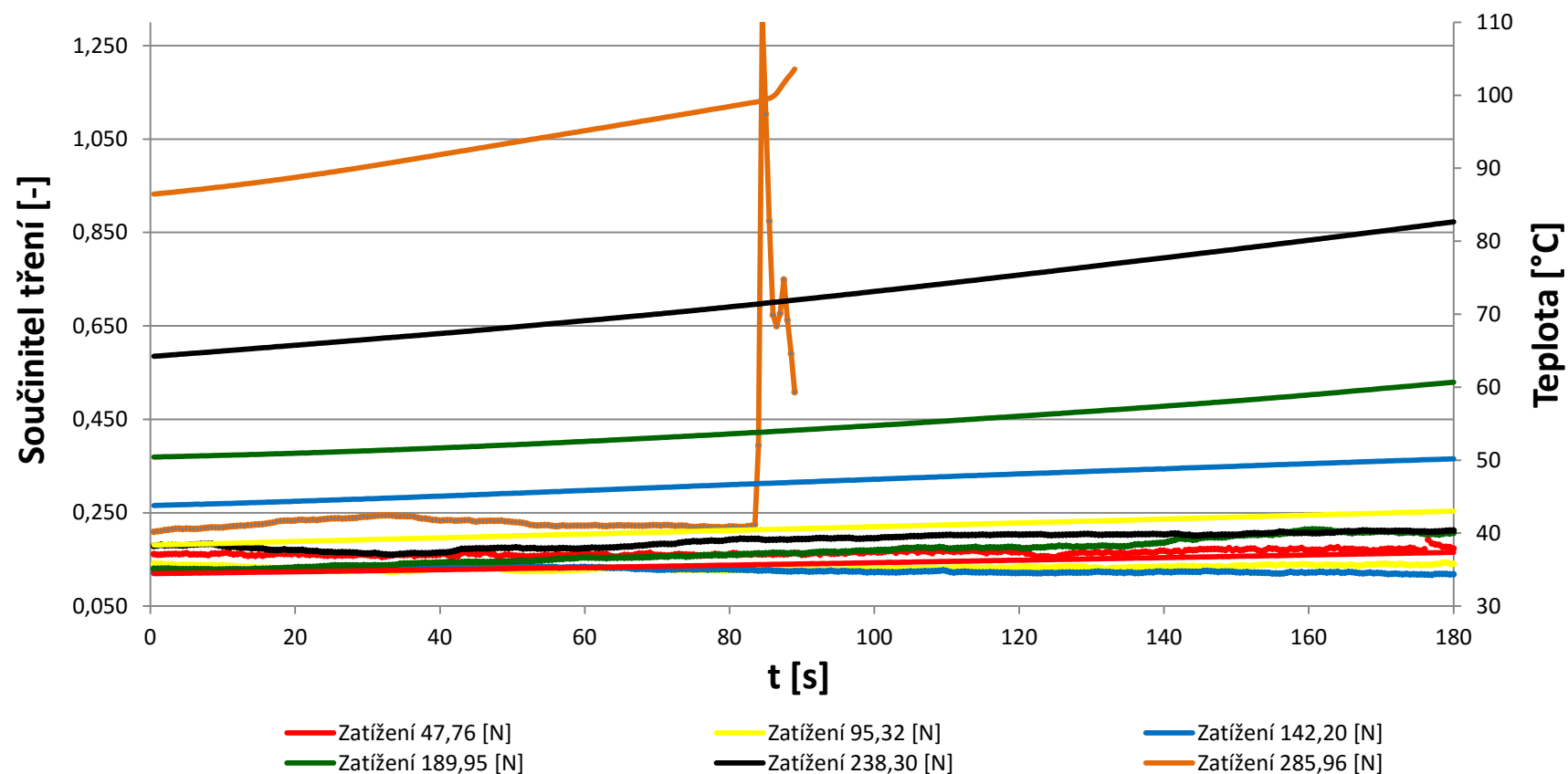
SKF 3 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2500 ot/min, při 285,96 N dosaženo 110°C



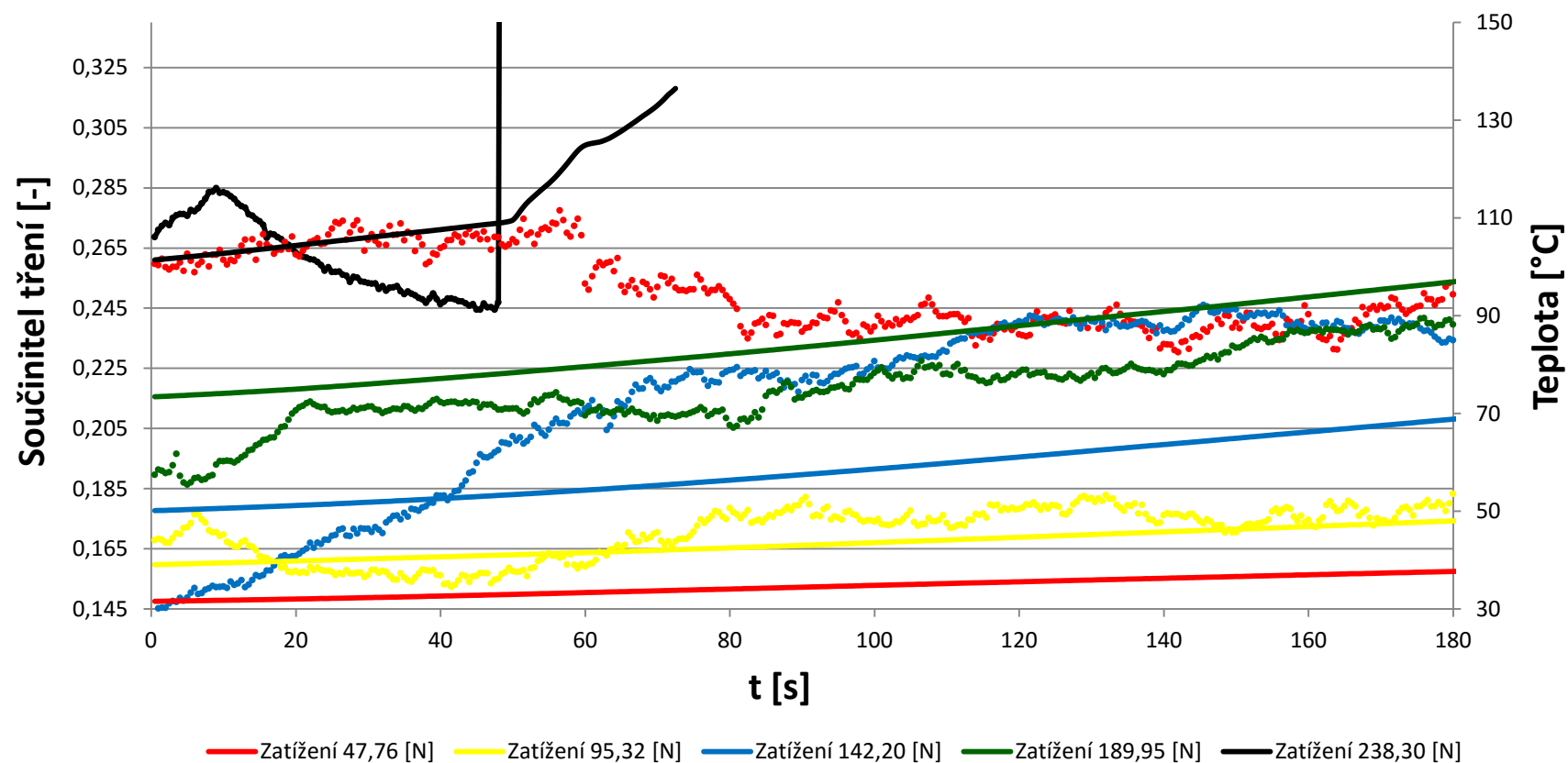
HENNLICH1 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 1000 ot/min, **zadření ložiska při 477,58 N**



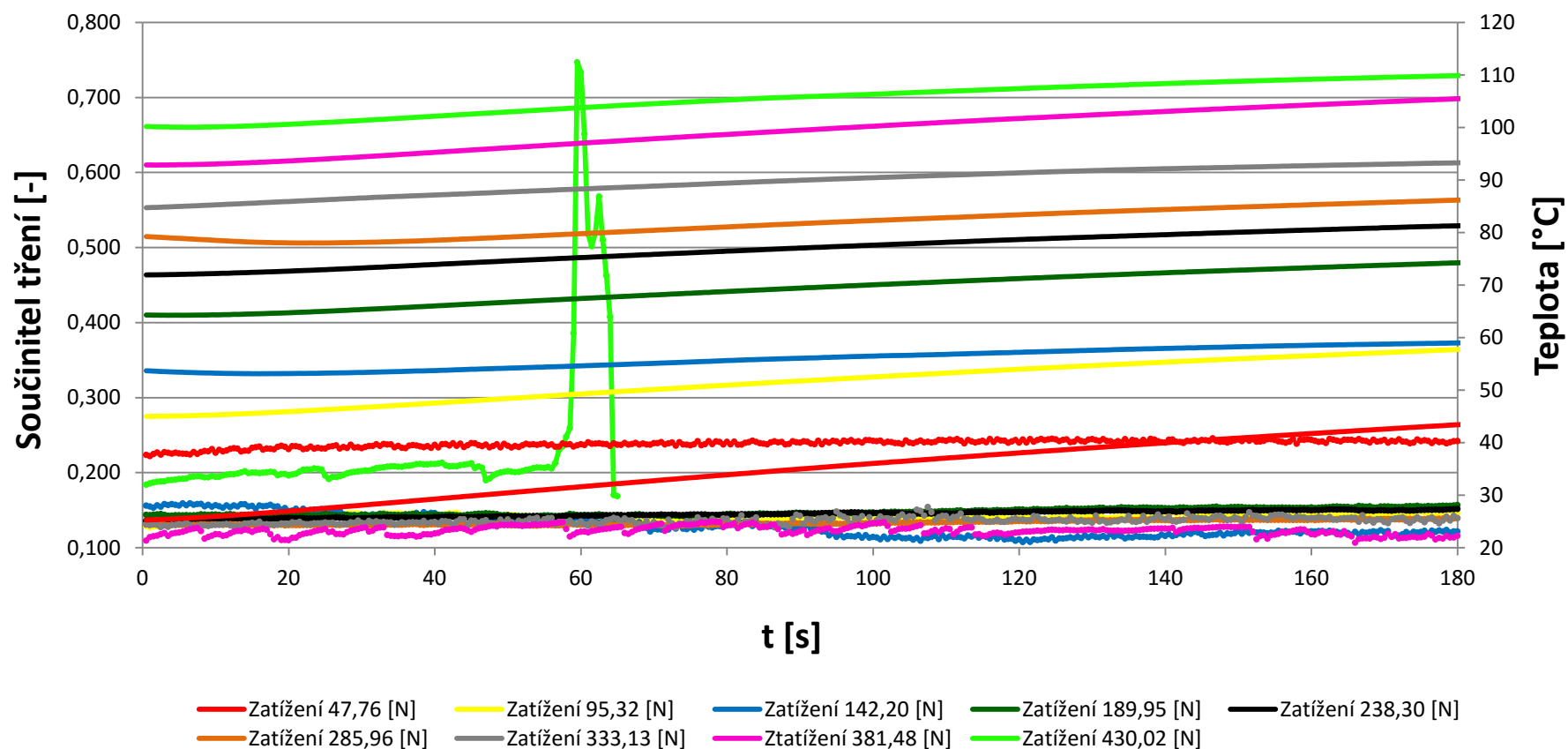
HENNLICH2 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2000 ot/min, zadření ložiska při 285,96 N



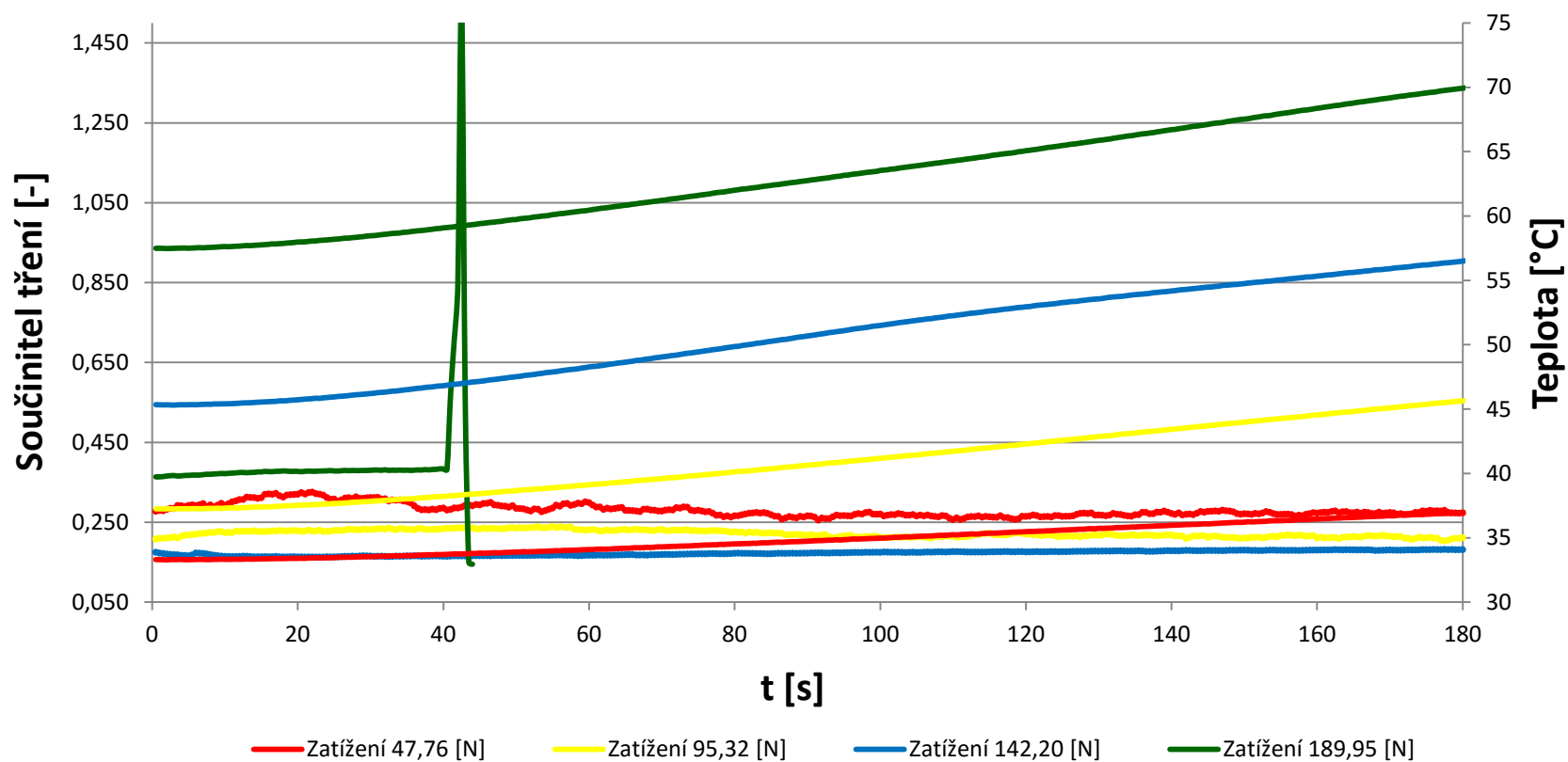
**HENNLICH3 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro
jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2500 ot/min,
zadření ložiska při 238,3 N**



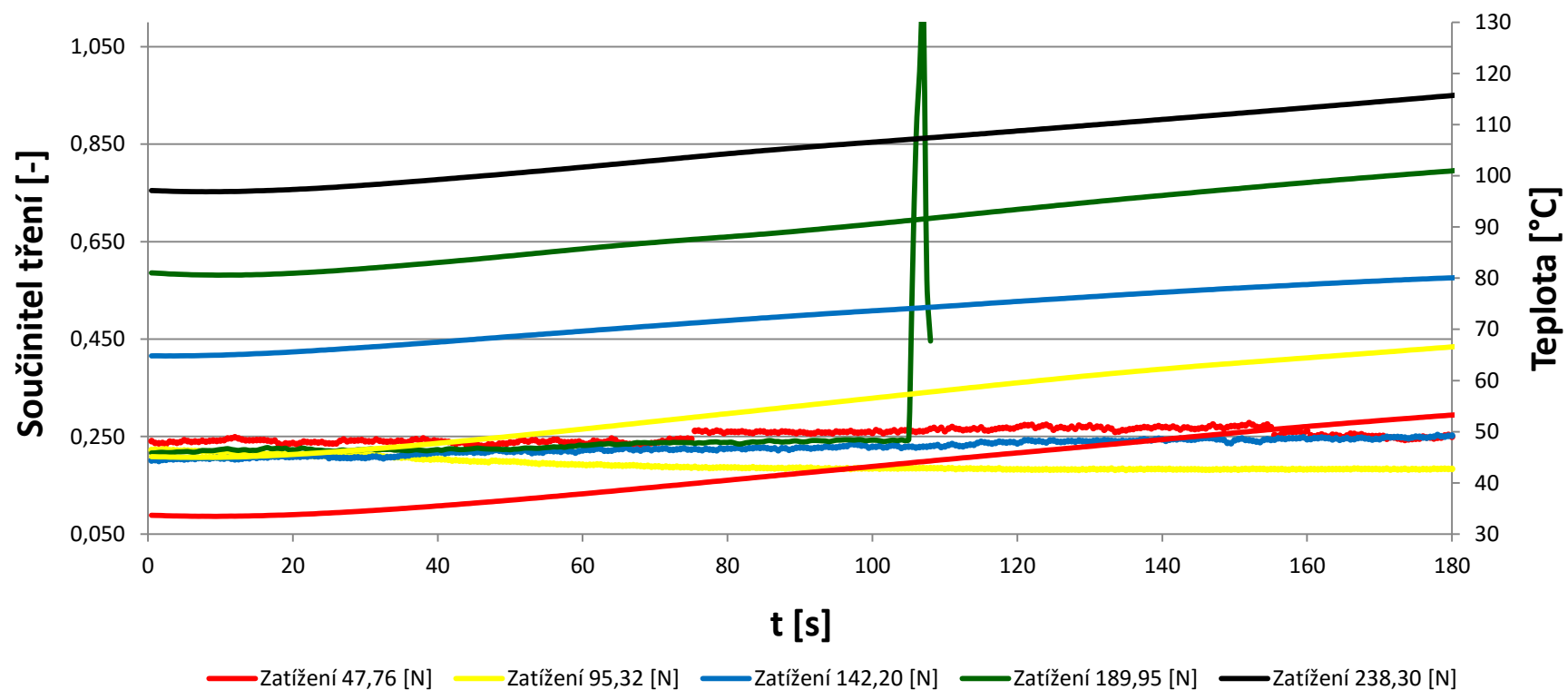
HENNLICH4 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 1000 ot/min, **zadření ložiska při 430,02 N**



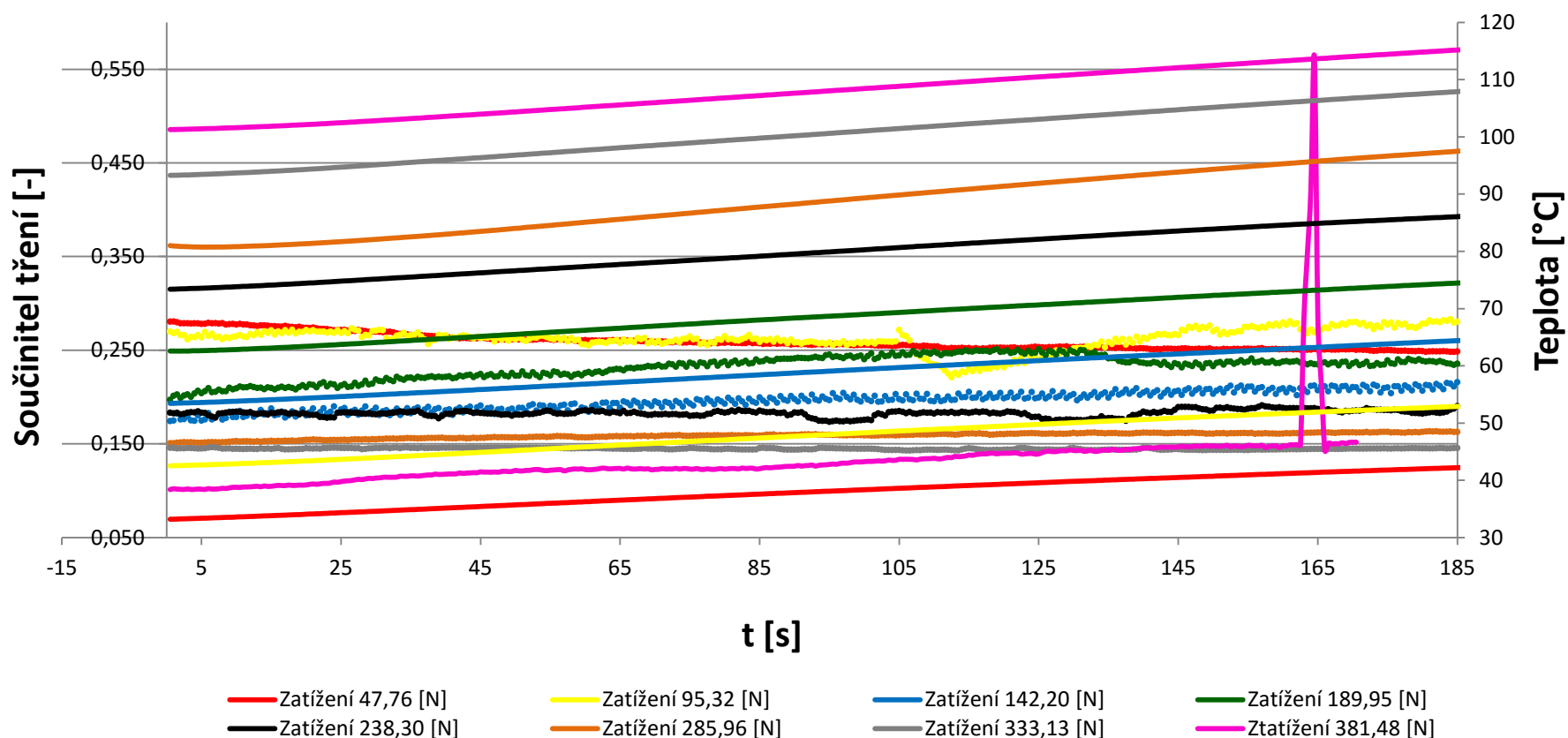
HENNLICH5 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2000 ot/min, zadření ložiska při 189,95 N



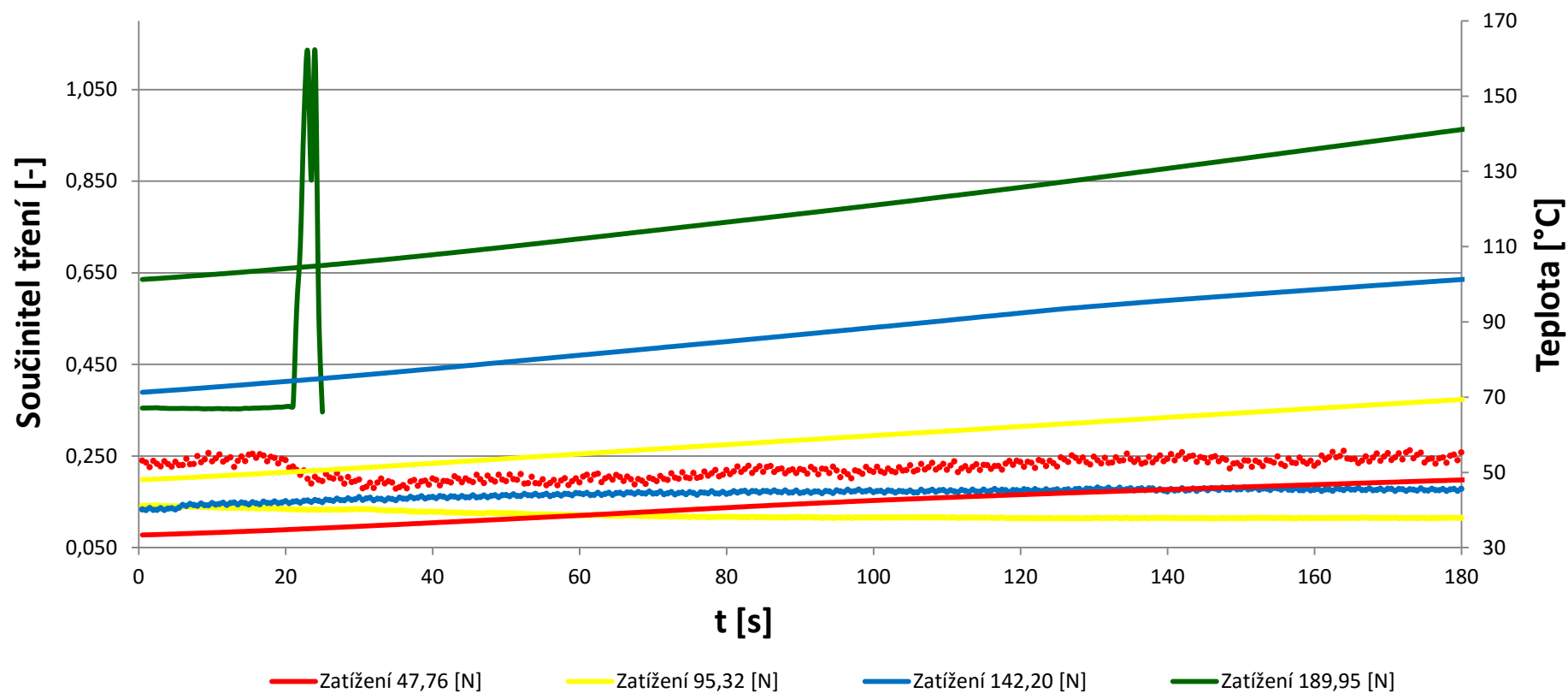
HENNLICH6 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2500 ot/min, **zadření ložiska při 238,30 N**



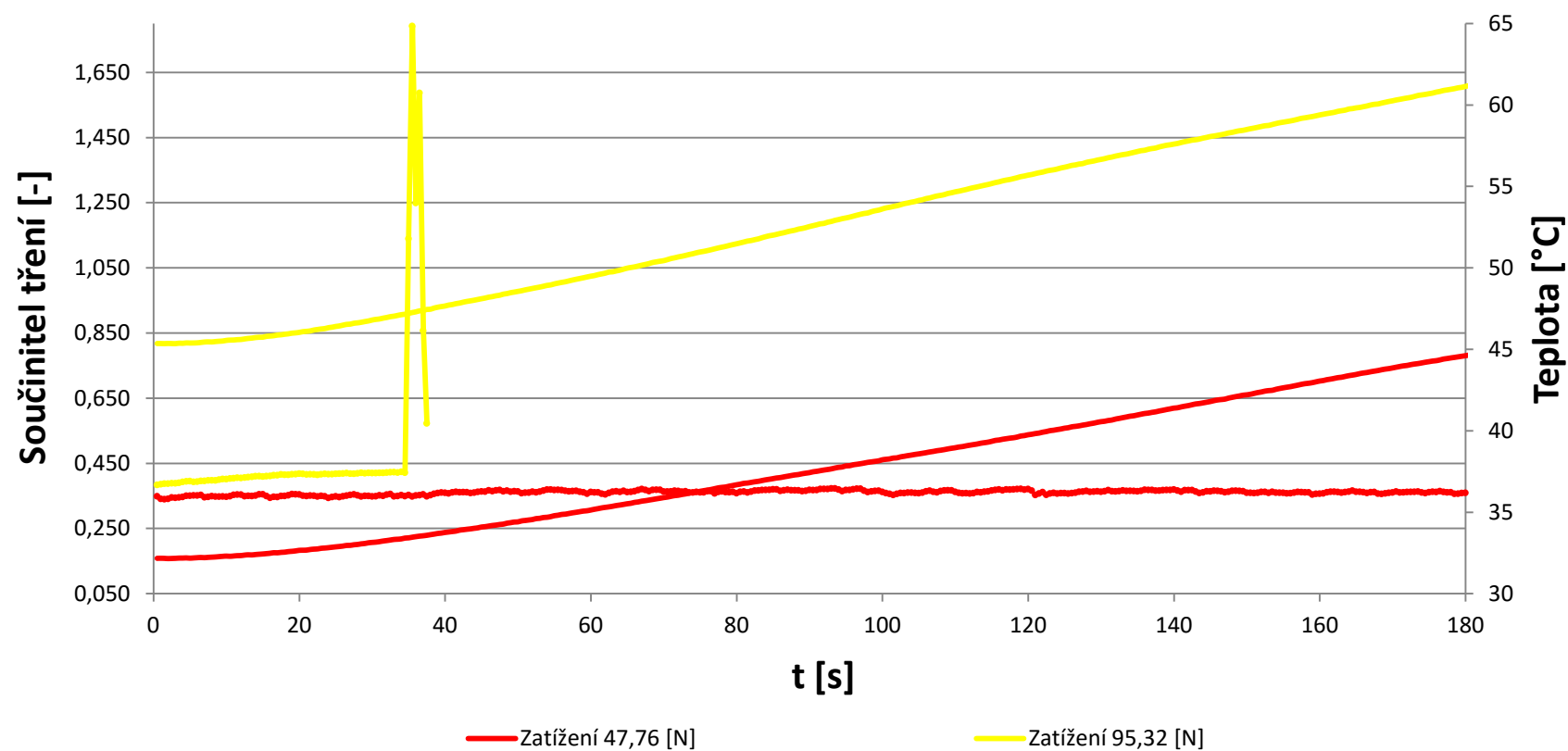
HENNLICH7 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 1000 ot/min, **zadření ložiska při 381,48 N**



HENNLICH8 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2000 ot/min, **zadření ložiska při 189,95 N**



**HENNLICH9 - Závislost součinitele tření a teploty na čase pro
jednotlivé velikosti zatížení v radiálním směru při 2500 ot/min,
zadření ložiska při 95,32 N**

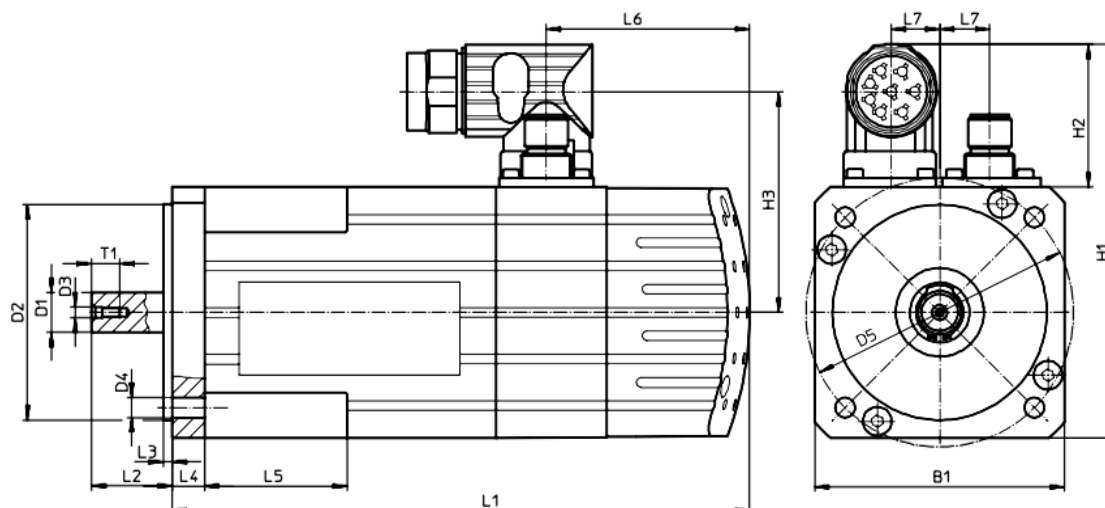


PŘÍLOHA Č. 2 - Servomotor a hřídel. spojka

- Servomotor festo 550 115 EMMS-AS-70-S-RM

VÝROBCE: Festo, s.r.o.

Elektrodynamický, bezkartáčový servomotor s permanentním magnetem.

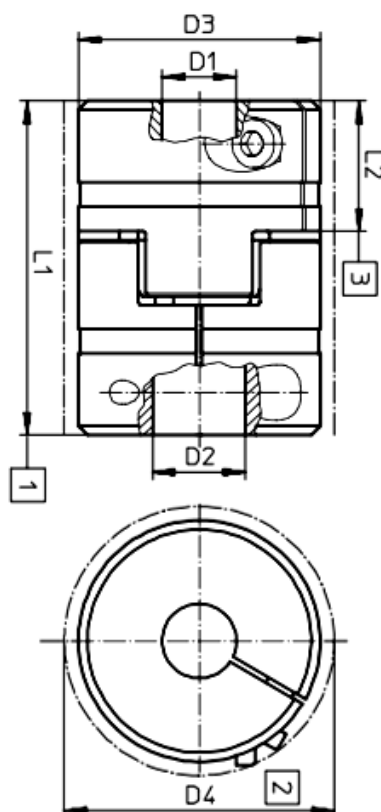


B1	D1	D2	D3	D4	D5	H1	H2
70	11 +0,012/+0,001	60 +0,012/+0,007	M2,5	5,5	75	109,5	39,5

NAPÁJECÍ NAPĚTÍ	[V DC]	360
JMENOVIT PROUD	[A]	2,2
ŠPIČKOVÝ PROUD	[A]	5
JMENOVITÝ VÝKON	[W]	866
ŠPIČKOVÝ MOMENT	[Nm]	3,1
JMENOVITÝ MOMENT	[Nm]	1,43
KLIDOVÝ MOMENT	[Nm]	1,64
JMENOVITÉ OTÁČKY	[ot./min]	5300
MAX. OTÁČKY	[ot./min]	6300
KONSTANTA MOTORU	[Nm/A]	0,674
ODPOR VINUTÍ	[Ω]	7,66
INDUKTIVITA VINUTÍ	[mH]	0,015
MOMENT SETRVAČNOSTI	[kgcm ²]	0,379
MOMENT SETRVAČNOSTI S BRZDOU	[kgcm ²]	0,449
ZATÍŽENÍ HŘÍDELE, RADIÁLNÍ	[N]	150
ZATÍŽENÍ HŘÍDELE, AXIÁLNÍ	[N]	75

- **Hřídelová spojka festo 558313 EAedMC-42-66-11-12**

VÝROBCE: Festo, s.r.o.



D1	D2	D3	D4	L1	L2
11	12	50	55	66	25

POLOMĚR UPNUTÍ 1	11 mm
POLOMĚR UPNUTÍ 2	12 mm
VELIKOST	42
MONTÁŽNÍ POLOHA	libovolná
MAX. OTÁČKY	6,000 1/min
SKLADOVACÍ TEPLOTA	-25...60°C
RELATIVNÍ VLHKOST VZDUCHU	0 - 95%
OKOLNÍ TEPLOTA	-25...60°C
MOMENT SETRVAČNOSTI	45,5 kgmm ²
PŘENOSITELNÝ KROUTÍCÍ MOMENT	17 Nm
HMOTNOST	166 g