

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Ing. Antonín Dvořák

**VĚTVENÉ MAZACÍ SYSTÉMY
A JEJICH PROUDOVÉ POMĚRY –
TRIBOLOGICKO-HYDRAULICKÉ ASPEKTY**

**BRANCHED CENTRAL LUBRICATION SYSTEMS
AND THEIR CURRENT PROPORTION – TRIBOLOGICAL –
HYDRAULIC ASPECTS**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: Doc. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc.
Oponenti: Prof. Ing. Jaroslav Janalík, CSc., VŠB-TU Ostrava
Doc. Ing. Miroslav Malý, CSc., TU Liberec
Doc. Ing. Karel Třetina, CSc., FSI VUT Brno
Datum obhajoby: 26. 6. 2007

KLÍČOVÁ SLOVA

centrální mazací systémy, mazání, reologie, simulace, nenevtonská kapalina, plastické mazivo

KEYWORDS

central lubrication systems, lubrication, reologie, simulation, nonnewton fluid, greas

Originál disertační práce je uložen na Ústavu konstruování, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

OBSAH

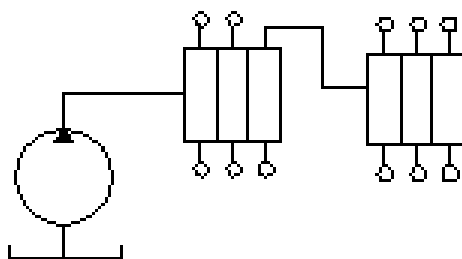
1	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	5
1.1	Způsoby mazání strojních částí a zařízení	5
1.2	Základní reologické látky, jejich reologické modely a diagramy	5
1.3	Matematické reologické modely plastických maziv	6
1.3.1	<i>Přenos tepla při proudění kapalin</i>	<i>8</i>
1.4	Plastická maziva.....	8
1.5	Měření tokových křivek, typy reometrů	9
1.6	Metody výpočtu hydraulických mechanismů použitelné u mazacích soustav s plastickými mazivy.....	9
2	ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	9
3	CÍL A ÚKOL DISERTAČNÍ PRÁCE.....	10
4	ANALÝZA ZKOUMANÉHO PROGRESIVNÍHO CENTRÁLNÍHO MAZACÍHO SYSTÉMU A EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....	11
4.1	Měření hustoty plastického maziva.....	12
4.2	Měření reologických veličin plastických maziv	13
4.3	Měření parametrů mazacího přístroje ACF 02	13
4.4	Měření parametrů mazacího přístroje ANC 20 P2.....	15
4.5	Měření tlakových ztrát v potrubí.....	15
4.5.1	<i>Měření tlakových ztrát v praxi</i>	<i>16</i>
4.6	Stanovení objemového modulu pružnosti maziva včetně mazacího systému	17
4.6.1	<i>Objemový modul pružnosti plastického maziva</i>	<i>17</i>
4.6.2	<i>Stanovení sdruženého modulu pružnosti mazacího systému.....</i>	<i>17</i>
4.6.3	<i>Měření charakteristik progresivního rozdělovače maziva v laboratorním systému centrálního mazání.....</i>	<i>18</i>
4.6.4	<i>Měření proměnného odporu proti pohybu při toku plastického maziva rozdělovačem – porovnání s výsledky programu Fluent</i>	<i>19</i>
4.6.5	<i>Třecí síly pístků progresivního rozdělovače maziva</i>	<i>20</i>
5	MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MAZACÍHO SYSTÉMU	21
5.1	Matematický model mazacího přístroje ACF 02	21
5.2	Matematický model mazacího přístroje ANC 02P2	21
5.3	Modelování toku plastického maziva	22
5.4	Kinematicko – dynamický model experimentálního mazacího systému s progresivním rozdělovačem maziva	22
6	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ	23
6.1	Vyhodnocení nejistot z experimentálně naměřených dat v tribologické laboratoři.....	24
6.2	Vyhodnocení nejistot z reálného měření dat v praxi.....	24

7 PŘÍNOS DISERTACE PRO PROJEKČNÍ A KONSTRUKČNÍ PRAXI.....	26
8 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ DALŠÍHO POSTUPU.....	27
9 VYBRANÉ POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE.....	27
10 ANNOTATION	32
11 CURRICULUM VITAE AUTORA.....	32

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

1.1 ZPŮSOBY MAZÁNÍ STROJNÍCH ČÁSTÍ A ZAŘÍZENÍ

Moderní stroje a jejich mechanismy jsou konstrukčně stále lépe propracovávány a výrobně precizněji provedeny. Tímto vývojem se postupně mění limitující faktory strojů. Tímto se podstatně zvyšují nároky na dodržování všech zásad správného používání a údržby strojů. Údržbu můžeme definovat jako udržování strojů a zařízení v takovém stavu, aby mohly vykonávat svou funkci. Počátkem těchto úkonů, a to především u nových konstrukčních celků, je mazání a kvalita mazání (tj. přesně stanovené dávky maziva, vhodný časový okamžik mazání) – ta je zpravidla dosažena jen za pomoci centrálních mazacích systémů (CMS).

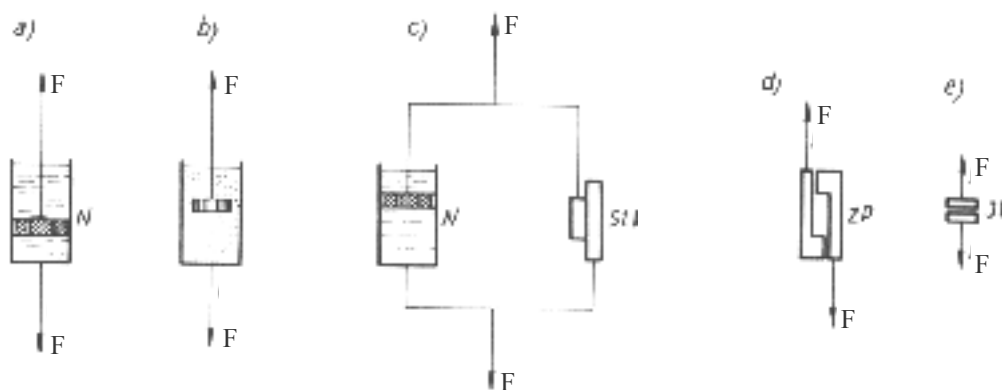


Obr. 1 Schéma progresivního CMS – tvoří jej hydrogenerátor, rozvodné potrubí a progresivní rozdělovač(-e)

1.2 ZÁKLADNÍ REOLOGICKÉ LÁTKY, JEJICH REOLOGICKÉ MODEL Y A DIAGRAMY

Centrální mazací systémy jsou složeny z mechanických částí [14]. Nejen mechanické části obvodu, ale především mazivo dopravované a rozdělované CMS do mazaných míst je tou „proměnnou veličinou“, která mění určitým způsobem provozní vlastnosti celého obvodu.

K plnění žádaných funkcí (jako mazání třecích ploch, konzervace mazaných povrchů, odvádění třecího tepla, zlepšování účinnosti, bránění vnikání nečistot, vynášení ořetrových částic atd.) musí mít mazivo vhodné vlastnosti. Mazivo si také musí, tyto atributy podržet co nejdelší dobu za nejrůznějších vlivů, kterým může být v provozu vystaveno (jsou to hlavně vlivy kyslíku, teploty a tlaku, zejména pak za současného katalytického účinku kovů a prachu, vlhkosti, elektrického pole, světla a jiného záření) [55], [56], [80], [81], [82].



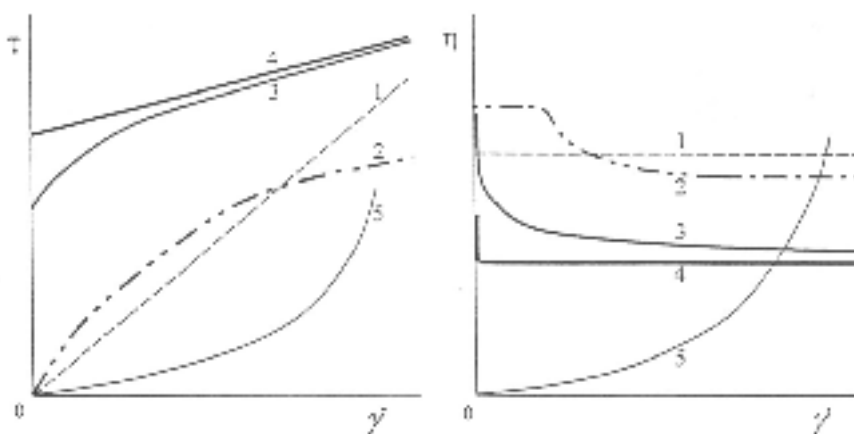
Obr. 2 Některé reologické modely

- a) viskozní kapalina c) plastické těleso
b) plastická látka d) deformačně zpevňující látka e) jednosměrné spojení

Plastická maziva se řadí mezi nenewtonské kapaliny. Maziva jsou popisována pomocí určitých matematických reologických modelů [53], [65], viz obr. 2.

Základní reologické látky mají charakterizovat přesné chování reálných materiálů [53]. Při kombinování reologických modelů základních látek obdržíme celkový reologický model, vyjadřující reologické chování skutečných materiálů v požadovaném stupni přesnosti.

Kapaliny, s nimiž pracují mazací systémy, jsou buď oleje nebo plastická maziva. Většinou se jedná o nenewtonské kapaliny – viz obr. 3. Některé přístroje na měření vlastností těchto látek jsou popsány v literatuře, např. [50], [60], [64], [65].

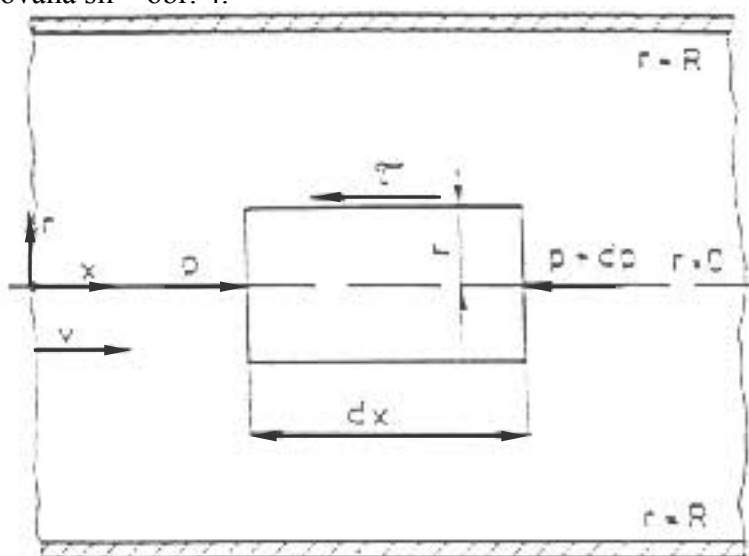


Obr. 3 Typy reogramů: 1 – newtonská kapalina, 2, 3, 4 – nenewtonské kapaliny, 2 – pseudoplastická kapalina, 3 – skutečná vazkoplastická kapalina, 4 – ideálně vazkoplastická, též binghamská kapalina, 5 – dilatantní kapalina

1.3 MATEMATICKÉ REOLOGICKÉ MODEL Y PLASTICKÝCH MAZIV

Přechody a jevy u látek (maziv) mezi klidem a tokem (prouděním), a to od tuhého až po kapalné skupenství, se zabývá obor nazývající se reologie (viz literatura [20], [24], [34], [60], [64], [65]).

Pro případ ustáleného laminárního proudění kapalin v kruhovém potrubí za působení tlakového spádu existuje rovnováha sil – obr. 4.



Obr. 4 Rovnováha sil při proudění kapaliny v potrubí

Platí rovnice: $p \cdot \pi r^2 - (p + dp) \cdot \pi r^2 - \tau \cdot 2\pi r \cdot dx = 0$ (1)

Tab. 1 Matematické reologické modely

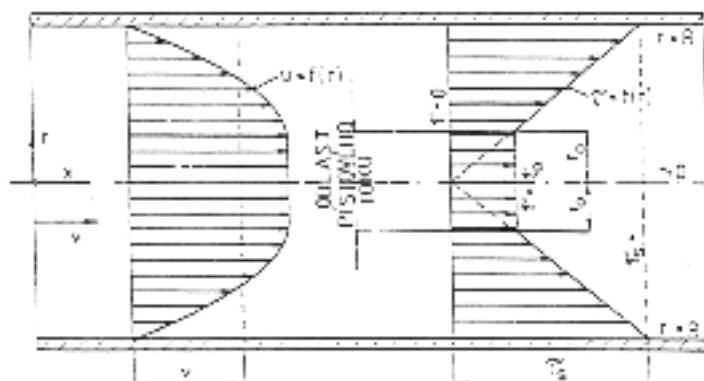
	<i>Bingham</i>	<i>Herschel-Bulkley</i>
<i>vzorec</i>	$\tau = \tau_o + \eta_B \cdot \dot{\gamma}$	$\tau = \tau_o + K \cdot \dot{\gamma}^n$
<i>napětí na stěně</i>	$\tau_{\max} = \frac{p_z \cdot R}{2l}$	$\tau_{\max} = \frac{p_z \cdot R}{2l}$
<i>střední rychlost proudění</i>	$v_s = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{p_z \cdot R^2}{8l \cdot \eta_B} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{r_o}{R} \right) - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{r_o}{R} \right)^4 \right]$	$v_s = \frac{1}{\eta_o} \cdot \left(\frac{p_z}{2l} \right)^m \cdot \frac{1}{m+1} \cdot \frac{1}{R^2} \cdot \left[(R-r_o)^{m+1} \cdot R^2 - \frac{(R-r_o)^{m+2} \cdot 2R}{m+2} + \frac{(R-r_o)^{m+3}}{(m+2) \cdot (m+3)} \right]$
<i>poznámka</i>	τ_o – počáteční smykové napětí [Pa] n – index toku [1]; $m = \frac{1}{n}$	η_B – Binghamova viskozita [Pa.s] K – součinitel konzistence [Pa.s ⁿ]

Tokové křivky – reogramy – se zjišťují experimentálně. Naměřená závislost $\tau [Pa] - \dot{\gamma} [s^{-1}]$ se pro účely dalšího zpracování aproximuje analytickým vztahem, tzv. matematickým reologickým modelem (viz tabulka 1).

Jako matematických reologických modelů se používá dvouparametrových nebo tříparametrových časově nezávislých rovnic. Přehled některých známých modelů pseudoplastických a vazkoplastických látek uvádí následující literatura: [24], [34], [80], [81], [82].

Nejjednodušší modely, tj. model Ostwalda-de Waelea a model Binghamův, jsou zároveň nejpoužívanější, pokud vstupují jako stavové rovnice do vztahů popisujících proudění pseudoplastických nebo vazkoplastických kapalin [34].

Rychlostní profil proudění Binghamovy kapaliny je znázorněn na obr. 5 [34].



Obr. 5 Tvar rychlostního profilu a průběh smykového napětí pro binghamskou kapalinu

K přesnější náhradě skutečné (naměřené) tokové závislosti slouží pak další složitější vztahy. Pro vazkoplastické látky je patrně nejpoužívanější Herschelův-Bulkleyův model [34].

1.3.1 Přenos tepla při proudění kapalin

V této kapitole je velmi stručně nastíněno, k jakému tepelnému procesu dochází při axiálním proudění maziva kruhovým potrubím, resp. při dopravování maziv potrubím a jak je touto dopravou ovlivněno samotné médium z hlediska termodynamiky. Sledované mazivo se ohřívá vlivem vnitřního tření a tření o stěny, což odpovídá velikosti ztrát energie přivedené z motoru do čerpací jednotky mazacího přístroje při dopravě maziva potrubím a dalšími prvky mazacího systému dále do mazacích míst. Při simulaci toku plastických maziv se uvažují parametry při dané výpočtové teplotě a na teplotě je závislá dynamická viskozita. Z toho důvodu nás např. při vlastním měření reometrických parametrů plastických maziv musí zajímat i tepelné výpočty.

Přenos tepla při proudění kapalin je popsán Fourierovou a Kirchoffovou rovnicí [67], kterou můžeme pro případ konstantní tepelné vodivosti kapaliny uvést ve tvaru:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \lambda \nabla^2 T + \bar{\bar{\tau}} : \bar{\bar{\Delta}} + \dot{Q}^{(g)} \quad (2)$$

Rozepíšeme-li levou stranu rovnice dostaneme

$$\rho c_p \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) T \right\} = \lambda \nabla^2 T + \bar{\bar{\tau}} : \bar{\bar{\Delta}} + \dot{Q}^{(g)} \quad (3)$$

→ rychlost akumulace v pevném
→ rychlost konvektivního přenosu tepla
→ rychlost konduktivního přenosu tepla
→ rychlost disipace mech. energie
→ vydatnost objemového zdroje tepla

a kde $\bar{\bar{\tau}} : \bar{\bar{\Delta}}$ - je skalární součin tenzoru dynamických napětí a tenzoru rychlosti deformace,

\dot{Q} - vydatnost objemového zdroje tepla.

Z uvedených vztahů (viz disertační práce) je patrné, že při dopravě maziva do mazacích míst se celá tlaková ztráta na daném úseku mazacího obvodu, resp. energie vložená na překonání tlakové difference dvou míst v obvodu při toku maziva, přemění na teplo.

Dále při daném faktu, že na rozdíl od hydraulických systémů většina mazacích obvodů nevykonává skoro žádnou práci*, můžeme konstatovat, že téměř celý vložený příkon se přemění na teplo.

**Pozn.: Při daném malém dopravovaném množství maziva nelze uvažovat o ztrátách z uvádění maziva do pohybu. Také vezmeme-li v úvahu většinu mazaných míst, která jsou totiž povětšinou tvořena valivými ložisky nebo kluznými ložisky a která nevyžadují hydrostatické mazání, je také tlaková práce maziva zanedbatelná.*

Z toho vyplývá, že efekt resp. hodnota „práce“ mazacích systémů spočívá ve snížení opotřebení, úspora příkonu mazaného stroje při vykonávané činnosti, zvýšení ekologie provozu mazaného zařízení a snížení nákladovosti na obsluhu atd.

1.4 PLASTICKÁ MAZIVA

Vzhledem k tomu, že se ve stále větší míře používají ekologická plastická maziva, byla právě s nimi prováděna většina měření.

Tato maziva jsou určena pro široké použití v potravinářství a průmyslu. Jsou biologicky odbouratelná nad 90% za 21 dnů – podle testu CEC L-33-A-93 [70].

1.5 MĚŘENÍ TOKOVÝCH KŘIVEK, TYPY REOMETRŮ

Zjišťování tokových křivek neneutonských kapalin je úloha značně obtížná. Z mnoha známých a vyráběných přístrojů se pro neneutonské kapaliny hodí pouze takové přístroje, u kterých je geometrie toku jednoznačně definována a u nichž můžeme určit hodnotu gradientu rychlosti $\frac{du}{dr}$ a jemu odpovídající hodnotu tečných napětí.

Tomuto vyhovují pouze viskozimetry kapilární, kde se proudění kapaliny řídí Poiseuilleovým zákonem, viskozimetry rotační, pro které platí zákony Couetteova proudění v mezikruží dvou sousedních, navzájem se otáčejících válců a viskozimetry kuželové, kde je rovněž Couetteovo proudění jako zvláštní případ proudění ve štěrbině mezi deskou a rotujícím kuželem [50].

1.6 METODY VÝPOČTU HYDRAULICKÝCH MECHANISMŮ POUŽITELNÉ U MAZACÍCH SOUSTAV S PLASTICKÝMI MAZIVY

Pro výpočty hydraulických mechanismů je možno využít známé elektrohydraulické analogie ([36], [59]) nebo analytické vyjádření smykového napětí, příp. z něj odvozené rychlosti proudění v průřezu sledovaného potrubí (viz výše) – platí pro délkové ztráty. Pomocí těchto matematických vyjádření probíhaly simulace toku plastického maziva. Další možností je výpočet toku maziva metodou konečných objemů. Také tento způsob byl v rámci této disertace prověřován. Šlo o doktorandskou spolupráci s VŠB Ostrava, jejíž cílem bylo ověření shody výsledků výpočtů toku plastického maziva získaných programem Fluent s výsledky experimentů.

2 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Centrální mazací systémy jsou dnes již velmi propracovaná zařízení, ve kterých jsou implementovány poznatky z techniky, hydrauliky a elektroniky a které tak umožňují zcela automatické mazání. Samotné prvky CMS jsou technicky propracované jak z hlediska typu osazení na daný stroj či zařízení, tak z hlediska minimálních nákladů na výrobu tak i životnostního [92]. Obvody CMS jsou tak modulární, že je možno je uzpůsobit dle mazaného stroje, zařízení či mechanismu. Variabilnost CMS je taková, že můžeme zohlednit hledisko požadovaného druhu nebo dávky maziva do mazaného uzlu a nastavit různou periodu mazání. Řízení a kontrolu chodu CMS lze zajistit pomocí samostatné automatiky nebo přímo začleněním do systému řízení mazaného stroje či zařízení. Tedy téměř vždy jsou CMS „šity na míru“ danému problému mazání, ale ve věku počítačů je zajímavé, že téměř nikdy neprobíhá výpočtová optimalizace tlaku nebo tlakové ztráty a průtoku nebo rychlosti proudění maziva (jak ji např. známe z pevnostních výpočtů konstrukcí) před samotnou realizací. Provedení tohoto výpočtu má vliv na parametry jednotlivých prvků CMS (pevnost potrubí, hadic a ostatních prvků, požadovaný výkon/příkon mazacího přístroje resp. celá energetická/ekonomická bilance CMS).

Proč *téměř* nikdy? – existují tabulky nebo grafy na stanovení tlakové ztráty na základě průtoku a typu maziva, teploty okolí, potrubí (průměr/materiál) atd., ale ty jsou nepřesné a zastaralé (např. neustálá obměna či inovace maziv) a pro další nové parametry (typ maziv, prvků CMS) na vyhotovení pracné.

Médiiem v CMS, ať už se jedná o ztrátové nebo oběhové mazání, je mazivo (většinou newtonská kapalina). Ve většině literárních pramenů se uvádějí samostatně **reologické modely** jednotlivých látek – jejich **charakteristiky** a případné kombinace [53], [65]. Stejně tak tomu je u matematických reologických modelů [24], [34], [64].

Není snadné nalézt literaturu zabývající se komplexně celou problematikou **centrálních mazacích systémů** včetně plastických (ekologických) maziv. Největší potíže nastávají v určování vlastností maziv, protože jejich charakter je neustále měněn vlivy okolí (teplota, tlak) a procesy (reopexie/tixotropie, dilatance atd.) [25], [34], [56], [57], probíhajícími při dopravě a rozdělování maziva mazacím systémem. Podobným problémem je i neustálá inovace a široký výběr maziv nabízený projektantům a z toho tedy plyne neustálá změna kvalitativních vlastností používaných maziv (τ_0 , η , K , n) [50], [60], [64].

Při uvažování zjednodušených matematických vztahů mezi rychlostí deformace a napětím jsou vyvíjeny **reometry** k měření kapalin rozdílných parametrů (různé typy kapalin). Např. u všech reometrů se předpokládá, že proměřované tekutiny smáčejí pracovní plochy, to znamená, že rychlost kapaliny u stěny měřicího elementu zařízení je stejná jako rychlost tohoto elementu. Snad nejvíce používané viskozimetry pro **newtonské kapaliny** jsou viskozimetry rotační [33], [50], [87]. Při měření vlastností plastických maziv, je nejvíce používaná konfigurace kužel-disk (to pro snadné určení rychlosti smykové deformace), lišící se od koaxiálních disků profilem rotujícího vřetene.

Naměřené parametry maziv se poté musí začlenit do výpočtů, kde tvoří materiálové konstanty, se kterými se dále pracuje ve výpočtu. Centrální mazací systémy – hydraulické mechanismy se převážně uvažují jako systémy se **soustředěnými parametry** [22], [36], přičemž se aplikují poznatky z elektrických obvodů, i když již prováděné srovnávací výpočty tlakových ztrát ve vedení pomocí **elektrohydraulické analogie** [37], [41] s výsledky měření plastických maziv, ne zcela souhlasí (konkrétně hydraulický odpor proti pohybu – ztráty třením v potrubí). Protějškem jsou složitější výpočty proudění kapalin, jako použité např. v programu FLUENT a využívající metod mechaniky kontinua [68], [69]. Pomocí tohoto programu je možné řešit výpočty i se stlačitelnými newtonskými kapalinami, pro které má tento program zabudován i matematický aparát. Jeho nevýhoda spočívá v náročnosti na odbornost uživatele – nejen znalosti z oboru, ale znalosti ovládání (nastavení, parametry) programu a v neposlední řadě také určitá praxe ve výpočtech pomocí tohoto programu.

Měření na **stendu centrálního mazacího systému**, ale i měření reologických vlastností plastických maziv na reometrech, poskytlo důležité vstupní a kontrolní údaje pro výpočty. Je možno konstatovat, že výsledky simulací budou tak přesné, jak spolehlivě dokážeme určit vlastnosti maziva a charakter zatížení systému centrálního mazání za daných okolních a provozních podmínek, což se potvrdilo při simulaci toku plastického maziva vedením mazacích systémů.

3 CÍL A ÚKOL DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je pro praxi přijatelný matematický popis stendu centrálního mazacího systému s progresivním rozdělovačem maziva, na kterém probíhalo měření v laboratoři a to tak, aby bylo možné predikovat provozní stavy pomocí simulace, což by významně přispělo k předcházení a řešení krizových situací při provozu systémů v praxi. Samozřejmostí je tento

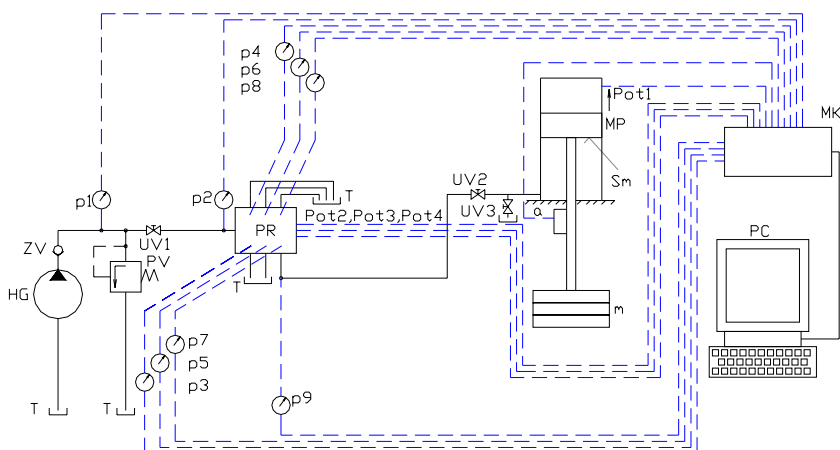
matematický model ověřit pomocí experimentu. Stěžejním úkolem by měla být však analýza hlavního prvku centrálních mazacích systémů – progresivního rozdělovače maziva.

Dílčí cíle disertační práce:

- tlaková a průtoková charakteristika vzduchového mazacího přístroje ANC 20P2
- určení tlakové ztráty v kanálcích progresivního rozdělovače maziva,
- zjištění závislosti odporu proti pohybu maziva na míře otevření přepouštěcího kanálku v progresivním rozdělovači maziva,
- stanovení závislosti posunutí pístků na protitlaku v jednotlivých výstupech progresivního rozdělovače (na posuvu pístků je závislý objem dodaného maziva do mazaného uzlu),
- simulace kinematiky a dynamiky progresivního rozdělovače maziva pomocí programu Dynast,
- simulace tlakové ztráty ve vedení (potrubí) centrálních mazacích systémů pomocí programu Dynast,
- simulace proudění plastického maziva pomocí programu Fluent (ve spolupráci s VŠB Ostrava),
- sloučit do jednoho celku všechny jednotlivé simulované části centrálního mazacího obvodu tak, aby představovaly celý laboratorní systém centrálního mazání v dostatečné šíři pro použití při projekci obdobných dalších či jiných centrálních mazacích systémů s progresivním rozdělovačem a nejen s ním.

4 ANALÝZA ZKOUMANÉHO PROGRESIVNÍHO CENTRÁLNÍHO MAZACÍHO SYSTÉMU A EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Měřicí systém pro laboratorní CMS s jedním progresivním rozdělovačem maziva byl sestaven v tribologické laboratoři Odboru fluidního inženýrství V. Kaplana. K dispozici byly dva typy hydrogenerátorů ACF 02 (pohon elektrický) a ANC 20 P2 (pohon pneumatický), progresivní rozdělovač typu PRB, používaný jako hlavní v rozsáhlejších systémech, kovové trubky a hadice různých průměrů a délek. Vlastnosti mazaného místa (např. ložiska) byly simulovány pomocí měřicího přípravku s možností měření přitekajícího množství maziva a volby zatížení (simulován odpor vniknutí do mazacího místa) nebo rotačního ložiska s ručním pohonem.



Obr. 6 Schéma zapojení snímačů na stendu centrálního mazacího systému

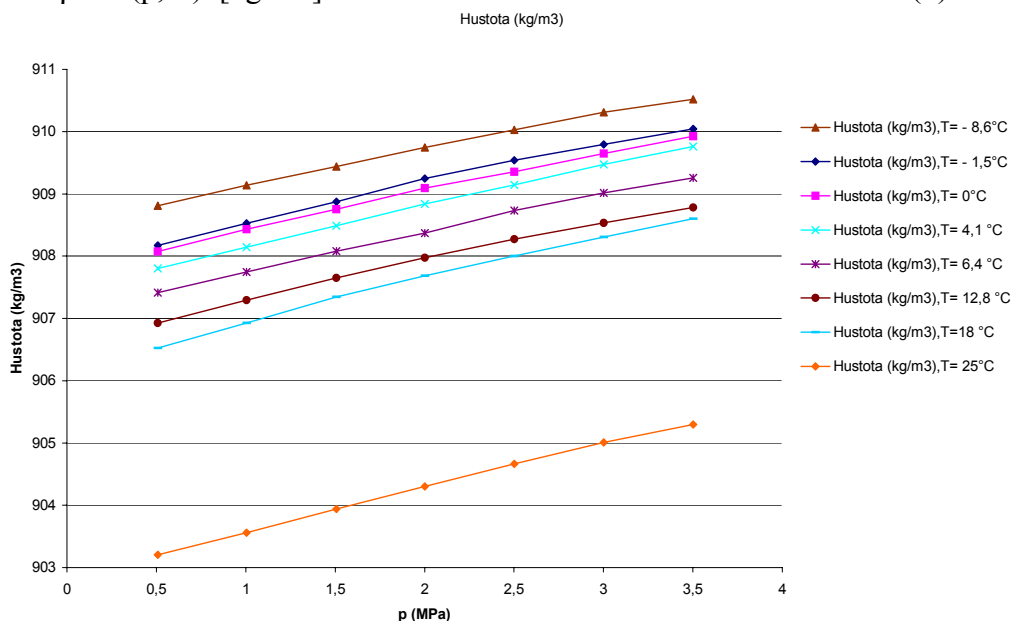
Na obr. 6 je schématicky zobrazeno zapojení celého stendu centrálního mazacího systému. Hydrogenerátor (HG) odebírá z nádrže (T) plastické mazivo, které přes zpětný ventil (ZV) teče potrubím k progresivnímu rozdělovači (PR). Potrubí za hydrogenerátorem může být uzavřeno v případě kontroly hydrogenerátoru nebo poruchy na systému uzavíracím ventilem (UV1). V případě dosažení pojistného tlaku je mazivo přepouštěno přes pojistný ventil (PV) do nádrže (T). K jednomu vývodu na progresivním rozdělovači je připojen měřicí přípravek (MP) potrubím přes uzavírací ventil (UV2). Pomocí kombinace uzavíracích ventilů (UV2, UV3) je možno plastické mazivo z měřicího přípravku (MP) vypouštět do nádrže (T). Tlak v různých místech CMS je snímán tlakovými snímači (p1 až p10). Posuv pístků progresivního rozdělovače je zjišťován posuvnými potenciometry (pot2 až pot4) a posuv pístnice měřicího přípravku (MP) je snímán posuvným potenciometrem (pot1). Pro ověření předpokladů dynamického chování hydraulického obvodu se také zjišťovalo zrychlení pístnice pomocí indukčního snímače zrychlení (a). Signály z těchto snímačů jsou přiváděny do měřicí karty (MK) a odtud vedeny a zaznamenávány počítačem (PC).

4.1 MĚŘENÍ HUSTOTY PLASTICKÉHO MAZIVA

Hustota vyjadřuje vlastnost látky a je závislá na tlaku a teplotě kapaliny. Plastická maziva jsou složena z několika komponentů – základový olej, zpevňovadlo (Al, Ca, Li, Ba, bentonové, silikagelové a další) a zušlechťující přísady popř. plnidla.

Obecný vztah pro závislost hustoty na tlaku a teplotě:

$$\rho = f(p, T) \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}. \quad (4)$$



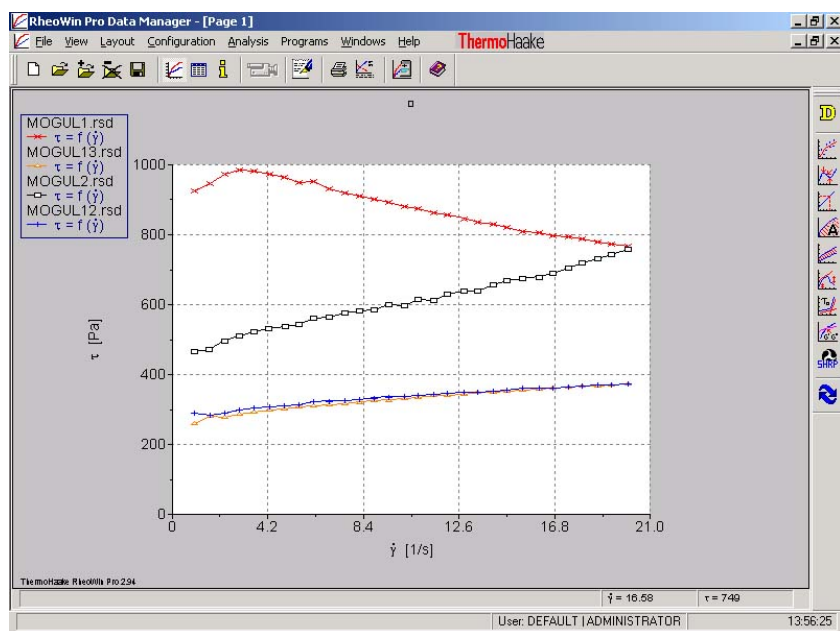
Obr. 7 Hustota plastického maziva MOGUL EKO-L1 v závislosti na tlaku a teplotě

Tab. 2 Pro naměřené průběhy hustoty byly získány polynomy

Teplota T (°C)	Polynom	Hodnota spolehlivosti R (1)
-8,6	$\rho = 0,5771 \cdot p + 908,56$	0,9969
...

4.2 MĚŘENÍ REOLOGICKÝCH VELIČIN PLASTICKÝCH MAZIV

Pro lepší poznání tokových vlastností plastických maziv v mazacích systémech lze použít jak prostředků a metod teoretického, tak experimentálního reologického výzkumu [58]. V rámci toho lze modelovat tok plastického maziva pomocí reologických modelů.



Obr. 8 Závislost smykového napětí τ na rychlosti smykové deformace $\dot{\gamma}$ při teplotě 25°C u plastického maziva

Naměřená data pro sestavení $\tau(\dot{\gamma})$ plastického maziva byla získána od firmy KORAMO.

Následně byla tato data vložena do programu, pomocí kterého se vyhodnocují reologické vlastnosti zkoumaného maziva. Z grafu na obr. 8 je dobře pozorovatelná tixotropie maziva (počátek měření odpovídá průběhu MOGUL1, konec měření průběhu MOGUL13, doba trvání měření 2040 s).

Naměřeným výsledkům a výpočtům se nejlépe přibližoval reologický model Herschel-Bulkleyův [58], vyjadřující závislost smykového napětí τ v mazivu na jeho smykové rychlosti $\dot{\gamma}$:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \text{ [Pa]}, \quad (5)$$

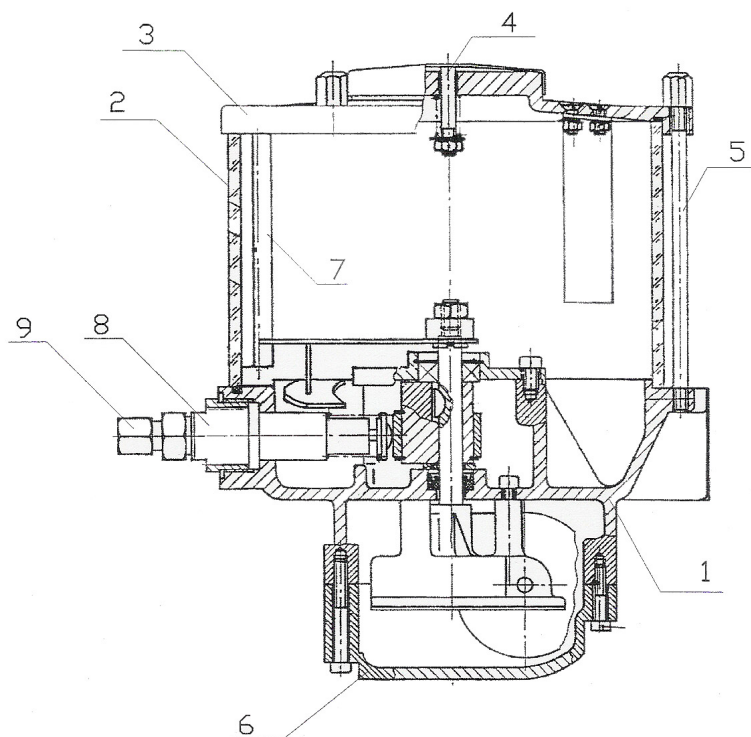
kde τ_0 – počáteční smykové napětí [Pa], $\dot{\gamma}$ - rychlost smykové deformace [s^{-1}],

K – součinitel konzistence [$\text{Pa} \cdot \text{s}^n$], n – index toku.

4.3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ MAZACÍHO PŘÍSTROJE ACF 02

Mazací přístroj ACF 02 pracuje na principu pístového čerpadla. Při zapnutí elektromotoru je přes vnitřní šnekový převod poháněna vačka, která posouvá písty pracovních čerpacích jednotek v přímočarém vratném pohybu. Při vysouvání pístu z pracovní čerpací jednotky (viz obr. 9) směrem dovnitř tělesa čerpadla vzniká v pracovním válci jednotky podtlak. Při úplném vysunutí pístu dojde k otevření sacího kanálu a následně k vlastnímu sání. Zasouváním pístu zpět k výtlačku je mazivo vytlačováno přes jednosměrný ventil do vývodu mazacího přístroje. Současně s otáčením centrálního hřídele a vačky se pohybuje stírací nůž, který odděluje plastické mazivo od

stěny nádrže a posouvá je do prostoru sání. Pohyb stíracího nože umožňuje vizuální kontrolu chodu mazacího přístroje.

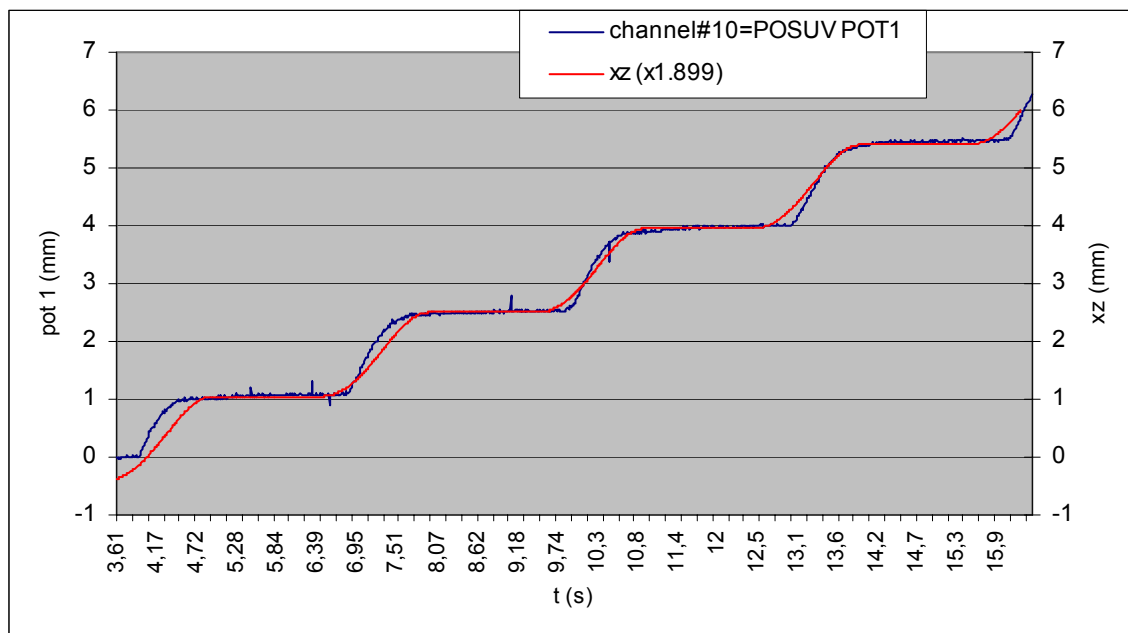


Obr. 9 Náčrt mazacího přístroje

ACF 02

- 1- těleso čerpadla
- 2- zásobník maziva
- 3- víko nádrže
- 4- odvzdušnění
- 5- svorník
- 6- víko elektromotoru
- 7- stírač maziva
- 8- pracovní jednotka
- 9- vývodní šroubení

Po odladění matematického modelu jsme dosáhli téměř shodných průběhů dodávaného množství maziva vidíme na obr. 10.



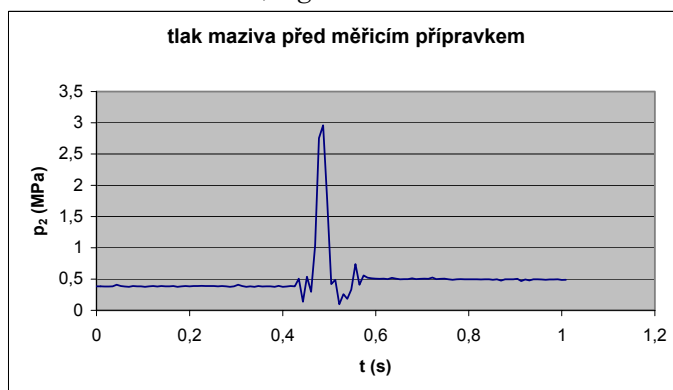
Obr. 10 Výsledek měření (18715) a výpočtu posuvu (s korekcí průtoku) měřícího přípravku s mazivem MOGUL EKO-L1

4.4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ MAZACÍHO PŘÍSTROJE ANC 20 P2

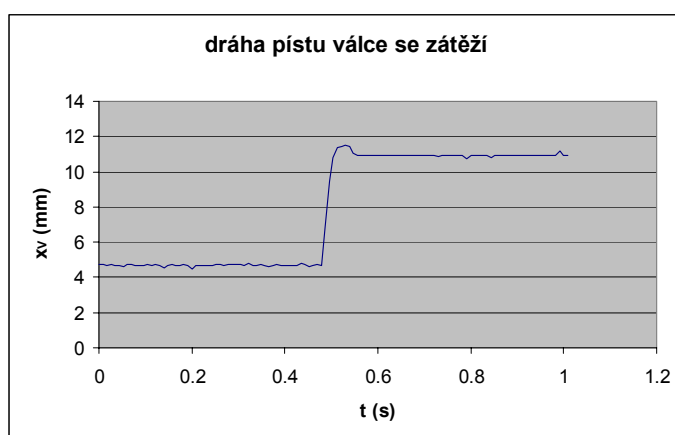
Další možností, jak dopravovat mazivo do mazaného místa, je možnost použití pneumatického čerpadla. Výhodou je hlavně důvod ekonomický vzhledem k jednoduchosti provedení mazacího přístroje. Představitelem čerpadla je zde mazací přístroj ANC 20P2.



Obr. 11 Grafické výsledky měření tlaku maziva p_1 za mazacím přístrojem při zátěži $m = 4,4\text{kg}$ na měřicím válci



Obr. 12 Grafické výsledky měření tlaku maziva p_2 před měřicím válcem při zátěži $m = 4,4\text{kg}$

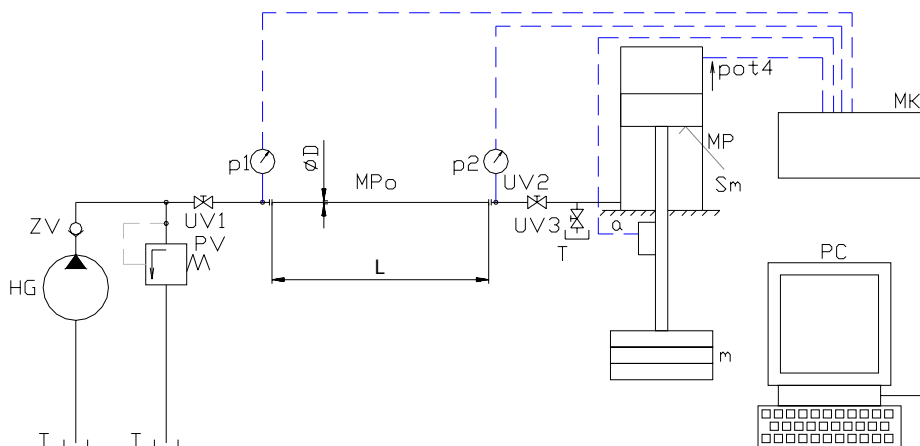


Obr. 13 Grafické výsledky měření posuvu pístu měrného válce při zátěži $m = 4,4\text{ kg}$

4.5 MĚŘENÍ TLAKOVÝCH ZTRÁT V POTRUBÍ

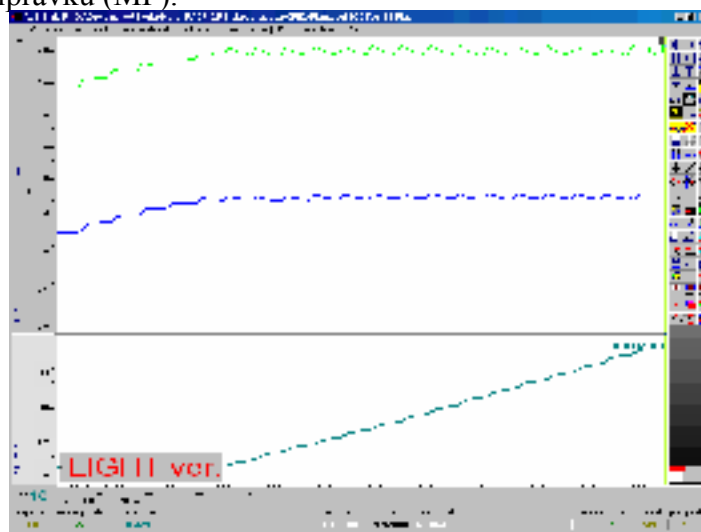
V laboratoři proběhlo měření tlakových ztrát (viz obr. 14) u potrubí různých průměrů, délek a materiálů.

Měření se provedlo z důvodu poznávání chování maziva, resp. prvků systému při různých tlacích, průtocích, teplotách a druzích maziva a data z něj byla ukládána do počítače pro další analýzu naměřených hodnot. Dalším srovnáváním naměřených údajů a simulací se vyvíjel program pro simulaci toku plastického maziva v potrubí mazacího systému až do současného funkčního stadia.



Obr. 14 Obvod pro měření tlakových ztrát v potrubí

Na obr. 15 lze vidět naměřené průběhy tlaků p_1 a p_2 v souladu se schématem na obr. 14. Třetím nejnižším položeným průběhem v poli grafického okna měřicího programu ScopeWin, je poloha pístní tyče měřicího přípravku (MP).



Obr. 15 Grafické okno s výsledky měření A11335 pomocí programu ScopeWin (tlak p_1 – zelená, tlak p_2 – modrá, posuv pístu měřicího přípravku $pot1$ – tmavě zelená)

4.5.1 Měření tlakových ztrát v praxi

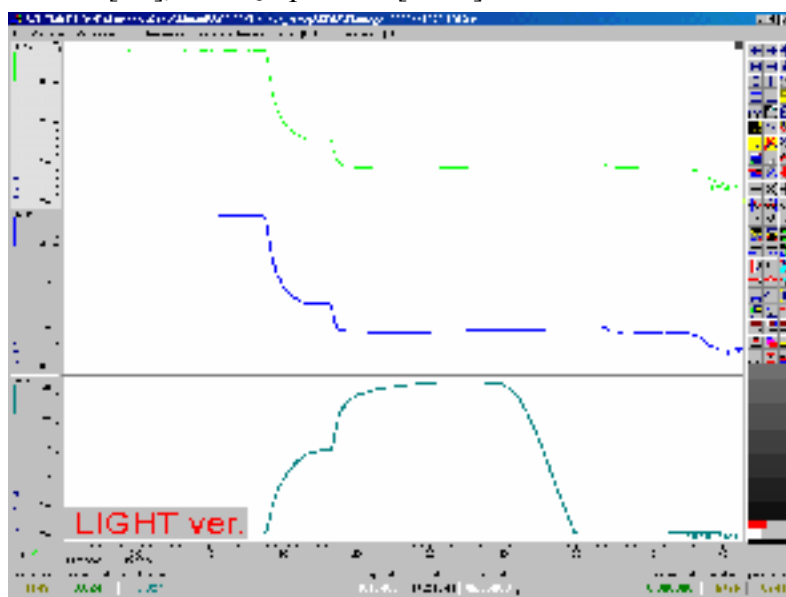
Měření bylo prováděno na dvou centrálních mazacích progresivních systémech, sloužících pro mazání kulových ložisek spodních vrat levé plavební komory vodního díla Gabčíkovo. Každý mazací systém byl složen z mazacího přístroje Autolub-M, progresivního rozdělovače ZP-B, prvků vedení maziva a automatiky pro ovládání systému (prvky firmy ŠPONDRA CMS). Nutno podotknout, že měření probíhalo za plného provozu plavební komory současně s montáží systému ve vymezeném čase. K bližšímu znázornění provedené akce jsou k dispozici fotografie, viz obr. 16.

Stanovený sružený objemový modul pružnosti E_s umožnil zahrnout vliv stlačitelnosti maziva a jeho vedení v matematickém modelu. Při činnosti progresivního rozdělovače maziva dochází k vytlačování maziva k mazaným místům, vlivem stlačitelnosti maziva a rozpínatelnosti vedení se část tlakové energie vynaloží na jeho deformaci, čímž dojde k tlakové ztrátě, kterou lze vyjádřit obecně vztahem

$$\Delta p = \frac{1}{C} \cdot \int_0^T Q \cdot dt, \quad (6)$$

kde $C = \frac{V}{E}$,

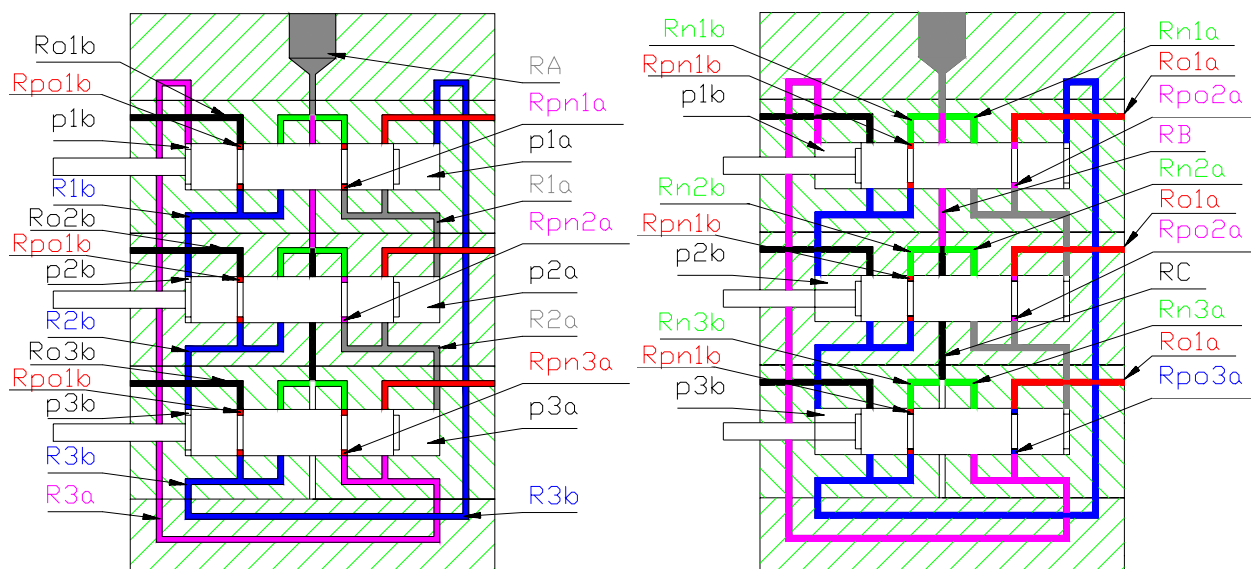
C - kapacita [m^3Pa^{-1}], E - objemový modul pružnosti [Pa],
 V - objem maziva [m^3], Q - průtok [m^3s^{-1}].



Obr. 18 Grafické okno s výsledky měření a1873-1813 v programu ScopeWin (tlak p_1 – zelená, tlak p_2 – modrá, posuv pístu měřicího přípravku pot_1 – tmavě zelená)

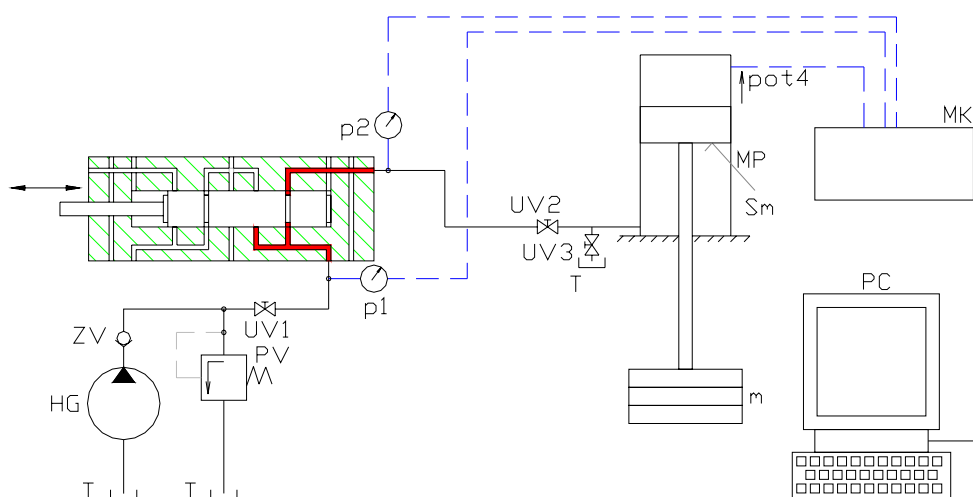
4.6.3 Měření charakteristik progresivního rozdělovače maziva v laboratorním systému centrálního mazání

Na obr. 20 jsou schématicky označena měřená místa veličin tlaku a sledovaná místa odporů proti pohybu a odpory místní. Z tohoto obrázku dále vzniklo náhradní schéma progresivního rozdělovače maziva, podle něhož byl sestavován matematický model (viz disertační práce).



Obr. 19 Barevné vyznačení odporů proti pohybu a místních a míst, kde se měřil tlak v progresivním rozdělovači maziva

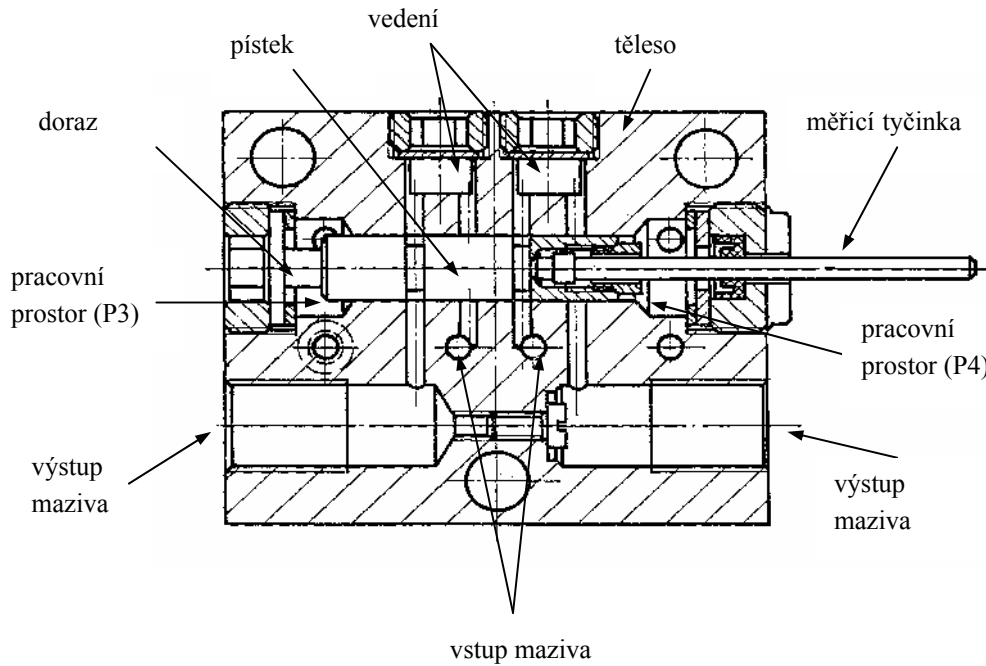
4.6.4 Měření proměnného odporu proti pohybu při toku plastického maziva rozdělovačem – porovnání s výsledky programu Fluent



Obr. 20 Schéma měření proměnného odporu proti pohybu

HG	– hydrogenerátor	MK	– měřicí karta
PV	– pojišťovací ventil	pot	– potenciometr
UV	– uzavírací ventil	p	– tlakový snímač
ZV	– zpětný ventil	m	– závaží
MP	– měřicí přípravek	PC	– osobní počítač

Z důvodů nestejných délek vedení od progresivního rozdělovače k mazaným uzlům a pro různé odpor v daných mazacích místech jsou jednotlivé výstupy progresivního rozdělovače zatíženy odlišným tlakem. Z konstrukce progresivního rozdělovače maziva vyplývá, že tento tlak působí zpětně na pístky (pokud nejsou ve vývodech zpětné ventily), které jsou takto vyvolanou silou tlačeny zpět k výchozí poloze.



Obr. 21 Řez sestavenou sekci progresivního rozdělovače maziva a pístku s měřicí tyčinkou, sloužící k měření posuvu

4.6.5 Třecí síly pístků progresivního rozdělovače maziva

a) Třecí síla měřená pomocí tlakové diference protilehlých pracovních prostor pístků progresivního rozdělovače maziva

Rozmístění tlakových snímačů na progresivním rozdělovači maziva ukazuje částečně obr. 6. Z konstrukce progresivního rozdělovače maziva vyplývá, že tlak před pístkem vyvozuje sílu, která posouvá pístkem a ten dále vytlačuje plastické mazivo do mazaného uzlu.

Za předpokladu $p_{ib} \geq p_{ia}$ $v = konst.$

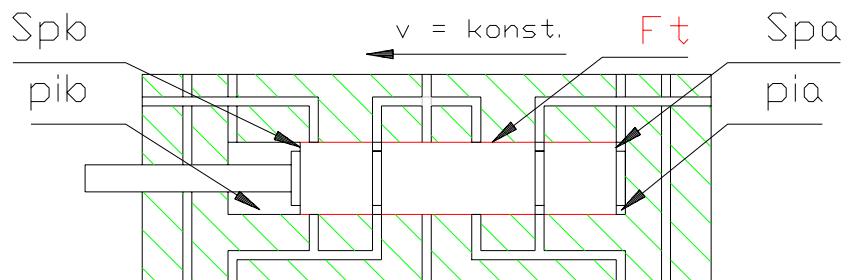
kde: p_{ia} , p_{ib} – tlak v pracovním prostoru pístku progresivního rozdělovače
platí rovnováha sil:

$$F_x = 0: \quad p_{ib} \cdot S_p - F_T - p_{ia} \cdot S_p - F_{Tt} = 0, \\ F_T = p_{ib} \cdot S_p - p_{ia} \cdot S_p - F_{Tt}, \quad (7)$$

kde: F_{Tt} – třecí síla mezi měřicí tyčinkou a těsněním,

F_T – třecí síla mezi pístkem a tělesem progresivního rozdělovače,

S_p – plocha pístku progresivního rozdělovače.



Obr. 22 Sekce s vyznačením třecí síly, průřezů pístků a tlaků

b) Třecí síla zjišťovaná pomocí gravitace

Stanovení třecí síly probíhalo za pomoci závaží pověšeného na pístek. Takto se stanovila velikost třecí síly při rozběhu a třecí síla za rovnoměrného pohybu pístku.

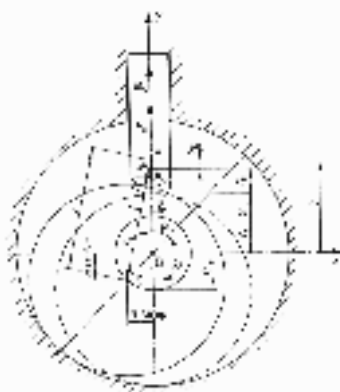
5 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MAZACÍHO SYSTÉMU

V současné době se návrhy mazacích systémů provádějí především na základě empirických zkušeností. Nahodile se vyskytují pomůcky, většinou firemního původu, k určení tlakových ztrát vybraných prvků mazacích systémů.

V souvislosti s rozvojem potenciálu výpočetní techniky se objevují nové možnosti využití nového přístupu k řešení inženýrských problémů. Jakoukoliv změnu v konstrukci prvku je v současnosti možné zpracovat již v koncepční fázi do matematického modelu a počítačovou simulací proměnlivých okrajových podmínek, sledovat, vyhodnocovat chování modelovaného systému, hledat kritická místa a optimální řešení.

5.1 MATEMATICKÝ MODEL MAZACÍHO PŘÍSTROJE ACF 02

Matematický model mazacího přístroje je složen z několika algebraických, derivačních a integračních bloků, viz literatura [34]. Celý matematický model i s jeho podrobným popisem je uveden v disertační práci.



Obr. 23 Kinematické schéma jednopístového mazacího přístroje ACF 02

5.2 MATEMATICKÝ MODEL MAZACÍHO PŘÍSTROJE ANC 02P2

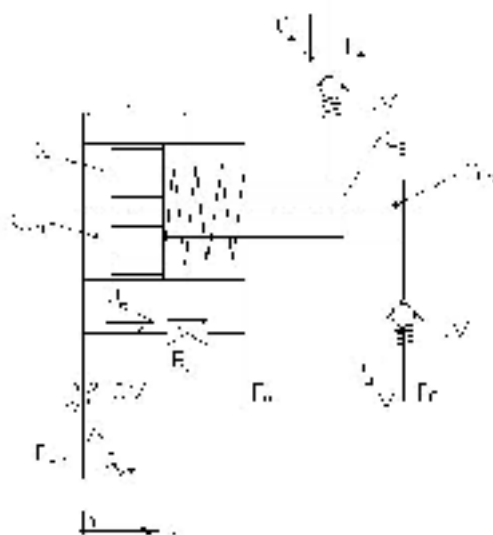
Náhradní schéma mazacího přístroje ANC 20 P2 je na obr. 25. Kompletní matematický model i s jeho podrobným popisem je odvozen v disertační práci.

Přehled označení v obr. 25:

ŠV- škrťací ventil	Q - průtok
JV- jednosměrný ventil	p- tlak
S- plocha pístu	h- zdvih pístu

indexy:

vz - přívod vzduchu	Z - přívod maziva
od - odvod vzduchu	G- odvod maziva
vzp – pracovní prostor přístroje vzduchový	
Gp – pracovní prostor přístroje maziva	



Obr. 24 Náhradní schéma mazacího přístroje ANC 20 P2

5.3 MODELOVÁNÍ TOKU PLASTICKÉHO MAZIVA

Model vychází z popisu toku plastického maziva pomocí výše zmíněného reologického Herschel-Bulkleyova modelu /vztah (5) pro $\tau_0 = 200$ Pa, $K = 185$ Pa.sⁿ, $n = 0,33/$.

Vypočítané hodnoty tlaků byly srovnávány pro různé průtoky a statické zatížení (statické tlaky) vyvolané závažími na měřicím přípravku.

Potom maximální smykové napětí na stěně potrubí:

$$\tau_{\max} = \frac{\Delta p \cdot R}{2 \cdot l} \text{ [Pa]}, \quad \eta_{ekv} = \frac{\tau_{\max}}{d_{ekv}} \text{ [Pa.s]}, \quad \dot{\gamma} \approx d_{ekv} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3} \text{ [s}^{-1}\text{]}, \quad (8)$$

kde Δp – tlaková ztráta na délce potrubí l [Pa],

R – poloměr potrubí [m], l – délka potrubí [m],

Q – průtok [m³.s⁻¹], η_{ekv} – dynamická viskozita [Pa.s].

5.4 KINEMATICKO – DYNAMICKÝ MODEL EXPERIMENTÁLNÍHO MAZACÍHO SYSTÉMU S PROGRESIVNÍM ROZDĚLOVAČEM MAZIVA

Cílem při sestavování matematického modelu v této práci bylo zahrnout další vlivy, které nebyly uvažovány v již existujících matematických modelech progresivního rozdělovače, viz lit. [77], [78], [79], [83]. Již dříve byly realizovány tři simulační modely progresivního rozdělovače:

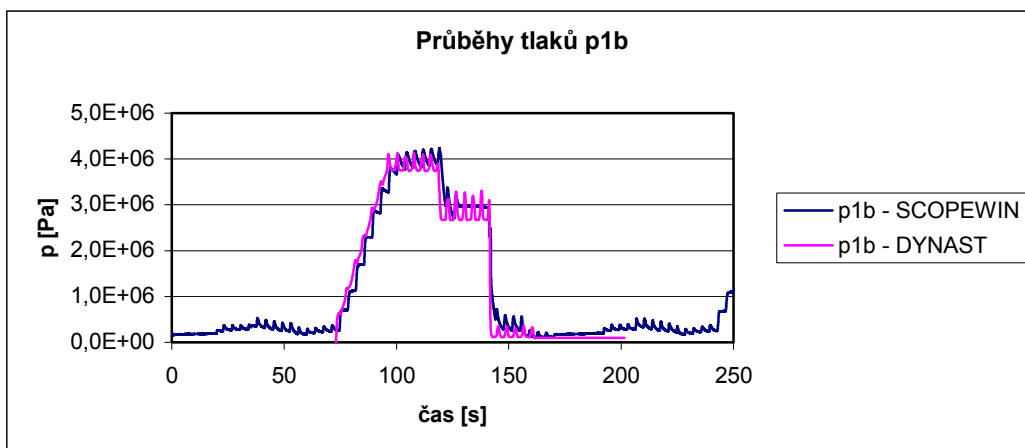
- **Kinematický model progresivního rozdělovače** je sestaven na základě využití zákona o zachování hmoty – využití rovnice kontinuity a za předpokladu nestlačitelnosti maziva a nedeformovatelnosti okolního systému.
- **Dynamický model progresivního rozdělovače** je vytvořen na základě popisu dynamickými rovnicemi viz lit. [78], [79]. Výsledkem řešení těchto rovnic jsou časové průběhy zrychlení jednotlivých pístků progresivního rozdělovače.
- **Kinematicko – dynamický model progresivního rozdělovače.** Jedná se o kombinaci výše uvedených modelů progresivního rozdělovače.

Všechny modely jsou také uvedeny v lit. [83].

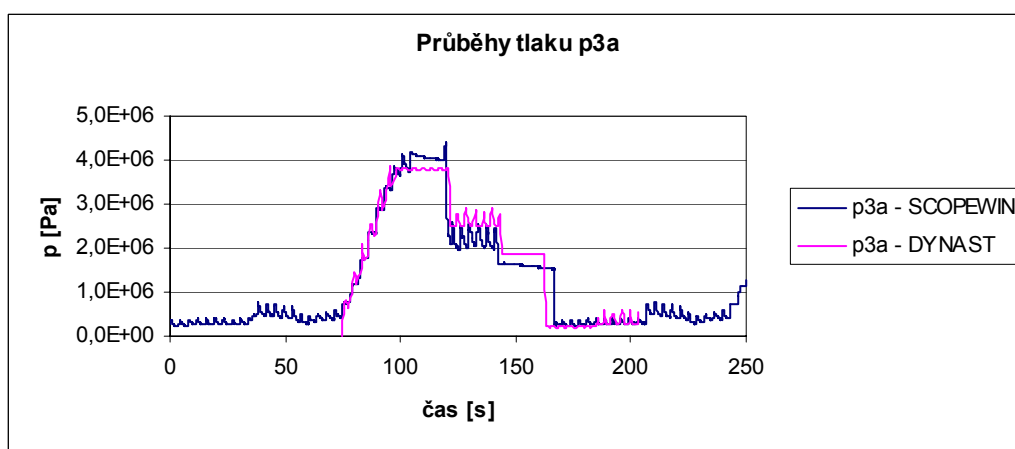
Kinematicko – dynamický model progresivního rozdělovače zahrnuje jak kinematiku tak dynamické děje, avšak v tomto modelu nebyly zahrnuty další vlivy (např. stlačitelnost maziva), které mají na činnost progresivního rozdělovače vliv.

Cílem pro zdokonalení posledního matematického modelu je zahrnutí některých dalších vlivů:

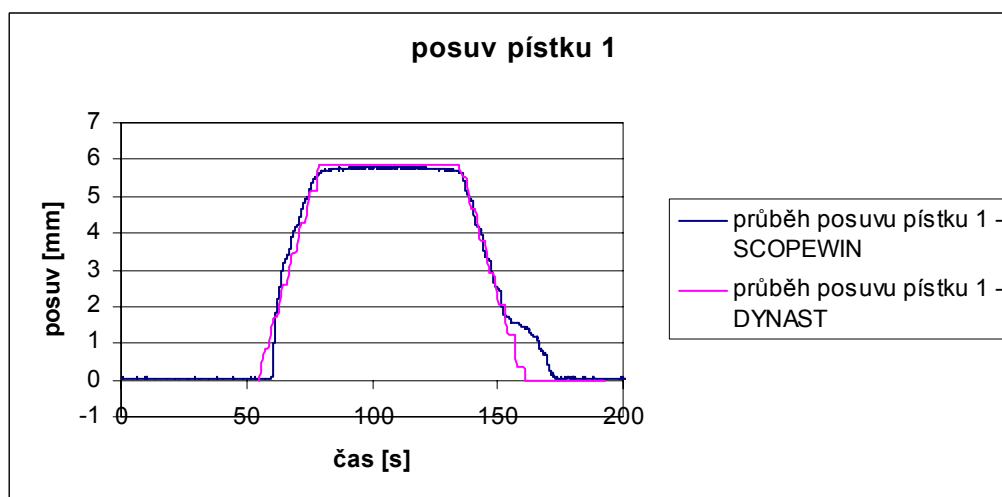
- stlačitelnosti maziva (pro zahrnutí tohoto vlivu do matematického modelu bylo nutno stanovit objemový modul pružnosti maziva a sružený objemový modul pružnosti, viz kapitola 4.6)
- vliv nedojetí pístků do krajní polohy, čímž vzniká při průchodu maziva tlaková ztráta (stanovením této ztráty se zabývá kapitola 4.6.4)



Graf 1. Průběhy tlaků p1b (v pracovním prostoru pístku) pro měření 11424



Graf 2. Průběhy tlaků p3a (v pracovním prostoru pístku) pro měření 11424



Graf 3. Průběh posuvu pístku 1 pro měření 11424

6 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ

Účelem této kapitoly není vysvětlit a popsat kompletní zpracování naměřených výsledků pomocí matematické statistiky, ale umožnit odborníkům zájímajících se o tuto oblast, jakož i diplomantům a doktorandům pokračujícím v této práci, snazší přístup při statistickém zpracování

experimentálních dat, uložených v tabulkách v této disertaci. Tato experimentální data jsou uvedena jednak v textu, jednak v přílohách disertační práce tak, aby byla pohotově k dispozici.

6.1 VYHODNOCENÍ NEJISTOT Z EXPERIMENTÁLNĚ NAMĚŘENÝCH DAT V TRIBOLOGICKÉ LABORATOŘI

Při zkoumání reálných dějů dospějeme k závěru, že pozorované veličiny mají v podstatě náhodný charakter, spočívající v tom, že jejich měřené hodnoty v závislosti na zvolené hladině přesnosti více či méně kolísají při opakovaných měřeních, i když podmínky průběhu těchto dějů i pozorování zůstávají v podstatě neměnné viz [38], [52], [54], [61].

Abychom mohli učinit potřebné závěry o zkoumaných dějích, musíme znát odpovídající typ rozdělení pravděpodobnosti, který buď vyplývá z jejich teoretického (např. fyzikálního) popisu anebo jej odhadujeme ze zjištěných hodnot sledované veličiny.

Jako vzorek pro zpracování použijeme experimentální data z měření v tribologické laboratoři, a to tabulku 29 v příloze disertační práce, která udává výsledky měření přídatných třecích sil mezi těsněním a měřicí tyčinkou progresivního rozdělovače, zjišťované pomocí gravitace.

Kombinovaná standardní nejistota je:

$$u_x = \sqrt{u_{xA}^2 + u_{xB}^2} = \sqrt{0,59^2 + 0,318^2} = 0,67N. \quad (9)$$

Chceme-li zvětšit pravděpodobnost tak, aby výsledek opakovaného měření ležel např. v intervalu 95% pravděpodobnosti, pak původní interval určený distribuční funkcí, se musí zvětšit o hodnotu $k_r = 2$.

Pak platí, že interval spolehlivosti je dán:

$$U = \bar{x}_s \pm k_r u_x = 6,19 \pm 2 \cdot 0,67 = (6,19 \pm 1,34)N. \quad (10)$$

kde k_r je koeficient rozšíření.

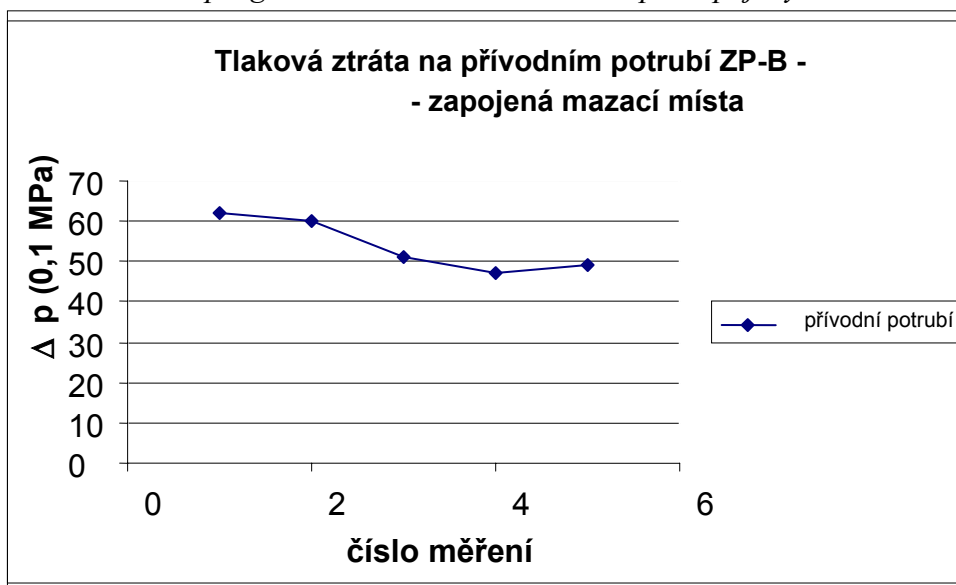
6.2 VYHODNOCENÍ NEJISTOT Z REÁLNÉHO MĚŘENÍ DAT V PRAXI

Ukázku jednoduchého postupu použitého statistického zpracování experimentálních dat naměřených v průmyslové praxi, a to konkrétní aplikaci při oživování mazacího obvodu dolních vrat plavební komory vodního díla Gabčíkovo – viz kap. 4.5.1. Tento obvod je, stejně jako obvod zkoumaný v tribologické laboratoři VUT, vybaven progresivním rozdělovačem.

Pro měření tlakových ztrát se používalo jednoduchého a rychlého způsobu a to připojení manometrů k progresivnímu centrálnímu mazacímu obvodu dolních vrat plavební komory vodního díla Gabčíkovo.



Graf. 4 Tlaková ztráta na progresivním rozdělovači maziva při zapojených mazacích místech



Graf. 5 Tlaková ztráta na přívodním potrubí mezi kostkou a progresivním rozdělovačem maziva při zapojených mazacích místech

Kombinovaná standardní nejistota je:

$$u_x = \sqrt{u_{xA}^2 + u_{xB}^2} = \sqrt{0,30^2 + 0,33^2} = 0,45 \text{ MPa} . \quad (11)$$

Chceme-li zvětšit pravděpodobnost tak, aby výsledek opakovaného měření ležel např. v intervalu 95% pravděpodobnosti, pak původní interval určený distribuční funkcí, se musí zvětšit o hodnotu $k_r = 2$.

Pak platí, že interval spolehlivosti je dán:

$$U = \bar{x}_s \pm k_r u_x = 10,46 \pm 2 \cdot 0,45 = 10,46 \pm 0,9 \text{ MPa} . \quad (12)$$

7 PŘÍNOS DISERTACE PRO PROJEKČNÍ A KONSTRUKČNÍ PRAXI

Úvodem disertační práce bylo představeno základní rozdělení centrálních mazacích obvodů, což mělo nastínit rozličnost a rozsáhlost zapojování hydraulických obvodů centrálního mazání a na tuto fyzikální podstatu věci dále navazující matematický aparát používaný při výpočtech proudění a toku maziv v hydraulickém vedení. V této souvislosti byla zmapována aplikovatelnost daných matematických vztahů a modelů (pro newtonské a nenevtonské kapaliny) dle velikosti průtoku maziva hydraulickým vedením při předpokládaných možných nepřesnostech výpočtů.

Jedním z měřených a simulovaných zdrojů maziva byl mazací přístroj ACF 02. Jako velice příznivý výsledek při těchto činnostech lze považovat fakt, že při měření tohoto mazacího přístroje byla prováděna jeho jistá regulace. Šlo o regulaci průtoku maziva při proměřování jeho charakteristik, ale i při měření dalších prvků. Tato regulace průtoku byla zajišťována pomocí napájecího zdroje regulací otáček elektromotoru mazacího přístroje. Při nasazení v praxi se centrální mazací obvody ovládají způsobem řazení režimů, resp. intervalů doby mazání a doby pauzy. Na zvážení projektantů je, zda nepoužít takového řízení mazání pomocí změny otáček mazacího přístroje, kde by nedocházelo k zvýšenému mechanickému namáhání přístroje vlivem jeho častého vypínání a zapínání a bylo by dosaženo poněkud jemnějšího rozdělení maziva v čase do mazaných míst. Lze také konstatovat, že při snížení otáček motoru se sníží rychlost maziva ve vedení a dojde ke snížení ztrát (hydraulické ztráty – odpor proti pohybu, odpor proti zrychlení; odpor na stírači maziva - viz obr. 9; mechanické ztráty v převodovce mazacího přístroje; při jiné otáčkové charakteristice elektromotoru mazacího přístroje dojde ke snížení příkonu) a zároveň k velmi výraznému poklesu množství přiváděné energie. Mimo jiné to dokládá i konzultace s odborníky na stejnosměrné elektromotory – doc. Singule, VUT Brno: „Režim opakovaného spouštění a doběhu motoru čerpadla je krajně nevýhodný z hlediska činných ztrát v motoru, jeho ustáleného oteplení a má bezpochyby vliv na jeho životnost. Regulace otáček tento problém zcela eliminuje a podle mého názoru bude energetická účinnost celé mazací soupravy výrazně vyšší.“

Původní kinematický model progresivního rozdělovače maziva, který je jádrem matematického modelu, byl upraven a doplněn tedy o průměrnou třecí sílu. Do modelu byly dále začleněny bloky pro výpočet tlakových ztrát v kanálcích progresivního rozdělovače maziva včetně jednotlivých úseků potrubí centrálního mazacího systému, odpor proměnného odporu proti pohybu (místní odpor na proměnném průřezu kanálku, viz kap. 4.6.4) a odpor proti deformaci. Souhrnem tedy se **kinematicko-dynamický model progresivního rozdělovače maziva** stal základem pro simulaci kompletního centrálního mazacího stendu v Odboru fluidního inženýrství V. Kaplana. Na něm byla získána řada údajů důležitých pro výrobu a další konstrukční vývoj progresivních rozdělovačů. Např. samotná konstrukce progresivního rozdělovače nedovoluje zapojení příliš odlišného tlakového zatížení na jednotlivých výstupech, což může v praxi nastat např. v důsledku různých opotřebení mazaných míst. Možným řešením by mohlo být přímé zabudování zpětných ventilů do konstrukce progresivního rozdělovače maziva.

Měření na progresivním CMS v praxi na vodním díle Gabčíkovo (kap. 4.5.1) a ukázka statistického vyhodnocení (kap. 6) má za cíl stanovit normální (obvyklé) pracovní parametry mazacího obvodu a naznačit využití měřených veličin. Dříve se při nasazení automatiky dbalo na

to, aby mazací obvod pracoval během záběhu mazaného zařízení podle předem vypočtených časových hodnot (doba mazání, doba přestávky, doba kontroly) a po této době se daly nastavené hodnoty libovolně změnit. Dnes, při použití PLC - programovatelných automatických řídicích, ovládacích a kontrolních systémů, jsou daleko větší možnosti, kterých se dá s výhodou využít při vyhodnocování poruch v mazacím obvodu (prasklá hadice, ucpané mazací místo, deformované potrubí, atd.) i s možností jejich dálkového hlášení. Proto naměřené tabulky hodnot s velkou přesností v disertační práci mohou být v tomto směru výborným podkladem pro projekční praxi při navrhování CMS.

8 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ DALŠÍHO POSTUPU

Začátek disertační práce byl uveden přehledem známých používaných centrálních mazacích systémů využívající tekutá až tuhá plastická maziva do třídy 2 dle NLGI.

Poté byla věnována část práce vlastnostem maziv, která jsou používána v mazacích systémech, bylo naznačeno složité chování plastických maziv při různých provozních podmínkách, jakož i matematická simulace a chování těchto maziv v průběhu jejich toku potrubím.

Po úvodu následovala kapitola analyzující stručný stav v dané oblasti, jakož i autorovu kritiku skutečnosti, že se v odborné a vědecké literatuře téměř nevyskytují komplexní řešení aktuálních problémů u mazacích systémů.

V druhé polovině disertační práce byly zmíněny úkoly vypracované autorem, ať už z oblasti teoretické nebo experimentální, jako je matematické modelování pomocí programu Dynast, použití metody konečných objemů – programu Fluent ve spolupráci s VŠB Ostrava a z experimentální činnosti. Zejména z experimentální oblasti práce za současného porovnání s matematickou simulací bylo autorem vydáno již několik článků, které byly vytištěny v odborném časopisech, při doktorandských setkáních nebo byly předneseny na konferencích.

Nejdůležitější kapitolou pro sledovaný obor je kap. 7 disertační práce, která shrnuje poznatky podstatné pro další konstrukční a projektovou činnost, zabývající se centrálními mazacími systémy.

Nebylo možno uvést všechny aspekty těchto hydraulických obvodů, které vyvstaly během mé činnosti na tomto projektu a další, které se mi naskytly při mé praxi přímo v oboru centrálních mazacích systémů. Za další důležité impulsy pokládám nejen technické podněty, ale taktéž dnes důležité technicko-obchodní aspekty. Z těch nejdůležitějších technických problémů, udávajících další postup činnosti, by se daly vyjmenovat dva: jednak přesnější experimentální měření odporu proti pohybu (např. z tohoto odporu u přímého potrubí určovat přímo výpočtové parametry plastických maziv, jež by odpovídaly přímo danému potrubí, drsnosti, teplotě, atd.) a dále ověření vhodnosti regulace otáček mazacího přístroje ACF 02 pro lepší řízení distribuce dodávaného množství maziva do mazaných míst.

Tyto a další problémy jsou vhodnými náměty pro následné pokračování výzkumu proudových a tlakových poměrů v progresivním rozdělovači maziva a na jiných rozdělovačích v budoucnu.

9 VYBRANÉ POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] B.N.J. Person: Sliding Friction, Physical principles and applications, second edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998, 2000, ISBN 3-540-67192-7.

- [2] Brdička, M., Samek, L., Sopko, B.: Mechanika kontinua, vydala Academia, nakladatelství AV ČR, Praha, vydání 2., opravené, 2000, ISBN 80-200-0772-5.
- [3] Brož, V.: Aerodynamika vysokých rychlostí, vydavatelství ČVUT, Praha, 2001, 290 s., vydání 4., ISBN 80-01-02348-6.
- [4] Czarny, R.: Einfluss der Grenzschichtausbildung von Schmierfetten auf die Durchflusswiderstände, Schmierungstechnik, Berlin 20, 1989, Nr.12, Seite 371 – 373.
- [5] Czarny, R.: Temperaturabhängigkeit einiger rheologischer Parameter von Schmierfetten, Schmierungstechnik, Berlin 21, 1990, Nr.1, Seite 10 – 13
- [6] Czarny, R.: Einfluss der Thixotropie auf die rheologischen Eigenschaften der Schmierfette, Tribologie + Schmierungstechnik, 36. Jahrgang, Nr. 3, 1989, Seite 134 – 140.
- [7] Czarny, Ryszard: Badania zjawisk związanych z przepływem smarów plastycznych w układach smarowniczych, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1992, ISSN 0324-962X.
- [8] Czarny, Ryszard: Smary plastyczne, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 00-048 Warszawa, ul. Mazowiecka 2/4, Warszawa 2004, ISBN 83-204-3020-8.
- [9] Czarny, Ryszard: Smarowanie ukłádów jezdnych maszyn roboczych i pojazdów, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998, ISSN 1425-0993.
- [10] Dowson, D., „History of Tribology“, Longman Group Limited, London, 1979.
- [11] Drs, L.: Plochy ve výpočetní technice, vydalo SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., Praha 1 v roce 1984.
- [12] Firemní materiály firmy ŠPONDRA CMS, spol. s r. o, 2004.
- [13] Frojštetter, H. D., Triliskij, K. K., Išuk, Ju. L., Stupak, P. M.: Reologičeskije i teplofizičeskije svojstva plastičnych smazok. Moskva Izdatelstvo „Chimija“ 1980.
- [14] Göttner, G., H.: Die Bestimmung des Förderverhaltens von Schmierfetten, Schmiertechnik, 11. Jahrg., Mai/Juni, Nr. 3, 1964, Seite 143 – 148.
- [15] Göttner, G., H.: Zur Bestimmung des Förderverhaltens von Schmierfetten in langen Rohrleitungen, Erdöl und Kohle – Erdgas – Petrochemie vereinigt mit Brennstoff-Chemie, 24. Jahrgang, Nr. 4, April 1971, Seite 226 – 230.
- [16] Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor: Engineering tribology, second edition, 2001 by Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-7304-4.
- [17] Habán, V., Karč, P., Nevrlý, J.: Technická zpráva, Prokládání bodů v 3D prostoru Beziérovou plochou, VUT-EU-QR-47-02, VUT – FSI Brno, 2002.
- [18] Hynek, M.: Tekutinové mechanizmy, část A,B, Hydraulické a pneumatické mechanizmy, Vysoká škola technická v Košiciach, Bratislava, 1990, ISBN 80-05-00194-0.
- [19] Jacobson, B., O., Tribology series, 19, Rheology and elastohydrodynamic lubrication, S. K. F. Engineering and research centre B. V., Nieuwegein, The Netherlands, 1991, ISBN 0-444-88146-8.
- [20] Janalík, J.: Potrubní hydraulická a pneumatická doprava, 1. přepracované vydání, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 1991, ISBN 80-7078-595-0.

- [21] Kolektiv autorů: Tribotechnika 1990, Dům techniky ČSVTS Ústí nad Labem, 1990.
- [22] Neale, M., J.: Lubrication and reability handbook, ISBN 0-7506-5154-7, 2001.
- [23] Neale, M., J.: Tribology handbook, The Butterworth group, England, Australia, Canada, New Zealand, South Africa, first published in 1973, ISBN 0-408-00082-1.
- [24] Nepraž, F., Nevrlý, J., Peňáz, V., Třetina, K.: Modelování systémů s hydraulickými mechanismy, Bosch Rexroth, spol. s r. o., Brno 2002.
- [25] Nevrlý, J., Pavlok, B.: Metodika návrhu větvených mazacích obvodů s podporou moderních výpočetních systémů, výzkumný projekt GAČR 101/98/0946, VUT Brno, 2000.
- [26] Noskiewič, J., Dynamika tekutinových mechanismů, Ostrava, 1993.
- [27] Paciga, A., Ivantyšin, J.: Tekutinové mechanismy, Praha, 1985.
- [28] Palenčár, R., Vdoleček, F., Halaj, M.: Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot, časopis Automa, číslo 7 – 8, 2001, str. 50.
- [29] Peňáz, V., Benža, D.: Tekutinové mechanismy, VUT Brno, leden 1990, ISBN 80-214-0082-X.
- [30] Pochylý, F., Projekt konstitucionno uravněníja neodnorodnoj izotropnoj sredy, Strojnický časopis, 31, 1980, č. 5, s. 581 – 596.
- [31] Reiner, M., Rheology. Handbuch der Physik. Band VI. Elastizität und Plastizität. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1958.
- [32] Reiner, M., Theoretical rheology. Building materials. North-Holland Publishing Co. Amsterdam 1954.
- [33] Schramm Gebhard: Practical Approach to Rheology and Rheometry, Gebrueder Haake GmbH, D-76227 Karlsruhe, Dieselstrasse 4, Federal Republic of Germany, 1994.
- [34] Sisko, A., W.: The flow of lubricating greases, Industrial and engineering chemistry, vol. 50, No. 12, December 1958, page 1789 – 1792.
- [35] Sládek, Z., Vdoleček, F.: Technická měření, vydání první, Vysoké učení technické v Brně, srpen 1992, ISBN 80-214-0414-0.
- [36] Sobotka, Z.: Rheology of materials and engineering structures. Rheology series, 2. Prague 1984, ISBN 0-444-99621-4.
- [37] Šikulová, M., Karpíšek, Z.: Pravděpodobnost a matematická statistika, vydání páté, Fakulta strojní VUT v Brně, Technická 2, 1996, ISBN 80-214-0830-8.
- [38] Štřáva, P.: Mazací technika, Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava, Ostrava, 1997.
- [39] Štěpina, V., Veselý, V.: Maziva a speciální oleje, Základy tribotechniky, první vydání, Bratislava, 1980.
- [40] Štěpina, V., Veselý, V.: Maziva v tribologii, první vydání, Bratislava, 1985.
- [41] Štern, P.: Reometrická data a reogramy maziv, ARALUB BAB RC1, MOGUL EKO L1, PLANTOGEL 000S, PLANTOGEL 2S, ÚHD ČAV, Praha, 2003.
- [42] Turza, J.: Dynamika tekutinových systémov, Vysoká škola dopravy a spojov v Žilině, 1994, ISBN 80-7100-162-7.

- [43] Ulbrecht, J., Mitschka, P.: Chemické inženýrství neneutonských kapalin, Nakladatelství Československé akademie věd, Praha 1965.
- [44] Vdoleček, F., Halaj, M.: Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření, časopis Automa, číslo 10, 2001, str. 52.
- [45] Vinogradov, G., V., Froishteter, G., B., Trilisky, K., K.: The generalized theory of flow of plastic disperse systems with account of the wall effect, Rheol. Acta 17, 1978 Dr. Dietrich Steinkopf Verlag, Darmstadt, page 156-165, ISSN 0035-4511/ASTM-Coden RHEAAK.
- [46] Wein, O.: Úvod do reologie, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Brno 1996.
- [47] Wilkinson, W. L.: Neneutonskije židkosti, gydromechanika, peremešivaniye i teplobmen, Izdatelstvo Mir, Moskva, 1964.
- [48] Willi Vogel Aktiengesellschaft: Schmierungstechnik, Zentralschmieranlagen, 1998.
- [49] www stránky ČVUT Praha, příprava výuky Dostál, M., květen 2006, <http://www.fs.cvut.cz/cz/U218>.
- [50] www stránky firmy TechSoft Engineering Praha, červenec 2004. <http://www.techsoft-eng.cz/cfd/index.html>.
- [51] www stránky Západočeského superpočítačového centra Západočeské univerzity v Plzni, červenec 2004. <http://zsc.zcu.cz/>.
- [52] www stránky firmy ČEPRO a. s., http://www.ceproas.cz/verze_html/index.html, srpen 2003.

Vlastní publikace nebo spoluautorství:

- [53] Dvořák, A., Holý, O.: Tlaková ztráta na proměnném odporu proti pohybu v progresivním rozdělovači maziva – její měření a modelování pomocí programu Fluent, Proceedings, Interaction and feedbacks '2003, Institute of Thermomechanics AS ČR, X-th National seminar with international participation, November 25. – 26., Praha 2003, s. 19 – 26.
- [54] Dvořák, A., Holý, O.: Tlaková ztráta na proměnném odporu proti pohybu v progresivním rozdělovači maziva – její měření a modelování pomocí programu Fluent, Hydraulika a pneumatika, Časopis pre hydrauliku, pneumatiku a automatizačnú techniku, 2004, roč. VI, č. 1, s. 24 – 27.
- [55] Dvořák, A.: Matematický model progresivního rozdělovače maziva, FSI junior konference 2002, ISDN 80-214-2290-4, Brno, 2002.
- [56] Dvořák, A.: Mazací systémy, pohyb šoupátek progresivního rozdělovače maziva, Hydraulika a pneumatika, Časopis pre hydrauliku, pneumatiku a automatizačnú techniku, 2002, roč. IV, č. 2, s. 7 – 10.
- [57] Dvořák, A.: Mazací systémy, pohyb šoupátek progresivního rozdělovače maziva, VI. medzinárodná vedecká a odborná konferencia Riadenie tekutinových systémov, Rájecké Teplice, Slovensko 7. 11. – 9. 11. 2001, s. 30 – 35.
- [58] Dvořák, A.: Obecné vlastnosti maziv I., FSI VÚT Brno, Hydraulika a pneumatika, Časopis pre hydrauliku, pneumatiku a automatizačnú techniku, 2002, roč. IV, č. 3, s. 10 – 17.

- [59] Dvořák, A.: Obecné vlastnosti maziv II., FSI VÚT Brno, Hydraulika a pneumatika, Časopis pre hydrauliku, pneumatiku a automatizačnú techniku, 2002, roč. IV, č. 4, s. 26 – 28.
- [60] Dvořák, A.: Obecné vlastnosti maziv III., FSI VÚT Brno, Hydraulika a pneumatika, Časopis pre hydrauliku, pneumatiku a automatizačnú techniku, 2003, roč. V, č. 1, s. 17 – 19.
- [61] Dvořák, A.: Simulace pohybu pístků progresivního rozdělovače maziva mazacích systémů, Závěrečná zpráva ke grantovému projektu FRVŠ zřízeného pod zakázkou číslo IS330967 v činnosti 1071, Vysoké učení technické v Brně, FSI, EÚ, Odbor fluidního inženýrství Victora Kaplana, Brno, 15. prosinec 2003.
- [62] Dvořák, A.: Simulace tlakové ztráty toku plastického maziva vedením mazacích systémů – komparace měření a výpočtů, Hydraulika a pneumatika 2003, Medzinárodná vedecká konferencia, Častá – Píla, hotel HYDROSTAV, Slovensko, 5. – 6. jún 2003, s. 21 - 27.
- [63] Dvořák, A.: Tlakové ztráty při proudění plastického maziva vedením mazacích systémů, XXII. mezinárodní vědecká konference kateder a pracovišť mechaniky tekutin a termomechaniky, Doubice, České Švýcarsko, 4. – 6. června 2003, s. 117 – 122.
- [64] Dvořák, A.: Zkušební zařízení a měřicí technika, Laboratoř odboru hydraulických strojů Victora Kaplana, FSI VUT Brno, Hydraulika a pneumatika, Časopis pre hydrauliku, pneumatiku a automatizačnú techniku, 2002, roč. IV, č. 2, s. 40 – 41.
- [65] Nevrlý, J., Dvořák, A.: Ekologická plastická maziva, Sborník přednášek Tribotechnika v teorii a praxi, Česká tribotechnická společnost, sekce tribotechnika Eduka Praha, Hotel Orlík, Vystrkov u Orlické přehrady, 22. – 23. října 2002.
- [66] Špondr, P., Dvořák, A.: Centrální mazací systémy v těžebním průmyslu, Konference Tribotechnika v provozních podmínkách a její význam pro údržbu strojů a zařízení - sborník přednášek, Hotel Hrubá Skála, 12. – 13. října 2004, vydala Ostrava, říjen 2004, s. 53 – 57, ISBN 80-248-0640-1.
- [67] Špondr, P., Dvořák, A.: Mazání okolků kol systémem „RAILJET“ pro kolejová vozidla, Sborník 23. mezinárodní konference Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení DIAGO 2004, ISBN 80-248-0465-4, Ostrava, Beskydy, Hotel Bezruč, 3. – 5. února 2004, s. 327 – 330.
- [68] Špondr, P., Dvořák, A.: Mazání okolků kol systémem „RAILJET“ pro kolejová vozidla, Konference Tribotechnika a spolehlivost provozu - sborník referátů, ISBN 80-02-01636-X, Hotel Technik, Lázně Bohdaneč, 20. – 21. dubna 2004, s. 15 – 18.
- [69] Špondr, P., Dvořák, A.: Mazání olejovou mlhou, Sborník 24. mezinárodní konference Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení DIAGO 2005, Z1, ročník XIV, ISSN 1210-311X, Beskydy, Malenovice, Hotel Bezruč, 1. – 2. února 2005, s. 37, celý článek na CD str. 308 – 313.
- [70] Špondr, P., Dvořák, A.: Prvky a systémy mazací techniky, Tribotechnické informace 2-3/04, s. 30 – 32, ISSN 1212-0081.

10 ANNOTATION

The doctoral thesis describes the issue of proposal of branched central lubrication systems given by specific requirements for their operation for the relevant lubricated equipment. It is also devoted to the used lubricants, including their reological attributes, which are incorporated into the mathematical simulation of the researched central lubrication circuit. Through the use of background research, the doctoral thesis characterises and assesses the basic types of central lubrication systems – their advantages, disadvantages and application in practice.

Through this inter-branch approach it tries to comprehensively describe the problems connected with the design of the central lubrication systems. The whole doctoral thesis is elaborated on the basis of real measurements and knowledge from experience, onto which the greatest emphasis was placed. Some of the measurements were carried out on real central lubrication systems, but as a sample a central lubrication system with a progressive divider was taken for faster operation (Tribological laboratory, EU Victor Kaplan department of fluid engineering), on which its mathematical model of the lubrication system was measured and verified in the Dynast program

11 CURRICULUM VITAE AUTORA

Osobní údaje

Antonín Dvořák

Narozen: 13.03.1977 v Mostišti

Bydliště: Horní Libochová 5

Národnost: česká

Vzdělání

2000 – 2003 doktorské studium na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, obor „Konstrukční a procesní inženýrství“

1995 – 2000 studium na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, obor Stavebních, transportních a zemědělských strojů, studium ukončeno státní zkouškou

Pedagogická praxe

2000 – 2002 výuka studentů FSI VUT Brno, pracovní náplň: blok cvičení předmětu Hydromechanika

Praktikum

1999, jeden měsíc projektant u firmy Výtahy s.r.o. ve Velkém Meziříčí

2000, tři měsíce zkušební technik ve firmě První Brněnská strojírna a.s. ve Velké Bíteši, divize letecké techniky

2001, 6 týdnů studentská stáž na téma Zkoušky mazadel pro lisovnu firmy Škoda Auto a. s., Mladá Boleslav

Zaměstnání

2004 – dosud příprava obchodních nabídek a projektování centrálních mazacích systémů u firmy ŠPONDRA CMS, spol. s r. o.