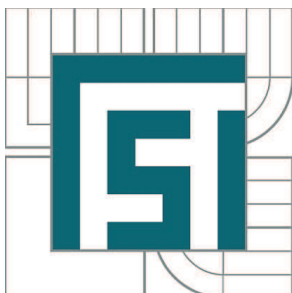


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

NÁVRH TESTOVACÍHO STANDU PRO STANOVENÍ PROVOZNÍCH PARAMETRŮ MAGNETICKÉHO HŘÍDELOVÉHO TĚSNĚNÍ

DESIGN OF TESTING BENCH FOR DETERMINATION OF THE OPERATING PARAMETERS OF
THE MAGNETIC SHAFT SEALING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAL KUBIK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAKUB ROUPEC, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Michal Kubik

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh testovacího standu pro stanovení provozních parametrů magnetického hřídelového těsnění

v anglickém jazyce:

Design of Testing Bench for Determination of the Operating Parameters of the Magnetic Shaft Sealing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je konstrukční návrh testovacího standu pro testování těsnosti magnetického těsnění s uvedenými proměnnými parametry: otáčky, vůle mezi magnetickým kroužkem a hřídelí, teplota náplně, úroveň vibrací, montážní poloha, vnitřní přetlak. Součástí návrhu standu bude návrh a realizace magnetického obvodu těsnění, jeho simulace pomocí MKP a experimentální ověření velikosti magnetické indukce napříč MR uzlem.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Varianty konstrukčního řešení
5. Optimální konstrukční řešení
6. Diskuze
7. Závěr
8. Bibliografie

Forma práce: průvodní zpráva, výkresová dokumentace, funkční vzorek

Typ práce: konstrukční

Úcel práce: pro V-V a tvurčí činnost ÚK

Výstup práce: funkční vzorek (G)

Seznam odborné literatury:

- [1] NOVÁČEK, V. Konstrukce MR spojky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Roupec.
- [2] GONCALVES, F.D., AHMADIAN, M., CARLSON, J.D. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities, Smart Materials and Structures, vol. 15, no. 1, s. 75-85.
- [3] KAVLICOGLU, B. M, et al. A High-Torque Magneto-Rheological Fluid Clutch, Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures, San Diego. 2002.
- [4] ANSYS Help, URL: <<http://www.kxcad.net/ansys/>> [cit. 2012-03-01].
- [5] BEDŘICH, M. Úprava stávající konstrukce magnetoreologické spojky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Roupec.
- [6] DLUGOŠ, J. SIMULACE MAGNETICKÉHO OBVODU MAGNETOREOLOGICKÉ SPOJKY METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 78 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Roupec, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Roupec, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 10.10.2012

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem testovacího standu pro stanovení provozních parametrů magnetického hřídelového těsnění. V rámci této práce byla provedena rešerše konstrukcí magnetického obvodu a také rešerše dostupných provozních stavů. Práce z velké části obsahuje MKP analýzu navrhnutého magnetického uzlu a její experimentální odladění. Výsledky z této analýzy budou použity při dimenzování a geometrické citlivostní analýze magnetického obvodu v testovacím standu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologická kapalina, magnetoreologické těsnění, MR, magnetický obvod.

ABSTRACT

This thesis deals with design of testing stand for operating parameters magnetic seal. In this thesis was done analysis of construction magnetic circuit and analysis of operating parameters. This work contains FEM analysis of magnetic circuit and experimental tune up. The results of this analysis will be used for design magnetic circuit and geometric sensitivity analysis in test stand.

KEY WORDS

Magnetorheological fluid, magnetorheological seal, MR, magnetic circuit.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUBIK, M. *Návrh testovacího standu pro stanovení provozních parametrů magnetického hřídelového těsnění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 94s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Roupec Ph.D.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci „Návrh testovacího standu pro stanovení provozních parametrů magnetického hřídelového těsnění“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jakuba Roupce Ph.D., s využitím doporučené literatury.

V Brně dne 17. května 2013

.....
Bc. Michal Kubík

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto způsobem poděkovat vedoucímu práce Ing. Jakubu Roupcovi Ph.D. za odborné vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům a přítelkyni za podporu při celém průběhu studia.

OBSAH

Obsah	11
Úvod	13
1. Přehled současného stavu poznání	15
1.1 Základní pojmy	15
1.1.1 Magnetická kapalina	15
1.1.2 Magnetické obvody	18
1.2 Přehled technického použití MR kapalin	22
1.2.1 Ventilový mód	22
1.2.2 Smykový mód	23
1.2.3 Tlakový – tahový mód	23
1.3 Konstrukce magnetického hřídelového těsnění	24
1.3.1 Těsnění pohonu lodního šroubu	24
1.3.2 Letecký elektro-optický systém	25
1.3.3 Rotační těsnění čerpadla krve	25
1.3.4 Manipulační zařízení pro práci ve vakuu	26
1.4 Provozní parametry magnetického hřídelového těsnění	27
1.4.1 Vliv objemu MR kapaliny na přetlak těsnění	27
1.4.2 Analýza magnetického těsnění	31
1.4.3 Opatření těsnění pracujících v MR kapalině	32
1.4.4 Magnetické těsnění na bázi MR kapaliny	34
1.5 Zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše	37
2. Analýza problému a cíl práce	39
2.1 Motivace práce	39
2.2 Cíle práce	39
3. Varianty konstrukčního řešení	40
3.1 Koncepce konstrukce	40
3.2 Metodicky přístup	40
3.3 Experimentální odladění MKP modelu	43
3.3.1 Geometrie, materiálové charakteristiky, síť a řešič	43
3.3.2 MKP výpočet conductor type stranded se vzduchovou mezerou	45
3.3.3 MKP výpočet conductor type solid se vzduchovou mezerou	45
3.3.4 MKP výpočet 2D úlohy s axisymetrií se vzduchovou mezerou	45
3.3.5 MKP 3D výpočet se vzduchovou mezerou	46
3.3.6 Experimenty na funkčním vzorku	48
3.3.7 Výběr nejvhodnějšího MKP modelu	49
3.4 Varianty konstrukce MR uzlu	50
3.4.1 Parametry ovlivňující konstrukci MR uzlu	50
3.4.2 První varianta konstrukce	51
3.5 Konstrukční varianty testovacího standu	53
3.5.1 Požadavky na konstrukci	53
3.5.2 Varianty konstrukce tubusu	53
3.5.3 Varianty konstrukce tlakovací části konstrukce	55
3.5.4 Varianty temperovací části konstrukce	56
4. Optimální konstrukční řešení	58
4.1 Testovací stand	58
4.2 Konstrukční uzly	58

4.2.1 Konstrukce MR uzlu	58
4.2.2 Tubus	60
4.2.3 Tlakování část konstrukce	61
4.2.4 Temperovací část	62
4.2.5 Odvzdušnění a příslušenství	63
4.4 Nastavení standu	63
4.5 Testování provozních parametrů	64
4.5.1 Měření provozních parametrů	64
4.5.2 Vliv otáček hřídele	65
4.5.3 Vliv vůle mezi magnetickým kroužkem a hřídelí	65
4.5.4 Vliv teploty náplně	65
4.5.5 Vliv úrovně vibrací	66
4.5.6 Vliv montážní polohy	66
4.5.7 Vliv tlaku kapaliny	67
4.6 Třecí moment magnetického těsnění	67
5. Diskuze	68
6. Závěr	70
7. Seznam použitých zdrojů	71
7.1 Knihy	71
7.2 Vědecké články	71
7.3 Vysokoškolské práce	72
7.4 Internetové zdroje	73
8. Seznam použitých symbolů a veličin	75
9. Seznam obrázků, grafů a tabulek	76
9.1 Seznam obrázků	76
9.2 Seznam tabulek	78
10. Seznam příloh	79
Příloha I. – MKP výpočet MR uzlu v testovacím standu	79
Příloha II. - Určení conducting area	82
Příloha III. – Proudová hustota	84
Příloha IV. – APDL program	85
Příloha V. – p.v charakteristika těsnění	90
Příloha VI. – Grafické závislosti z článku [8]	91
Příloha VII. – Porovnání MKP a měření	93

ÚVOD

Již v 19. století velká skupina fyziků v čele s M. Faraday experimentovala s kapalinami obsahujícími jemné feromagnetické částičky v magnetickém či elektrickém poli. Bohužel tyto experimenty byly přerušeny. Za objevitele magnetické kapaliny je dnes považován Jacob Rabinow, který v 1948 publikoval první práci zabývající se magnetickými kapalinami. Ve své době byl srovnáván s velikánem jako Igor I. Sikorsky.

Jedna skupina objevených magnetických kapalin vykazuje silnou a opakovatelnou změnu reologických vlastností v magnetickém poli. Tyto magnetické kapaliny byly posléze podle dominantních vlastností nazvány magnetoreologické (MR).

Tyto regulovatelné reologické vlastnosti předurčují použití těchto kapalin při tlumení vibrací či rázů. V poslední době se také objevují konstrukce rotačních zařízení jako spojky či brzdy. U všech těchto zařízení je dnes problém s utěsněním magnetoreologické kapaliny. Je to především proto, že pracovní kapalina má abrazivní charakter. Magnetoreologická kapalina tedy abrazivně opotřebovává materiál těsnění a i nejprogresivnější teflonové těsnění má relativně nízkou životnost [3].

V oblasti MR těsnění k dnešnímu dni je velice málo experimentálních prací. Domnívám se, že je to především kvůli interdisciplinárnímu charakteru této oblasti a také donedávna zásadnímu problému se sedimentací částic. Právě nedostatečný popis chování magnetického těsnění v provozních podmínkách inicioval tento výzkum.

Zkonstruovat zařízení využívající výhod MR kapalin je komplikované a celý konstrukční proces má interdisciplinární charakter. Je nutné zohlednit chemické složení kapalin, aby nedocházelo ke kontaminaci či chemické reakci s okolním prostředím. Dále je podstatná oxidační a sedimentační stabilita kapaliny. Vlastnosti MR kapalin nelze matematicky popsat bez znalostí reologie. Znalosti v oblasti magnetostatických dějů jsou zásadní při návrhu magnetických obvodů. Většina MR aplikací je navíc řízena elektronicky, tedy není možné takové zařízení zprovoznit bez znalosti automatizace.

1. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1

1.1 Základní pojmy

1.1

1.1.1 Magnetická kapalina

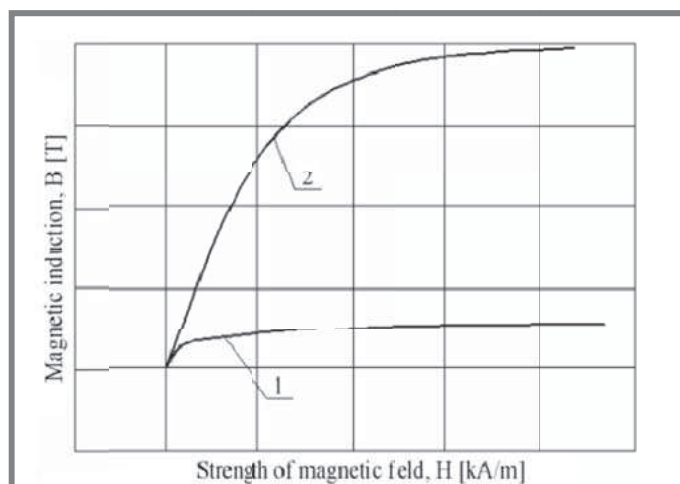
1.1.1

V minulosti se nauka o pohybu kapalin omezovala pouze na problémy, kde se neuplatňovalo magnetické ani elektrické pole [28]. Postupem času se ukázalo, že existují kapaliny, u kterých se významně projevuje interakce mezi kapalinou a elektrickým či magnetickým polem. Tyto tekutiny byly nazvány magnetické kapaliny [6].

Magnetické kapaliny jsou suspenze jemných feromagnetických částic v nosné kapalině. Dle velikosti částic rozlišujeme kapaliny na:

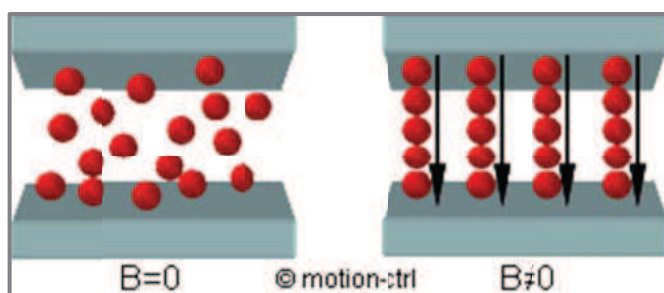
- **Nanomagnetické kapaliny** (Ferro kapaliny) - velikost částic nanometry
V důsledku malých rozměrů částic dojde k rozptýlení částic vlivem Brownova pohybu. Částice jsou potaženy tzv. sufraktantem, aby nedocházelo vlivem Van der Walsových a magnetických sil k sedimentaci. Jako aktivní povrchová činidla se využívají sloučeniny, jež mají polární „hlavu“ a nepolární „ocas“ (nebo naopak) [13]. Jedna část molekuly tak díky své nerovnovázné polaritě absorbuje nanočástici, zatímco druhá část molekuly vytvoří micelární obal. Na stejném principu fungují např. mýdla. Tento obal brání hromadění částic ve ferro kapalině. Bez těchto látek by se částice shlukovaly do větších celků a pak by hmotnost shluku byla tak velká, že by docházelo k sedimentaci.
- **Magnetoreologické kapaliny** (MR kapaliny) – velikost částic mikrometry
Výhodou jsou reologické vlastnosti, jak již samotné pojmenování naznačuje. Je zde silný a opakovatelný vztah mezi zdánlivou viskozitou a magnetickým polem. Maximálního magnetoreologického (dále jen MR) účinku lze dosáhnout výběrem částic s vysokou saturační magnetizací. Sedimentace u této kapaliny se řeší buď přidáním nanočástic nebo přidáním povrchově aktivních látek [13]. Přidáním těchto látek se kapalina stává měkkou. Pojem měkká naznačuje, že kapalina má menší rozdíl viskozity v aktivovaném a neaktivovaném stavu, než bez těchto aditiv. Problém je ovšem oxidace. Výrazně ovlivňuje životnost. Oxiduje, jak nosná kapalina, tak částice. Oxidací dochází ke změně viskozity, meze kluzu (toku) či samotného chemického složení. To vede ke zhoršení MR efektu. Oxidy na povrchu částic mají nižší magnetickou saturaci nebo nejsou vůbec magnetické. Dle článku [10] bylo zjištěno, že oxidace je tím větší, čím je větší teplota a menší průměr částic.

Další rozdíl mezi výše uvedenými typy kapalin je v maximálním nasycení magnetickým polem. Magnetoreologickou kapalinu lze zhruba 2,5-krát více nasytit magnetickým polem než nanomagnetickou kapalinu. Tento fakt je možno vidět na obrázku 1-1.



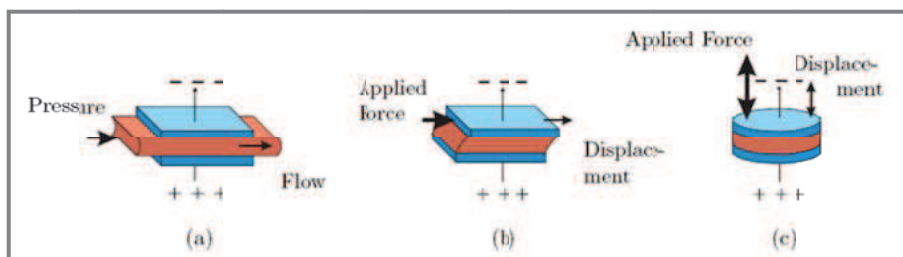
Obr. 1-1 Porovnání Ferro kapaliny (1) a MR kapaliny (2) [6]

Obrázek níže vlevo ilustruje neuspořádanou strukturu magnetické kapaliny bez přítomnosti magnetického pole. Částice mají dipóly libovolně orientovány. V této konfiguraci je MR kapalina svou konzistencí podobná motorovému oleji (0,2 - 0,3) Pa.s/20°C. Její chování je popsáno Newtonovým zákonem viskozity. Na obrázku 1-2 vpravo jsou částice umístěny v magnetickém poli. Za těchto podmínek se částice shlukují v řetězce. Vznikají dipóly orientovány ve směru magnetických siločar. Kapalině se rapidně zvýší zdánlivá viskozita. Tento jev je často označován jako **MR efekt**. V této konfiguraci se MR kapalina chová jako nenewtonovská. Existuje mnoho reologických modelů, které se zabývají popisem chování tohoto efektu, avšak nejvýznamnější je Binghamův model. MR kapaliny mají rychlou reakci na změnu magnetického pole. Jedná se o časy okolo 0,001s.



Obr. 1-2 MR efekt [32]

V různých technických aplikacích pracuje MR kapalina v odlišných tzv. „**módech**“. Jedná se tedy o konkrétní způsob zatěžování MR kapaliny. Nejčastěji používaný je ventilový mód [15].



Obr. 1-3 Módy MR kapaliny [22] a) ventilový, b) smykový a c) tlakový-tahový mód

U **ventilového** módu kapalina protéká mezi dvěma rovnoběžnými deskami. Použití toho módu je převážné u tlumičů. Tento mód můžeme popsat Hagen–Poisseuillovou rovnicí. **Smykový mód** lze v technické praxi nalézt v konstrukci spojek či brzd. Rozdíl oproti předchozímu módu je, že vrchní deska se oproti spodní pohybuje. Poslední popisovaný je **tlakový - tahový mód**. Použití nalezne především při tlumení vibrací.

Na světovém trhu lze nalézt tři nejvýznamnější firmy, které se zabývají výrobou a prodejem magnetických kapalin. První z nich je Ferrolabs [23]. Jedná se o ruskou společnost. Tato firma vyrábí převážně nanomagnetické kapaliny a pouze jednu magnetoreologickou. V tabulce 1 lze nalézt vyráběné nanomagnetické kapaliny se základními vlastnostmi. Tabulka 2 vyobrazuje MR kapaliny.

Tab. 1 Ferrolabs nanomagnetické kapaliny

Název	Saturační magnetizace [kA/m]	Viskozita [Pa.s]	Nosná kapalina	Aplikace
FLU 040.040	20-60	0,2-0,8	Silikonový olej	Výzkumné použití
FLS 300.020	20-30	0,5-0,8	Silikonový olej	Dynamické těsnění vakua
FLF 750.030	30-40	max 15	Perflurpolyether	Těsnění chem. reaktorů
FLS 450.040	20-50	-	Silikonový olej	Statické těsnění
FLW 001.40	5-30	0,02	Voda	Biotechnologie
FLC 002.050	30-70	0,1-0,25	Petrolej	Senzory
FLC 050.025	25-50	max 0,3	Syntetický olej	Těsnění ložisek a převodů

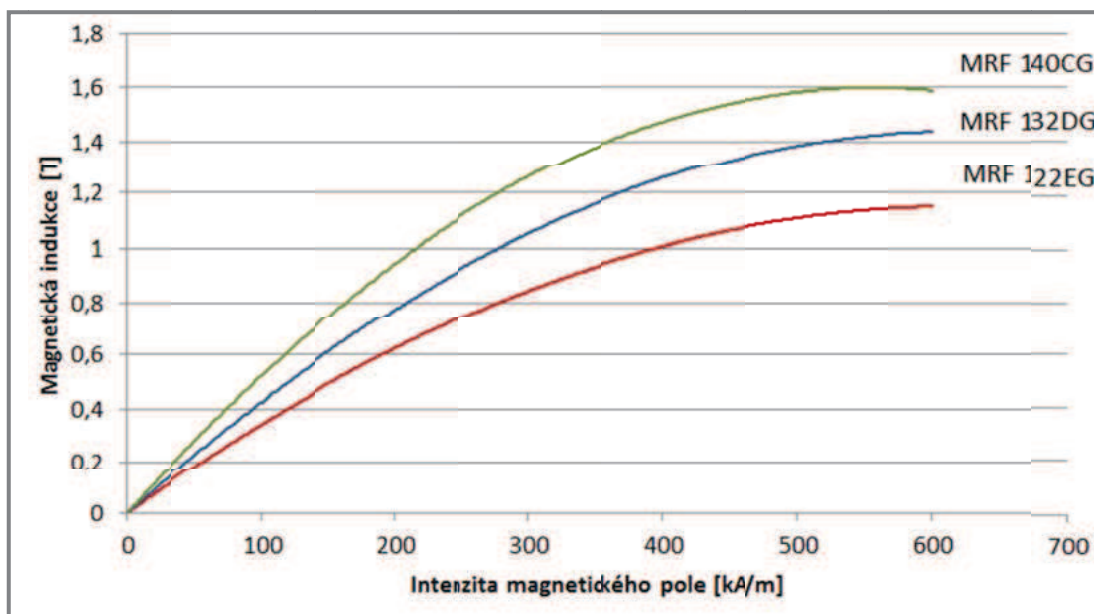
Tab. 2 Ferrolabs magnetoreologické kapaliny

Název	Saturační magnetizace [kA/m]	Viskozita [Pa.s]	Nosná kapalina	Aplikace
FLS 040.600	600-700	max 10	Silikonový olej	Brzdy, tlumiče

Druhou firmou je LORD [24]. Jedná se o americko-kanadskou společnost. Firma Lord vyrábí převážně MR kapaliny. Přehled vyráběných MR kapalin v tabulce 3.

Tab. 3 LORD MR kapaliny

Název	Ms [T]	Viskozita 40°C [Pa.s]	Hmotnostní procento částic [%]	Objemové procento částic [%]
MRF-122EG	B-H křivka	0,042	72	22
MRF-132DG	B-H křivka	0,112	81	32
MRF-140CG	B-H křivka	0,28	85	40



Obr. 1-4 Zjednodušené B-H křivky MR kapalin firmy Lord, převzato z [24]

Poslední firmou je anglická Liquids research [22]. Tato firma vyrábí převážně nanomagnetické kapaliny pro konkrétní typy použití v těsnění a také jednu MR (tab.5).

Tab. 4 Liquids research nanomagnetické kapaliny

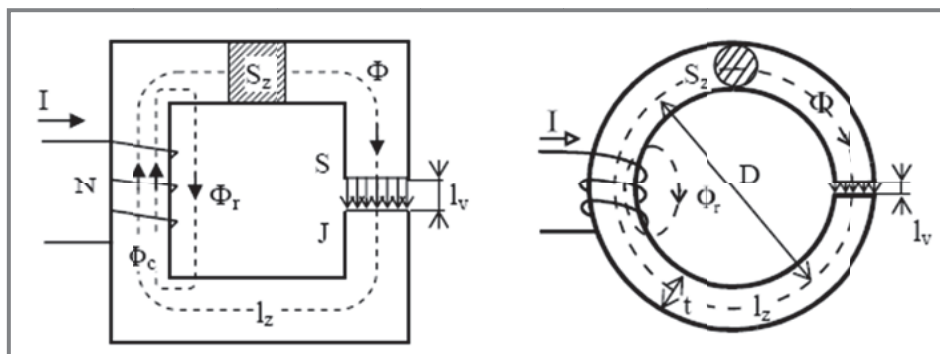
Název	Ms [T]	Velikost částic[nm]	Viskozita [Pa.s]	Základ kapaliny
SHGS4-U	0,045	10	3,5	Uhlovodíky
SPBS26	0,045	10	3	PFPE
SPCS25-A	0,04	10	10	PFPE
SPCS25-B	0,04	10	20	PFPE
SHAS1S2-A	0,06	10	1,2	Uhlovodíky
SHAS4-A	0,02	10	0,5	Uhlovodíky

Tab. 5 Liquids research MR kapaliny

Název	Viskozita [Pa.s]	Nosná kapalina	Hmotnostní podíl [%]
MRHCCS4-A	Tixotropní	Uhlovodíky	70

1.1.2 Magnetické obvody [1]

Magnetické obvody slouží k soustředění magnetického pole do určitého pracovního prostoru. Je snaha tyto magnetické obvody optimálně tvarovat a vybrat vhodný materiál pro vodivé dráhy. Magnetické pole je obvykle vytvořeno cívkou s určitým počtem závitů. Vodivé dráhy a cívka se dohromady označují jako magnetický obvod. Ukázka jednoduchých magnetických obvodů na obrázku 1-5.

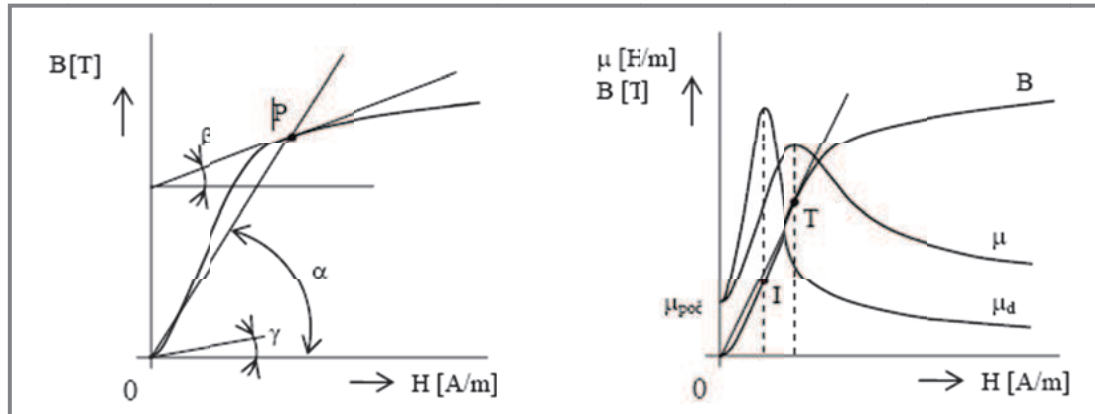


Obr. 1-5 Příklad magnetického obvodu [29]

Podle chování materiálu v magnetickém poli, které je určeno jejich relativní permeabilitou, je rozdělujeme na

- diamagnetické - $\mu_r < 1$,
- paramagnetické - $\mu_r > 1$,
- feromagnetické - $\mu_r \gg 1$.

Diamagnetické a paramagnetické látky mají relativní permeabilitu konstantní a tedy nezávisí na intenzitě magnetického pole. Pro vodivé dráhy, často nazývané pólové nádstavce, mají největší význam látky **feromagnetické**. Za pomoci malého budícího proudu v cívce lze dosáhnout s těmito materiály silného magnetického pole. Problém je však, že většina feromagnetik je **nelineární**. Jejich magnetizační křivka je nelineární. Magnetizační křivka je závislost magnetické indukce (značíme B) na intenzitě magnetického pole (značíme H) $B = f(H)$. Ukázka na obrázku 1-6.

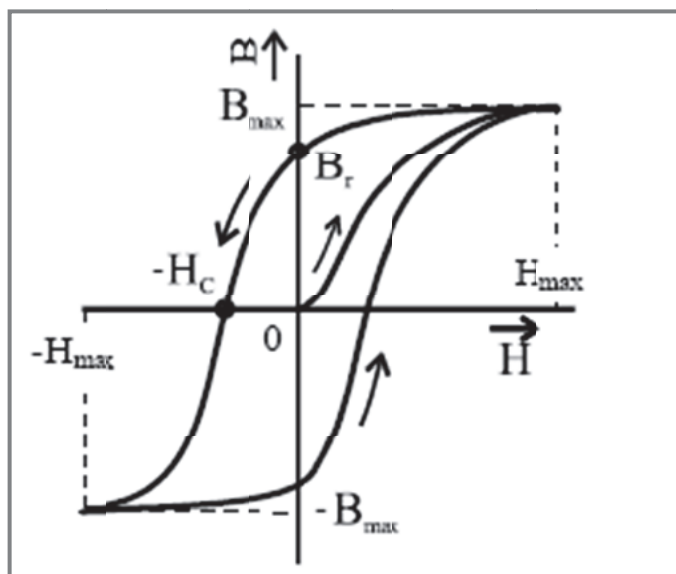


Obr. 1-6 Magnetizační křivka [29]

Velké množství magnetizačních křivek má svůj typický průběh. V první části následuje zhruba lineární průběh až do zlomu, kde dochází k tzv. nasycení feromagnetika. Poté křivka sleduje zhruba lineární průběh. Je zřejmé, že v každém bodě magnetizační křivky bude vykazovat feromagnetikum jinou relativní permeabilitu. Proto se často graficky vyobrazuje i průběh permeability (relativní permeability) na intenzitě magnetického pole. Obrázek 1-6 vpravo. V tuto chvíli je vhodné poznamenat, že existuje jak statická, tak dynamická permeabilita. Podrobnější informace lze nalézt v [1].

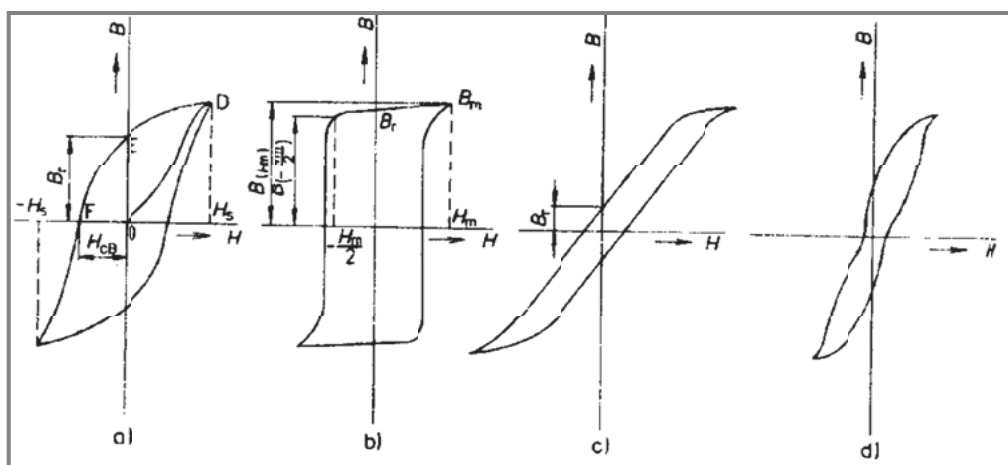
Jak již bylo uvedeno, tak magnetická indukce je funkcí intenzity magnetického pole. Tedy pro jednu hodnotu intenzity magnetického pole je přiřazena právě jedna hodnota magnetické indukce.

Bohužel ve skutečnosti závislost $B = f(H)$ není jednoznačnou funkcí. Pro jedno H existuje více B . Je to způsobeno předchozím magnetováním (tj. na jeho historii). Závislost, která zahrnuje historii magnetování, se nazývá **hysterezní křivka**.



Obr. 1-7 Hysterezní křivka [29]

Bude-li se magnetovat dokonale odmagnetovaný materiál, potom se pohybuje po křivce prvotní magnetizace. Tato křivka odpovídá již zmíněné magnetizační křivce. Při poklesu H neprobíhá odsmagnetování po stejné křivce. Při nulové hodnotě H zůstaneme v bodě B_r , což je jeden z význačných bodů na hysterezní křivce. Často je označován, jako **remanentní** (zbytková) **magnetická indukce**. Pokud se dále budeme posouvat po křivce v bodě, kde magnetická indukce je rovna nule, lze nalézt tzv. **koercitivitu**. Z hlediska plochy hysterezní smyčky dělíme materiály na magneticky měkké a magneticky tvrdé. Magneticky měkké materiály mají malou koercitivní intenzitu a snadno se magnetují. Magneticky tvrdé přesně naopak. Ukázku různých typů hysterezních smyček na obrázku 1-8. Na tvar hysterezní smyčky má obrovský vliv chemické složení a způsob zpracování.



Obr. 1-8 Typy hysterezních křivek [29]

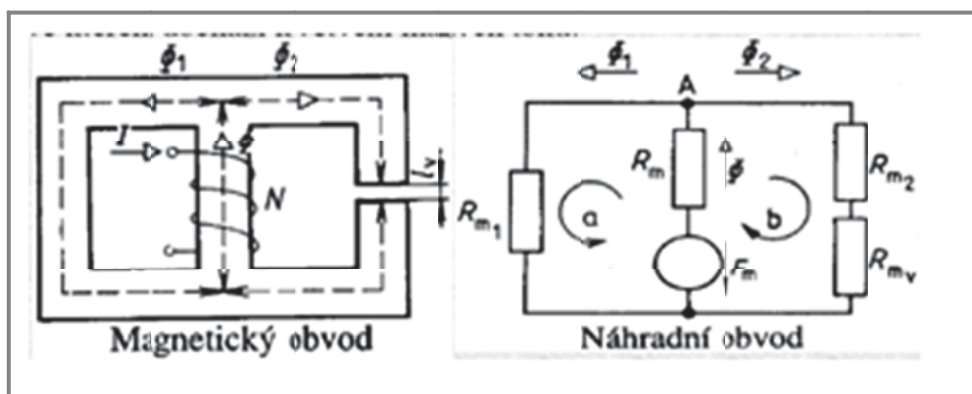
Cílem řešení magnetických obvodů je analýza nebo syntéza. Při **analýze** vycházíme z kompletně zadaného obvodu a zjišťujeme magnetické toky a další fyzikální parametry. Častěji provádíme **syntézu** obvodu, kdy navrhujeme magnetický obvod, abychom dostali určitou velikost magnetické indukce v konkrétním místě obvodu.

Přístupy k řešení magnetických obvodů jsou v zásadě čtyři:

- analytický,
- analogie s obvody proudového pole a elektrických obvodů,
- numerický,
- empirické vztahy.

Analytický lze magnetické pole popsat jen pro omezenou skupinu prvků. Patří zde především solenoid a toroid.

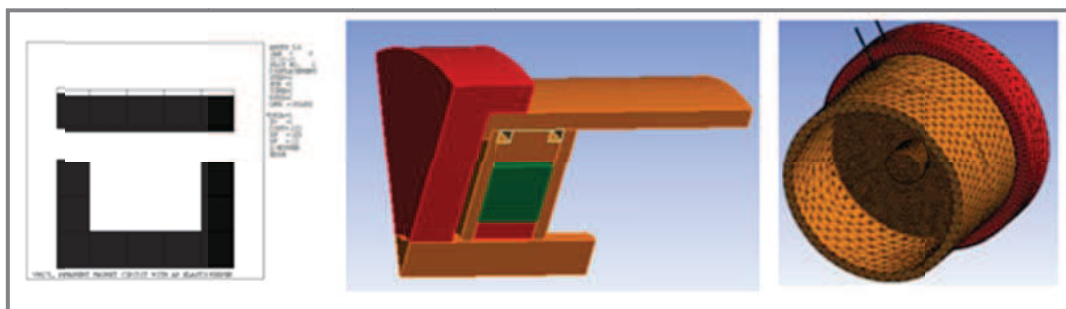
Bylo zjištěno, že pro každý magnetický obvod lze nakreslit náhradní schéma **analogické** k schématům elektrických obvodů. Při řešení obvodů proudového pole používáme zejména Ohmův zákon a Kirchhoffovy zákony. Uvedené zákony mají své analogie i u obvodů magnetických. Jedná se především o Hopkinsonův zákon. Podrobnější informace lze nalézt v [1]. Ukázka analogie na obrázku 1-9.



Obr. 1-9 Magnetický a elektrický obvod [29]

Numerické řešení je především uskutečněno pomocí metody konečných prvků (dále jen MKP). V závislosti na geometrii řešeného problému lze úlohy rozdělit do tří hlavních skupin a to na úlohy řešené jako:

- rovinné,
- prostorové,
- prostorové s rotační symetrií.



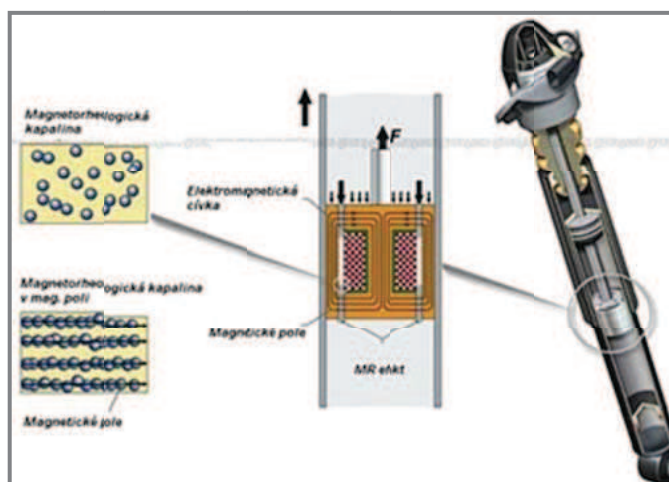
Obr. 1-10 Typy úloh [29]

Empirický vztah je založen na zkušenosti z pozorování. Dnes existuje celá řada empirických vztahů pro nejtýpější aplikace v elektrotechnické praxi. Je ale nutné poznamenat, že tyto vztahy jsou pouze jen přibližné.

1.2 Přehled technického použití MR kapalin

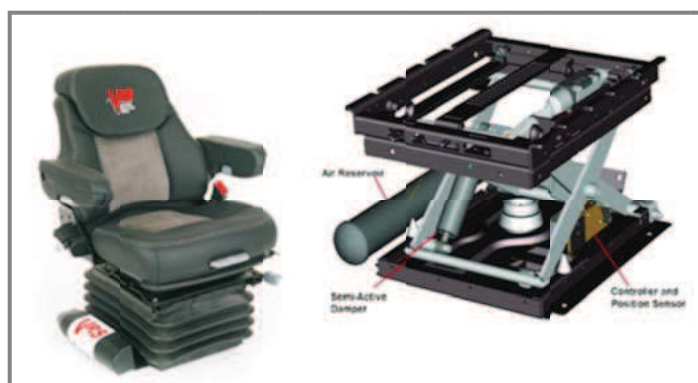
1.2.1 Ventilový mód

Jednou z perspektivních aplikací magnetických kapalin jsou tlumiče (obr. 1-11). Postupně se rozšiřují a nahrazují konvenční tlumiče. Výhodou tohoto zařízení je možnost rychlého nastavení tlumicího účinku a krátká časová odezva. Značná nevýhoda je zatím pořizovací cena.



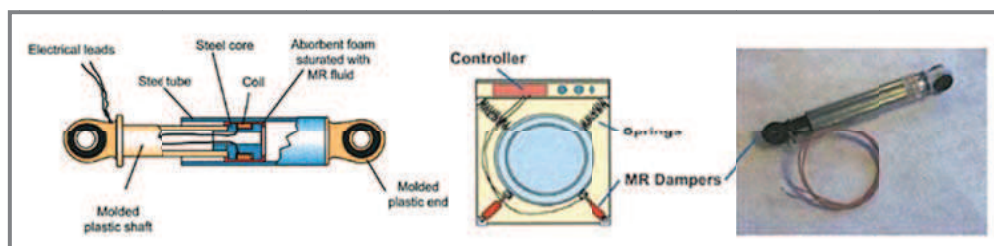
Obr. 1-11 MR tlumič [19]

Konkrétní aplikací tlumiče s magnetickou kapalinou je odpružení sedadel v dopravních prostředcích. Touto aplikací se zabývá firma Sears Sestiny.



Obr. 1-12 Sedadlo dopravního prostředku [18]

Dalším příkladem nežádoucího vibračního pohybu je pračka [30]. Dá se říci, že při odstředování má tendenci „odejít“ z místnosti. Je to způsobeno tím, že buben pračky musí projít přes její rezonanční frekvenci. Při praní je MR tlumič neaktivní až do zmíněného odstředování. Při použití MR tlumičů se vibrace při průchodu rezonanční frekvencí dají téměř potlačit.



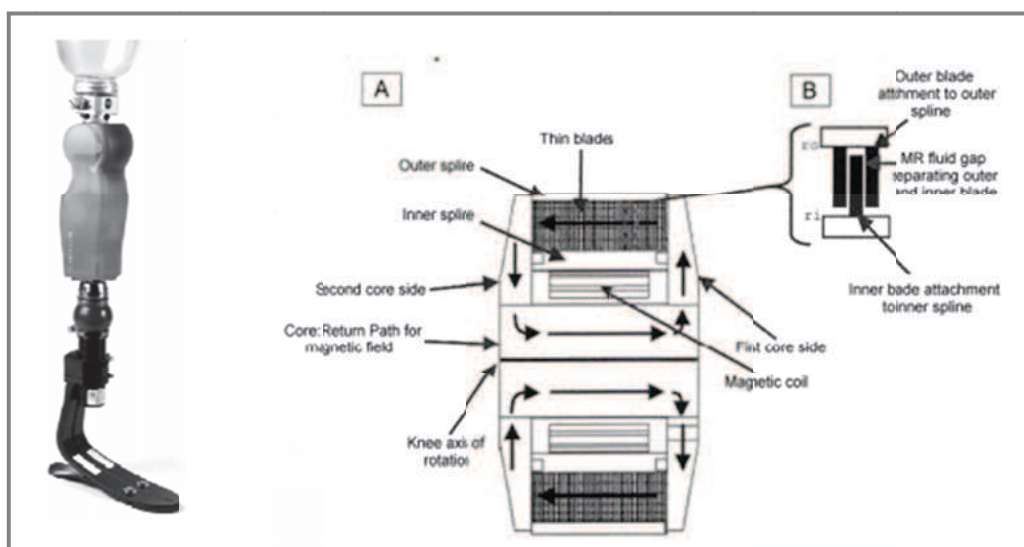
Obr. 1-13 Tlumič pračky [30]

Dále existuje obrovské množství využití této technologie, ať už je to k tlumení rezonance ve vysokých budovách, či po tlumiče lan mostů [16,17,19].

1.2.2 Smykový mód

1.2.2

Další velice perspektivní oblastí využití MR kapalin je v brzdách a spojkách. Zajímavou oblastí použití této technologie je lékařství. Firma Ossur vyrábí kolenní kloub s rotační brzdou řízenou mikroprocesorem [31]. Maximální váha pacienta může být až 90 Kg. Brzda vyvozuje brzdný moment okolo 45 N.m. Schéma konstrukce na obrázku 1-14.

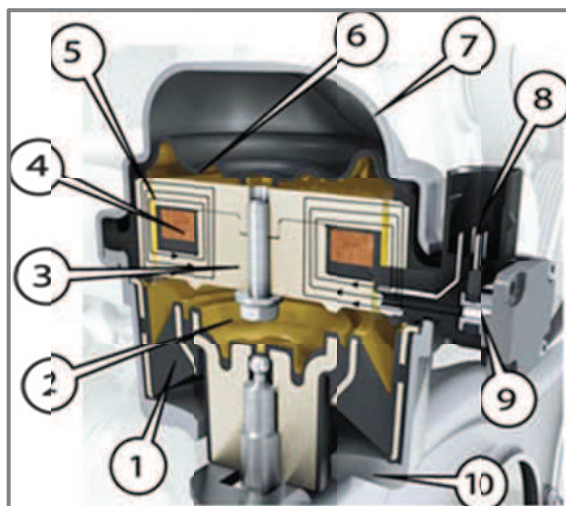


Obr. 1-14 Brzda kolenního kloubu [31]

Velice slibné se jeví i spojka pro hmatové zařízení do virtuální reality [11]. V této oblasti lze nalézt také velké množství aplikací stejně jako u tlumení [14,20].

1.2.3 Tlakový – tahový mód

Tlakový - tahový mód je velice perspektivní a progresivní způsob tlumení nežádoucích vibrací či rázů. Firma Delphi v roce 2005 vyvinula dynamické uložení spalovacího motoru pomocí této technologie. Poté firma Porsche použila tento typ uložení motoru u svého automobilu Porsche 911 GT3.



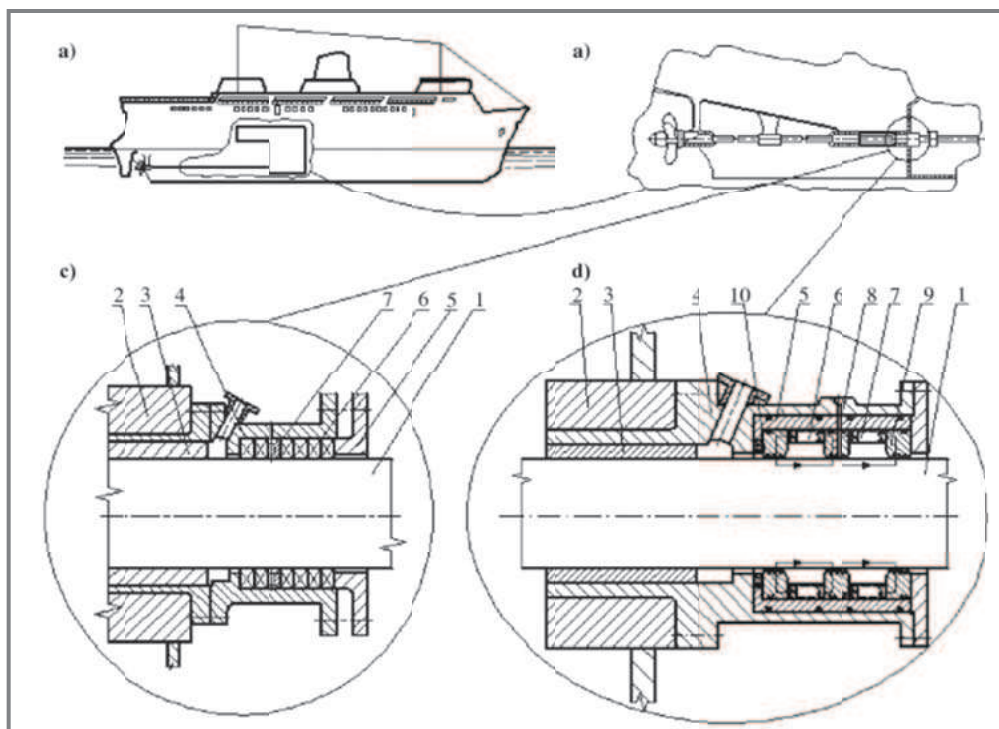
Obr. 1-15 Uložení motoru Porsche 911 GT3 [25]

Uložení je tvořeno magnetickým obvodem (3), cívkou (4) a magnetickou kapalinou (2). MR uložení motoru zlepší jízdní komfort a dynamiku vozidla. Dále lze tímto způsobem redukovat hlučnost automobilu.

1.3 Konstrukce magnetického hřídelového těsnění

1.3.1 Těsnění pohonu lodního šroubu [6]

U tradiční koncepce těsnění lodního šroubu pomocí ucpávek je vždy nastaven určitý objem průsaku kapaliny. Je to z důvodů, aby se těsnění mohlo vodou mazat. Další nevýhodou je, že se ucpávky musí po určité době kontrolovat a dotahovat. Tyto problémy by mělo vyřešit těsnění pomocí magnetické kapaliny.



Obr. 1-16 Těsnění lodního šroubu [6]

Na obrázku 1-16 c) je možno vidět tradiční koncepci těsnění. V části d) obrázku 1-16 je těsnění uskutečněno přes magnetickou kapalinu. Pozice 5(d) ukazuje nemagnetické uložení pólových nadstavců. Na pozici 6(d) a 7(d) můžeme vidět permanentní magnety. Umístění magnetické kapaliny můžeme nalézt na pozici 10(d).

1.3.2 Letecký elektro-optický systém [18]

1.3.2

V současné době jsou bojové letouny zcela závislé na použití nějakého druhu avioniky, zejména palubních radiolokátorů, navigačních a komunikačních systémů a dalších. Problémem těchto zařízení je jejich elektromagnetické vyzařování. To umožňuje protivníkovi letadlo odhalit. Elektro-optické systémy mají nahradit tradiční konstrukci radiolokátorů. Obrovskou výhodou elektro-optického systému je, že nevyzařuje elektromagnetické vlny a také je nelze nějak z vnějšku rušit.

Tento systém vyžaduje uzavřenou komoru bez vlhkosti a plynů. Letadlo je často podrobováno prachu, dešti, leteckým palivům, odmrazovacím sprejům a tekutinám v rámci různých teplot a tlaků. Magnetické těsnění poskytuje hermetické utěsnění a zároveň umožňuje hladký pohyb. Tradiční elastomer nemůže poskytnout srovnatelnou výkonnost.

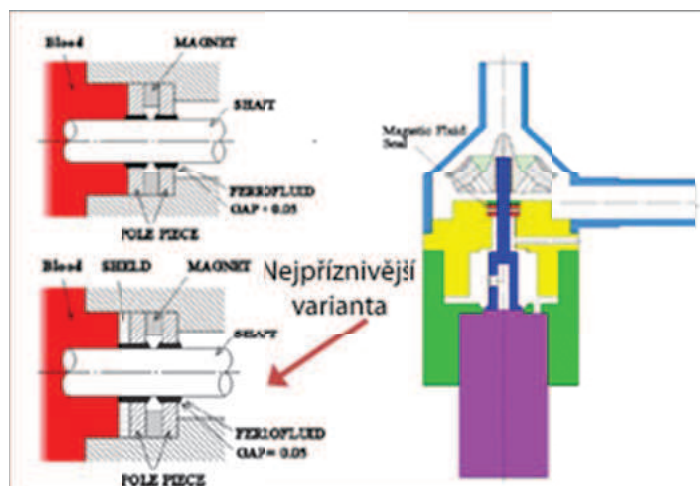


Obr. 1-17 Elektro-optický sledovací systém [18]

1.3.3 Rotační těsnění čerpadla krve [5]

1.3.3

Japonští výzkumníci z Biomedicálního ústavu na universitě v Hokkaidu se rozhodli k testům magnetického těsnění v čerpadle krve. Důvodem práce na vývoji nového druhu těsnění čerpadla krve byla nízká životnost mechanického těsnění, vznik trombů a hemolýzy. V práci byly použity tři koncepce těsnění. Průměr hřídele čerpadla byl 27 mm a těsnicí mezera 50 μm . Jako pracovní medium při testech byla použita destilovaná voda. Průtok čerpadlem při experimentech byl 4 l/min při tlaku 160 mmHg (0,2 bar). Schéma čerpadla na obrázku 1-18 vpravo.



Obr. 1-18 Koncepce těsnění čerpadla krve [5]

Jako nejvíce příznivá, co se týče životnosti, byla koncepce C. Závěry z této práce lze nalézt na obrázku 1-19.

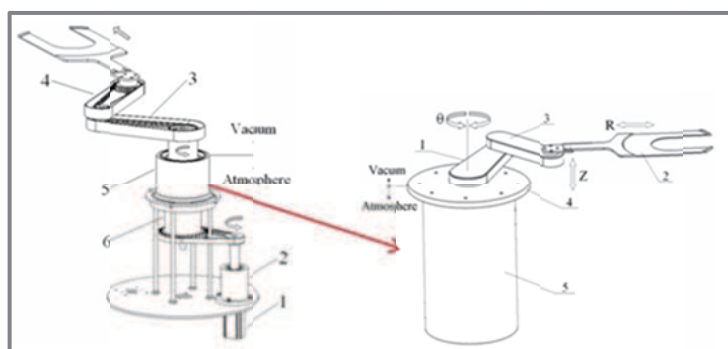
Seal	Shield	Position of magnetic fluid	Life (Day)	Motor Speed (rpm)	Outlet Pressure (mmHg)	Flow Rate (L/min)
Seal A	No	Water level	6	5248	161	4.0
	No	Water level	11	5104	164	4.2
Seal B	No	One nm below water level	20	5142	167	3.9
	No	One nm below water level	73	5172	171	5.0
Seal C	Yes	One nm below water level	275	4243	150	4.0
	Yes	One nm below water level	217*	5049	175	3.9

* Inlet and outlet tubes were mistakenly knicked.

Obr. 1-19 Výsledky experimentů čerpadla krve [5]

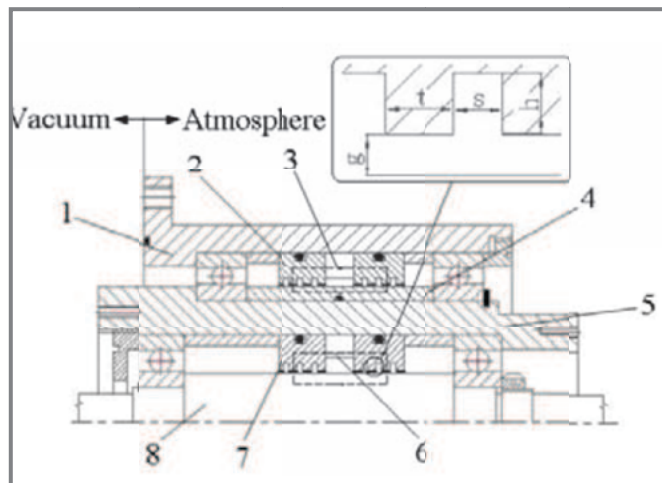
1.3.4 Manipulační zařízení pro práci ve vakuu [4]

Autoři Gong a Dai z Dalian university v Číně navrhli manipulační zařízení pro práci ve vysokém vakuu. Utěsnění rotační části zařízení od vakua je pomocí magnetické kapaliny. Ukázka zařízení na obrázku 1-20.



Obr. 1-20 Schéma manipulačního zařízení [4]

Konkrétní provedení geometrie břitů a samotná konstrukce na obrázku 1-21. Na obrázku lze vypožorovat, že jsou zde dva magnetické obvody (2,7) s permanentními magnety (3,6). Rozdíl průměrů byl volen tak, aby se jednotlivé magnetické toky navzájem výrazně neovlivňovaly.



Obr. 1-21 Konstrukční uspořádání magnetického obvodu [4]

Dále je uvedena tabulka s maximálním přetlakem při nulových otáčkách (statický přetlak). Maximální přetlak těsnění byl 2,6 MPa.

Tab. 6 Výsledky práce [4]

Parametry	Vnitřní hřídel	Vnější hřídel
Průměr hřídele	35 mm	80 mm
Vzduchová mezera	0,1 mm	0,1 mm
Šířka zubu	2 mm	2 mm
Vnitřní průměr magnetu	45 mm	110 mm
Vnější průměr magnetu	60 mm	120 mm
Počet břitů	8	8
Maximální přetlak	2,6 MPa	2,2 MPa

V článku bohužel autoři neuvedli, kterou magnetickou kapalinu použili. Uvedena je zde pouze magnetizace této kapaliny $M = 30 \text{ kA/m}$.

1.4 Provozní parametry magnetického hřídelového těsnění

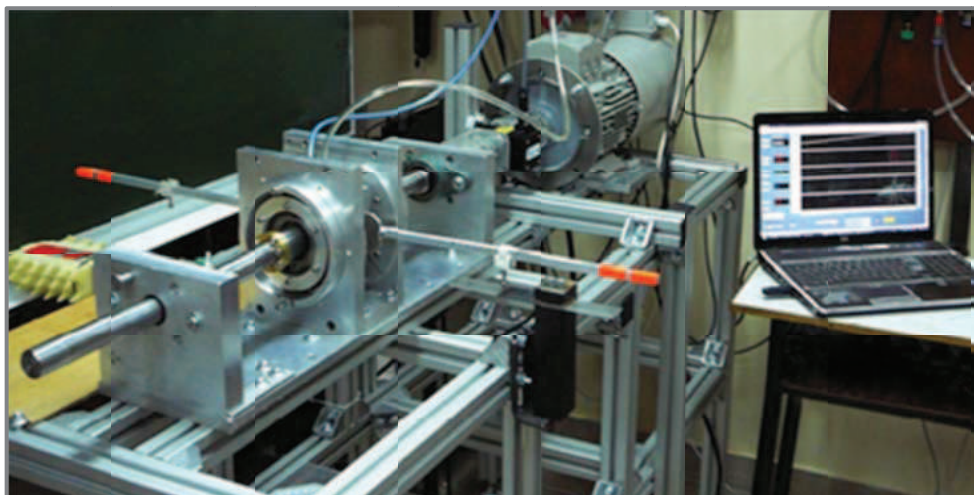
1.4

1.4.1 Vliv objemu MR kapaliny na přetlak těsnění [8]

1.4.1

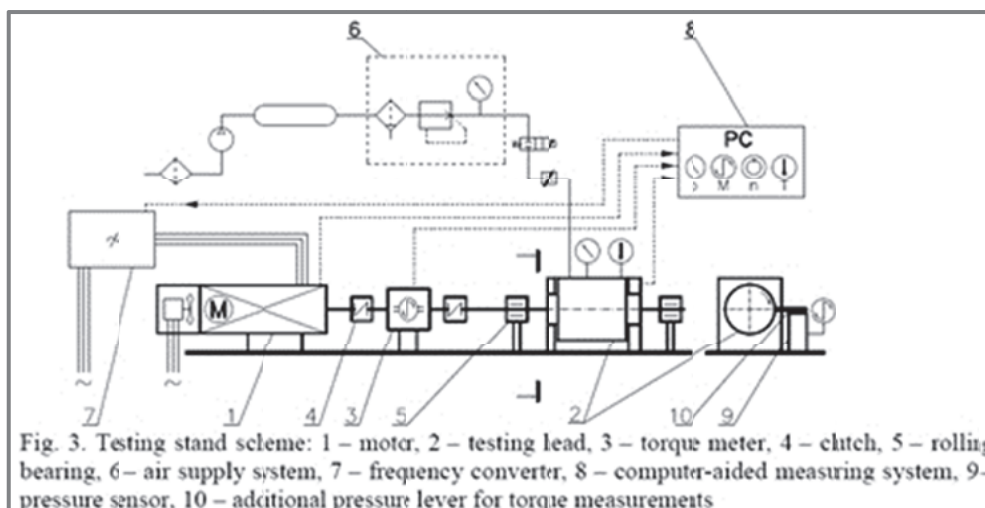
Autoři Potoczny a Zachara publikovali v roce 2012 článek zabývající se vlivem objemu MR kapaliny v olejové mezeře na přetlak těsnění. K těmto experimentům zkonstruovali testovací zařízení vyobrazené na obrázku 1-22.

Testovací stand byl navrhnut k měření maximálního přetlaku těsnění a odporu proti pohybu při různých provozních parametrech. Zařízení je složeno z testovací hlavy (2), pohonné jednotky (1), jednotky pro tlakový vzduch (6) a senzorů připojených k počítači (8).



Obr. 1-22 Testovací stand [8]

Podrobnější schéma standu na obrázku 1-23, popřípadě popis všech senzorů či dalších pomocných zařízení v [8].



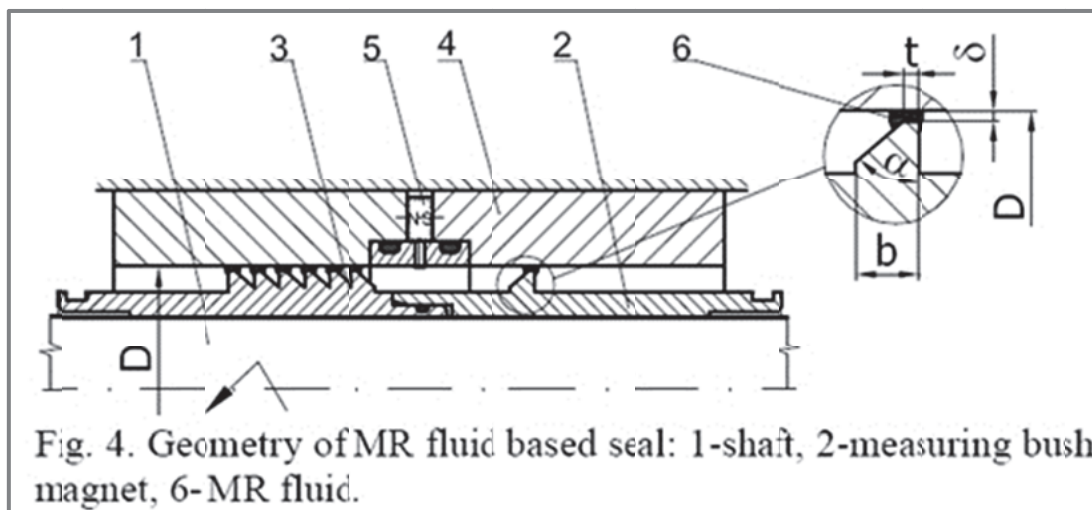
Obr. 1-23 Schéma standu [8]

Testy vlivu objemu kapaliny byly provedeny pro tři velikosti olejových mezer a to pro 0,15mm, 0,3mm a 0,5 mm. Přesná geometrie pólových nádstavců a celého magnetického obvodu na obrázku 1-24.

Table 1. Geometrical and magnetic parameters of the MR fluid-based seal.							
Number of sealing stages $Z_{\text{ext}}-Z_{\text{int}}$	Geometrical parameters					Magnetic parameters	
	D [mm]	δ [mm]	t [mm]	b [mm]	α [°]	B_{max} [T]	H_{max} [kA/m]
6-1	50	0.15mm	0.6	5	45	1.35	750
		0.3mm	1.2			0.92	325
		0.5mm	2			0.67	180

Obr. 1-24 Geometrie [8]

Testy byly provedeny pro koncepci těsnění s průměrem 50 mm a to jak ve statickém ($n = 0 \text{ min}^{-1}$), tak i dynamickém režimu ($n = 1000 \text{ min}^{-1}$). Testy byly prováděny při okolní teplotě 23°C , vlhkosti okolo 50% a atmosférickém tlaku 730-750 mmHg. Testována byla MR kapalina vyráběná americkou společností LORD. Jednalo se o kapalinu **MRF-122EG**.



Obr. 1-25 Schéma geometrie [8]

Vytvoření magnetického pole se uskutečnilo pomocí 14nácti neodymových magnetů o průměru 8mm a tloušťce 5mm rovnoměrně rozprostřených po celém obvodu těsnění. Koercitivní síla každého magnetu činila 1050 kAm^{-1} .

Aby bylo možné porovnávat jednotlivé objemy olejových mezer mezi sebou, byla zavedena veličina relativní objemový faktor $\frac{V}{V_n}$. Jedná se o poměr objemu kapaliny aplikované do těsnění (V) ku objemu olejové mezery (V_n). Všechna měření byla provedena pro relativní objemový faktor 1, 3, 5 a 10. Tabulky naměřených hodnot na obrázku 1-26.

Number of sealing stages:		Gap height $s[\text{mm}]$	Gap nominal volume $V_n [\mu\text{l}]$	Relative volume factor of MR fluid V/V_n	Volume of fluid applied into the gap $V [\mu\text{l}]$	Static seal burst pressure $p_{krs} [\text{kPa}]$	Dynamic seal burst pressure $p_{krd} [\text{kPa}]$
Z_w	Z_z						
6	1	0,15	15	1	15	0	0
				3	45	55	18
				5	75	67	36
				10	150	81	44
6	1	0,3	60	1	60	42	12
				3	180	54	34
				5	300	74	44
				10	600	79	53
6	1	0,5	160	1	160	34	14
				3	500	81	38
				5	800	87	42
				10	1600	98	42

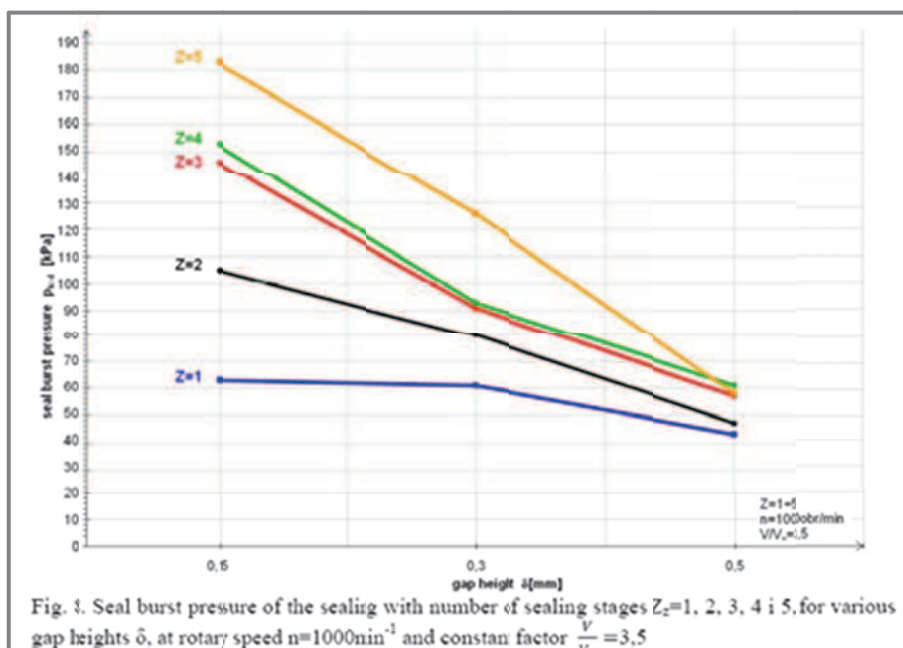
Obr. 1-26 Výsledky práce [8]

Grafy průběhu jednotlivých závislostí pro různé olejové mezery v příloze IV. diplomové práce. Dále byly experimentálně naměřeny závislosti v dynamickém režimu pro více břitů v těsnění. Tyto experimenty probíhaly za konstantního relativního objemu 3,5.

Gap height δ [mm]	Nominal gap volume V_n [μ l]	Relative volume factor V/V_n	Fluid volume in the gap V [μ l]	Number of seal burst sealing stages		Dynamic seal burst pressure p_{krd} [kPa]
				Z_r	Z_z	
0,15	15	3,5	50	6	1	63
				6	2	105
				6	3	146
				6	4	153
				6	5	183
0,3	60	3,5	200	6	1	61
				6	2	80
				6	3	91
				6	4	93
				6	5	126
0,5	160	3,5	550	6	1	43
				6	2	47
				6	3	57
				6	4	61
				6	5	58

Obr. 1-27 Výsledky práce - konkretizace [8]

Na obrázku 1-28 jsou graficky zpracovány výsledky z měření. Jedná se o závislost maximálního přetlaku těsnění na velikosti olejové mezery. Každá křivka vyjadřuje počet břitů v těsnění.



Obr. 1-28 Závislost počtu břitů [8](z...počet břitů v těsnění)

Na základě získaných dat z článku lze tvrdit, že většího přetlaku těsnění je dosaženo snižováním velikosti olejové mezery a zvyšováním počtu břitů. Optimální relativní objemový faktor pro olejové mezery je:

- pro mezeru 0,15 mm je $\frac{V}{V_n} = 10$,
- pro mezeru 0,3 mm je $\frac{V}{V_n} = 5$ a
- pro mezeru 0,5 mm je $\frac{V}{V_n} = 3$.

1.4.2 Analýza magnetického těsnění [7]

1.4.2

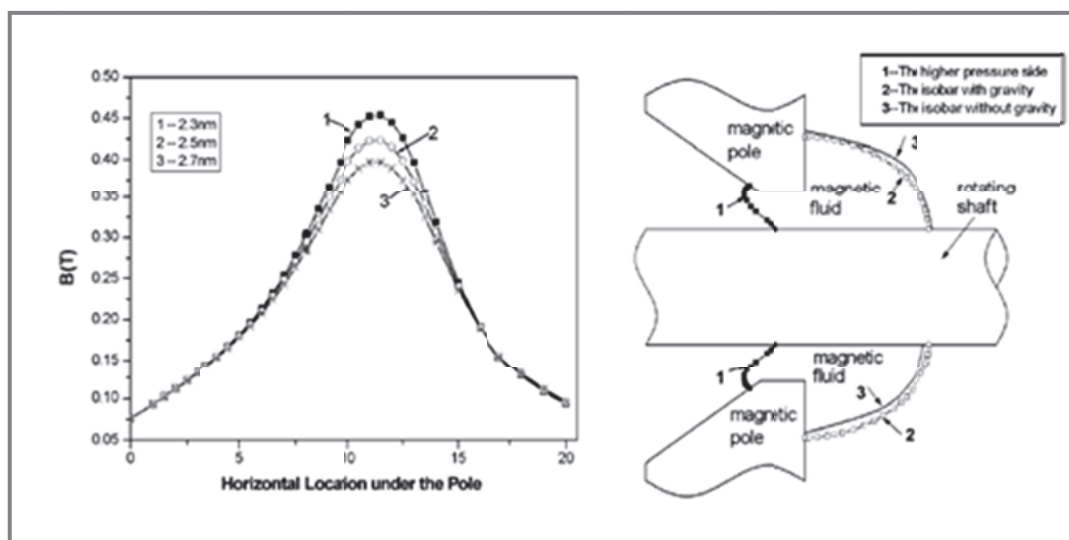
Kapacita magnetického těsnění je závislá na mnoho faktorech. Mezi nejdůležitější patří materiálové charakteristiky kapaliny, intenzita magnetického pole, vzduchová (olejová) mezera, excentricita hřídele, průměr hřídele a odstředivá síla. Kapacita magnetického těsnění je vyjádřena tlakovým rozdílem před a za těsněnou oblastí. Ve statických podmínkách převažují především dva parametry a to materiálová charakteristika kapaliny a magnetická indukce. Pro statický stav uveden vztah pro maximální přetlak.

$$\Delta p_{max} = M_s \cdot B_{max} \quad (1-1)$$

Kde M_s je hodnota magnetizace magnetické kapaliny [A/m] a B_{max} je magnetická indukce v místě vzduchové mezery [T].

Když hřídel rotuje úhlovou rychlostí ω_0 , vliv odstředivé síly je nutné uvažovat. Více lze nalézt v práci [7].

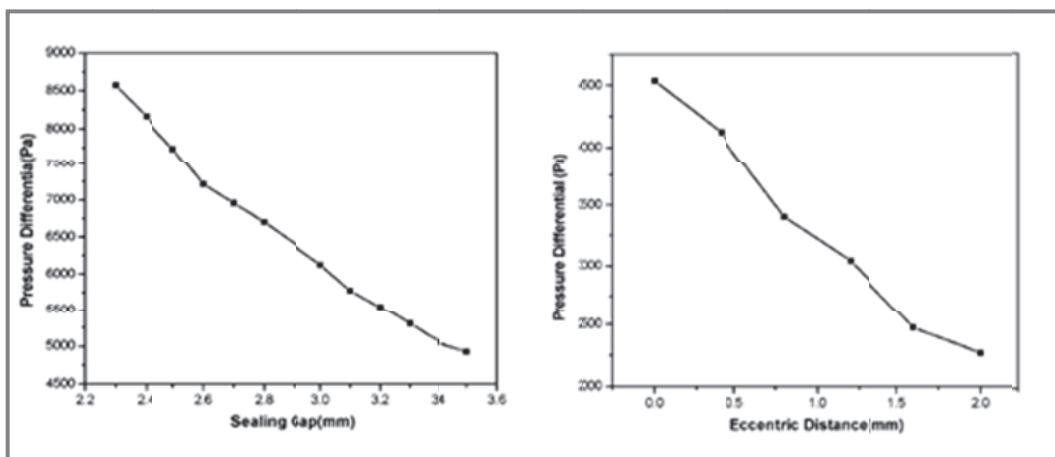
Při předpokladu, že gravitace je zanedbána, magnetizace kapaliny je konstantní a objem kapaliny je dostatečně velký, o kapacitě těsnění rozhoduje pouze magnetická indukce v kapalině. Rozložení magnetické indukce pod břitovým nástavcem prezentuje obrázek 1-29.



Obr. 1-29 Rozložení magnetické indukce [7] (1) strana vyššího tlaku, (2) s a (3) bez vlivu gravitace

Na obrázku 1-30 vlevo lze vypočítat lineární závislost mezi maximálním přetlakem těsnění a velikostí vzduchové (olejové) mezery. Když je hřídel uložen excentricky, vzduchová mezera není zcela konformní. Z jedné strany hřídele

se vytvoří větší vzduchová mezera a z druhé menší. Excentricita tedy úzce souvisí s obrázkem 1-30 vlevo. Graf závislosti excentricity na maximálním přetlaku na obrázku 1-30 vpravo.

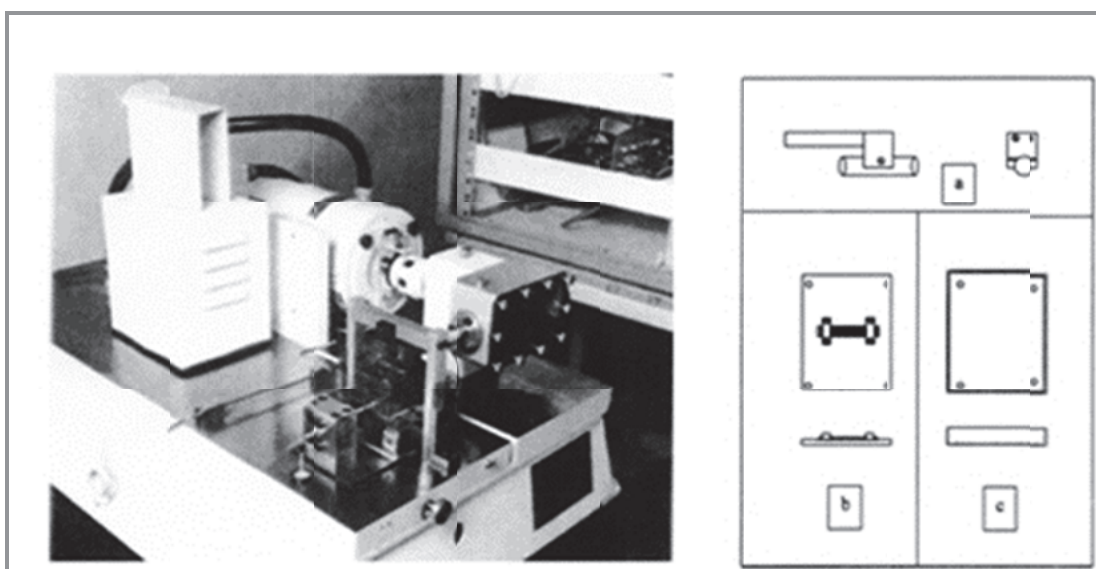


Obr. 1-30 Provozní parametry [7]

Gravitace má také vliv na kapacitu těsnění. Se zvětšujícím se průměrem hřídele začíná vliv gravitace narůstat [7].

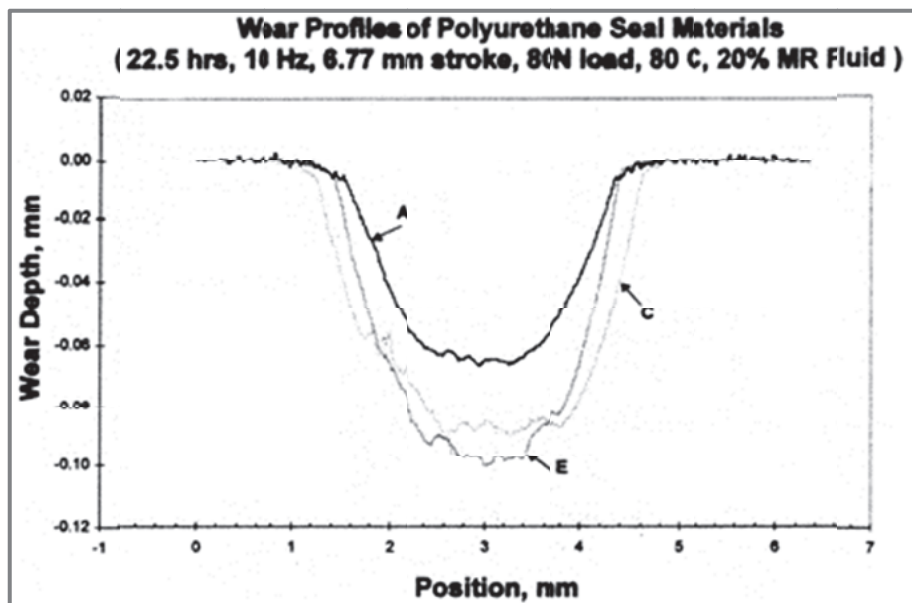
1.4.3 Opotřebení těsnění pracujících v MR kapalině [3]

Vardarajan a Alexandridis se ve svém článku [3] rozhodli popsat a porozumět odolnosti proti opotřebení těsnících materiálů pracujících v MR kapalině. Pro testování byly použity pokročilé těsnící materiály jako polyuretan či teflon. Nicméně částice železa způsobují závažné problémy při opotřebení těsnění. Pro testy byla navržena testovací aparatura vyobrazená na obrázku 1-31. Teoreticky v ideálním tlumiči je kontakt mezi pístní tyčí a břitem liniový. Nicméně prakticky je zde vlivem deformace kontaktní ploška. Dále vlivem vzpěru pístnice vzniká boční síla.



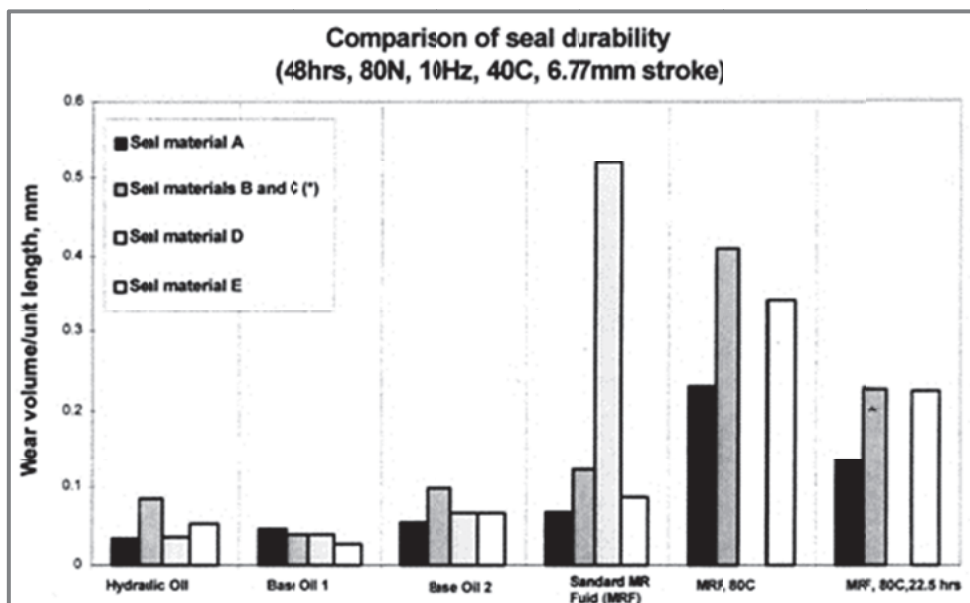
Obr. 1-31 Testovací stand [3]

Boční síla v testech volena 80N. Geometrické parametry písní tyče byly průměr tyče 12,7mm a délka 75mm. Tyč byla upnuta v zařízení Cameron Plint fiction tester. Jak již bylo uvedeno, tak byla boční síla nastavena na 80N s frekvencí 10 Hz a zdvihová amplituda 6,77mm. Těsnicí materiál byl ve formě ústřížků 10mm širokých a 30 mm dlouhých. Rozhraní bylo „mazáno“ MR kapalinou. Celkem bylo testováno 5 materiálů od dvou různých výrobců. Byly testovány čtyři části MR kapaliny, aby bylo zjištěno, které složky mají největší vliv na opotřebení. Opotřebení bylo měřeno pomocí mechanického profilometru. Na obrázku 1-32 je opotřebení měřené v příčném směru.



Obr. 1-32 Opotřebování polyuretanového těsnění v MR kapalině [3]

Na obrázku 1-33 je zhodnocení opotřebovaného objemu materiálu pro různé složky MR kapaliny.



Obr. 1-33 Výsledky práce [3]

Nejnižší odolnost proti opotřebení v MR kapalině vykazoval těsnicí materiál D. Ostatní materiály vykazovaly konstantní opotřebení. Bohužel autor neuvádí, o které materiály se přesně jednalo. Vzhledem k hodnotě opotřebení je vhodné se zamyslet na životnosti takového těsnění.

1.4.4 Magnetické těsnění na bázi MR kapaliny [12]

Jedná se o bezkontaktní těsnění vycházející z koncepce hydraulického protitlakového ventilu, kde MR kapalina je v pracovní mezeře. Tato kapalina zajišťuje vysokou těsnost, která je důležitá v korozivním či ekologicky nebezpečném prostředí. Další významné výhody jsou: možnost práce s vysokou excentricitou hřídele, absence opotřebování dílů a jednoduchá obnova těsnění. Maximální přetlak těsnění je složen ze složky plastické a magnetické.

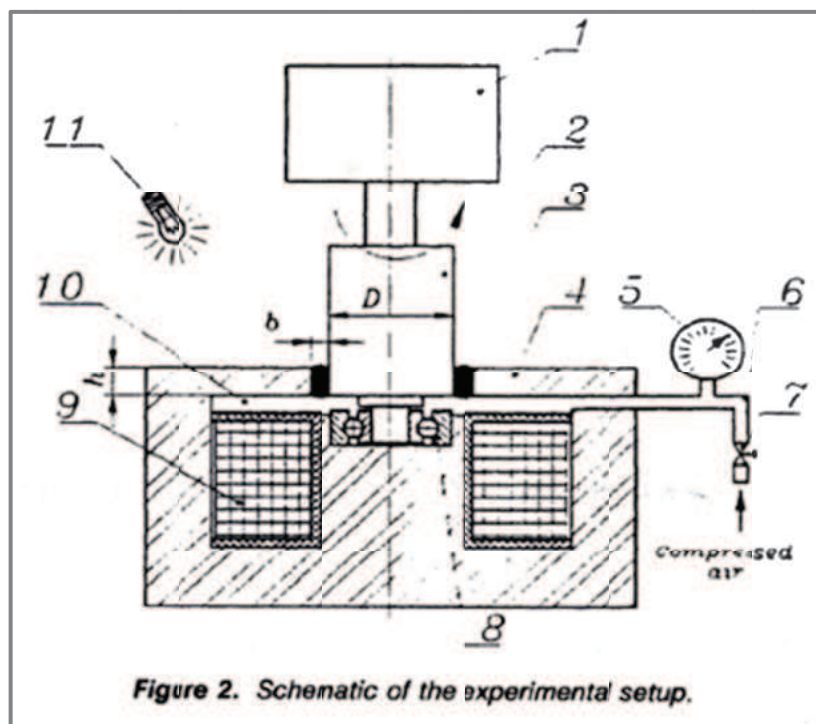
$$\Delta p = \Delta p_{pl} + \Delta p_{mag} \quad (1-2)$$

$$\Delta p_{mag} = \frac{M \cdot H \cdot h \cdot \mu_0}{b} \quad (1-3)$$

$$\Delta p_{pl} = \frac{2 \cdot h \cdot \tau}{b} \quad (1-4)$$

Vztah pro magnetickou část přetlaku je složen z magnetizace pracovní kapaliny M [A/m], intenzity magnetického pole H [A/m], permeability vakua a geometrických charakteristik těsnění. Plastická část obsahuje smykové napětí MR kapaliny τ [Pa], výšku olejové mezery b [mm] a šířky těsnicího břitu h [mm].

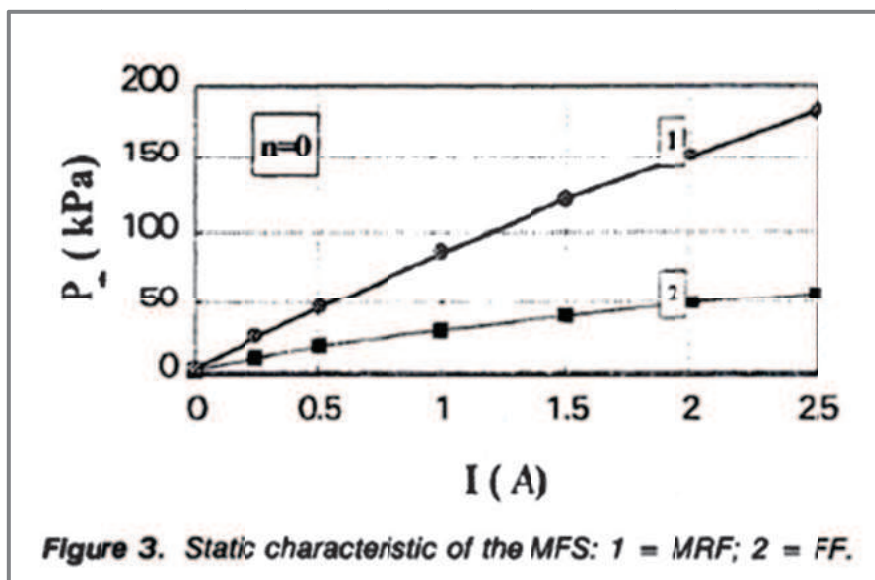
Pro testování jednotlivých závislostí byl zkonstruován testovací stand. Tento stand je vyobrazen na obrázku 1-34.



Obr. 1-34 Testovací stand [12], (9) cívka, (4) břity, (3) MR kapalina a (2) hřídel

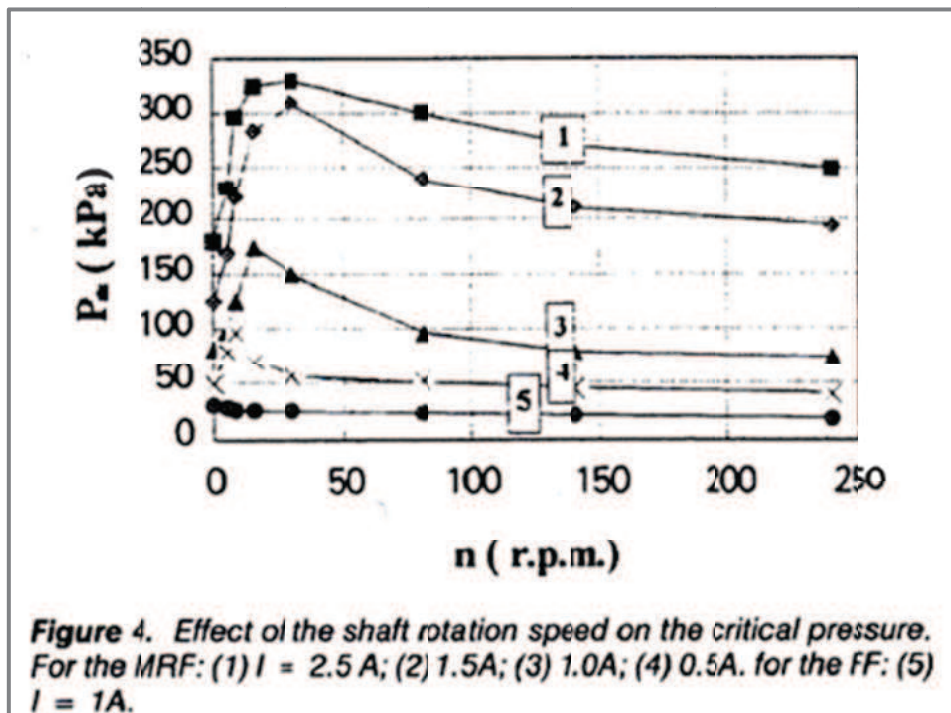
Hřídel v tomto standu byla o průměru 20mm. Magnetický obvod byl tvořen pracovní mezerou o šířce h a tloušťce b naplněnou MR kapalinou, hřídelem a pólovými nástavci. Testované parametry byly v rozsahu: $h = (1 - 10)$ mm, $b = (0,075 - 0,15)$ mm, $n = (0 - 240)$ 1/min a $I = (0,25 - 2,5)$ A.

Chování těsnění je silně závislé na použité kapalině. V statickém režimu je rozdíl maximálního přetlaku mezi Ferro kapalinou a MR kapalinou až trojnásobný.



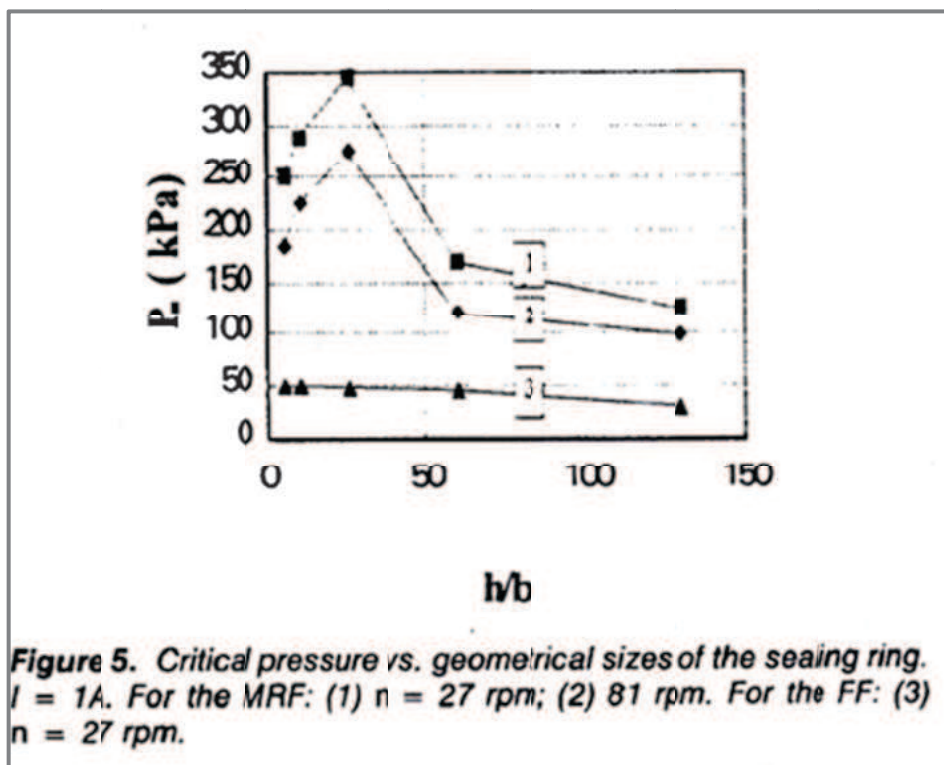
Obr. 1-35 Vliv proudu na přetlak těsnění [3]

Se zvyšujícími se otáčkami lze pozorovat nárůst maximálního přetlaku. Posléze dochází k postupnému poklesu.



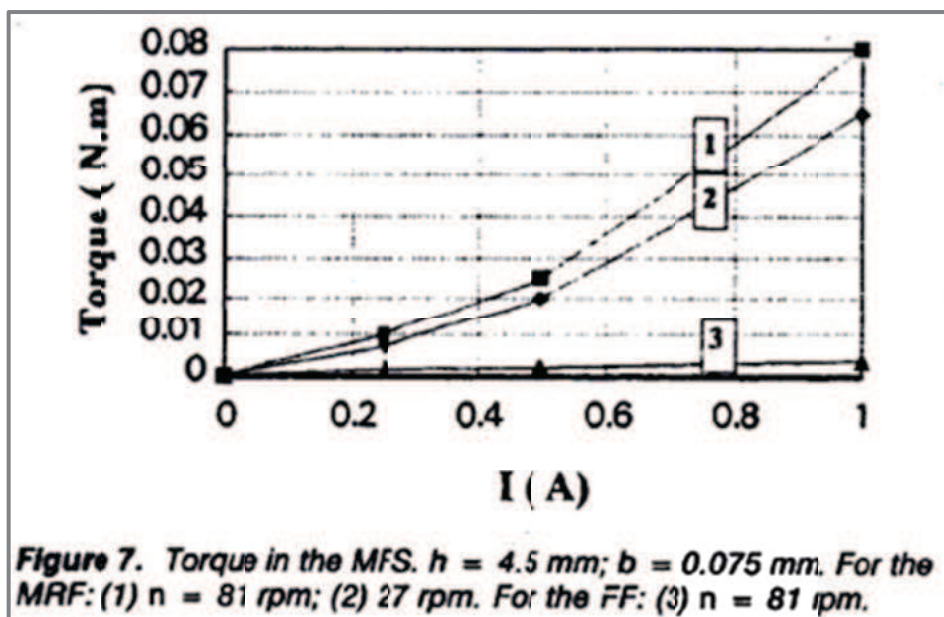
Obr. 1-36 Vliv otáček na přetlak těsnění [3]

Dalším parametrem ovlivňujícím maximální přetlak je geometrie těsnících břitů. Z grafu na obrázku 1-37 lze vypočítat, že nejvhodnější poměr h/b je v okolí čísla 30.



Obr. 1-37 Vliv geometrie břítu na přetlak těsnění [3]

Specifickým rysem MR kapalin v oblasti těsnění je zvýšení třecího momentu se zvyšující se magnetickou indukcí. Tento jev oproti Ferro kapalině je dost podstatný.



Obr. 1-38 Odebíraný kroučící moment [3]

1.5 Zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše

Studie zabývající se magnetickým hřídelovým těsněním lze rozdělit do dvou větví, na těsnění pomocí Ferro a MR kapaliny. Dle rešeršní části lze pro MR kapaliny vyvodit několik obecných závěrů:

- Maximální přetlak těsnění s MR kapalinou výrazně roste zhruba do otáček 30 min^{-1} [12]. Po překročení této hodnoty pozvolna klesá.
- Je zde výrazná zvilost geometrického poměru h/b (olejová mezera / šířka břitů) na maximálním přetlaku [12].
- MR kapalina vykazuje rapidní zvýšení třetího momentu se zvyšujícím proudovým zatížením cívky a zvyšující rychlosti otáčení hřídele.
- Přetlak těsnění je výrazně závislý na objemu MR kapaliny v těsnění. Nad poměr objemů $\frac{V}{V_n} = 5$ je zvýšení přetlaku zanedbatelné [8].
- Pro malé olejové mezery je podstatný počet břitů magnetických nádstavců. Pro olejové mezery nad 0,5 mm je počet břitů nepodstatný [8].
- Vliv excentricity rotujícího hřídele úzce souvisí se vlivem velikosti olejové mezery [7].
- Přetlak těsnění je složen z plastické a magnetické složky tlaku [12].
- Existuje lineární závislost mezi přetlakem těsnění a proudovým zatížením cívky při statických podmínkách [12].
- MR kapalina má výrazný abrazivní charakter. Problém s opotřebováním těsnících materiálů [3].

Pro Ferro kapaliny dle rešeršní části lze vyvodit tyto závěry:

- Vykazuje minimální zvýšení třetího momentu se zvýšeným proudovým zatížením cívky.
- Téměř zde neexistuje závislost na geometrickém poměru h/b [12].
- Pokles přetlaku s otáčkami je zanedbatelný.
- Maximální přetlak je několikanásobně menší než při použití MR kapaliny.

Typy konstrukcí magnetických obvodů jsou obdobné, jak při použití Ferro či MR kapaliny. Z rešeršní části diplomové práce lze vyvodit následující závěry pro konstrukci magnetického uzlu:

- Pokud se jedná o konstrukci obsahující magnet jako zdroj magnetického pole, potom konstrukce magnetických nádstavců je upravena. Je zde více břitů na jednom nádstavci. Je to především kvůli zvýšení magnetické indukce v magnetické kapalině [4].
- V průmyslových aplikacích je často používána olejová mezera 0,1 mm [8].
- Šířka těsnícího břitu se pohybuje od 0,6 mm [8] do 10 mm [12].

2. ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2

2.1

2.1 Motivace práce

Na Ústavu konstruování VUT v Brně probíhá výzkum v oblasti MR kapalin a její aplikace do MR tlumičů. Vardarajan a Alexandridis ve svém článku [3] poukázali na problém opotřebení těsnicího materiálu v MR kapalině. Toto opotřebení je velice intenzivní kvůli abrazivnímu charakteru MR kapaliny. Tento problém se výrazně dotýká i MR tlumičů, protože pístnice je obvykle utěsněna pomocí elastomerního těsnění. Tento jev by mohlo vyřešit úplné odstranění elastomerního těsnění a nahrazením těsněním s pomocí pracovní MR kapaliny. Právě tato myšlenka a nedostatečný popis provozních parametrů magnetické hřídelového těsnění inicioval tento výzkum.

2.2

2.2 Cíle práce

Hlavním cílem diplomové práce je konstrukční návrh testovacího standu pro testování těsnosti magnetického těsnění s uvedenými proměnnými parametry:

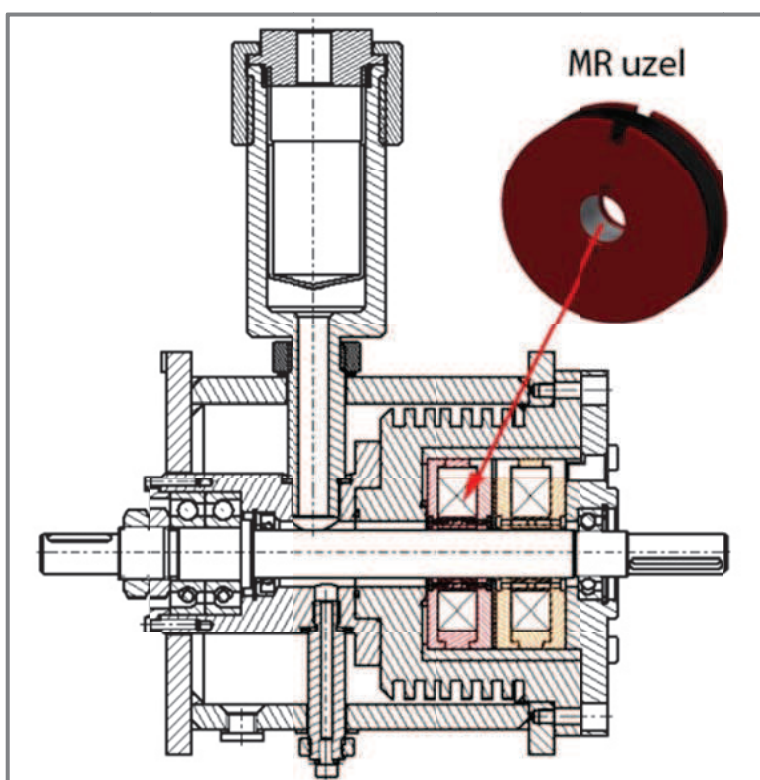
- otáčky,
- vůle mezi magnetickým kroužkem a hřídelí,
- teplota náplně,
- úroveň vibrací,
- montážní poloha,
- vnitřní přetlak.

Součástí návrhu standu bude návrh a realizace magnetického obvodu těsnění, jeho simulace pomocí MKP a experimentální ověření velikosti magnetické indukce napříč MR uzlem.

3. VARIANTY KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ

3.1 Koncepce konstrukce

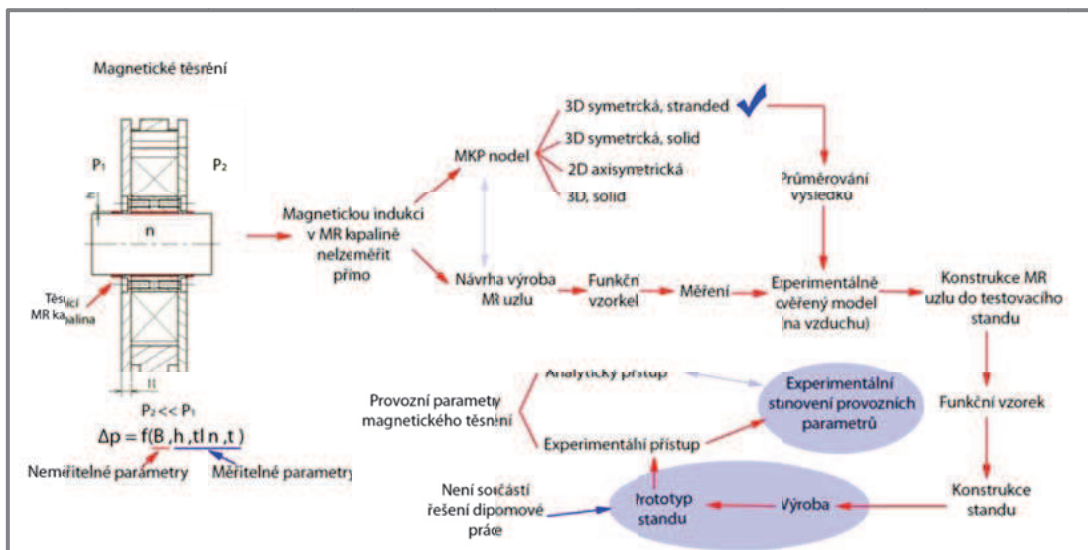
Testovací stand byl zkonstruován za účelem odměření provozních parametrů magnetického hřídelového těsnění. Na standu lze experimentálně ověřit vliv otáček, teploty náplně, vnitřního přetlaku, úrovně vibrací, pracovní polohy či vůle mezi magnetickým kroužkem na těsnost. Stěžejní část konstrukce standu je magnetoreologický (MR) uzel. Tento uzel je složen z cívky, pólových nádstavců a magnetické kapaliny. Konstrukce tohoto uzlu bude mít zásadní vliv na parametry testovaného těsnění. Z geometrie a konstrukce MR uzlu bude vycházet koncepce celého testovacího standu.



Obr. 3-1 Koncepce konstrukce standu (konečná verze)

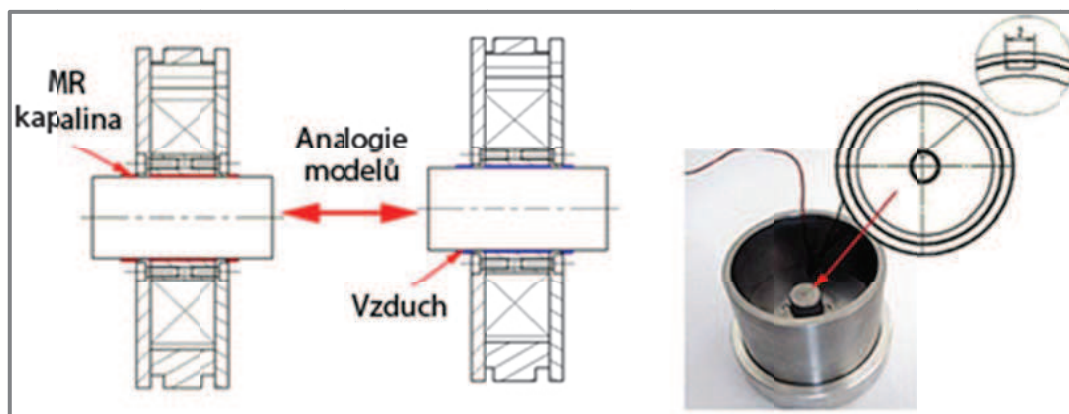
3.2 Metodický přístup

Na vyvinutém standu se budou v budoucnu provádět testy magnetického hřídelového těsnění. Byl požadavek, aby výsledky z těchto experimentů nebyly závislé na typu či parametrech magnetického obvodu. Z tohoto důvodu bylo nutné najít obecný parametr charakterizující magnetický obvod. Tento parametr je magnetický indukční tok ve vzduchové (olejové) mezeře. Z této veličiny lze vztažením na plochu vypočítat **magnetickou indukci**. Tímto parametrem můžeme obecně kvantifikovat působení magnetického obvodu na MR kapalinu.



Obr. 3-2 Metodický přístup

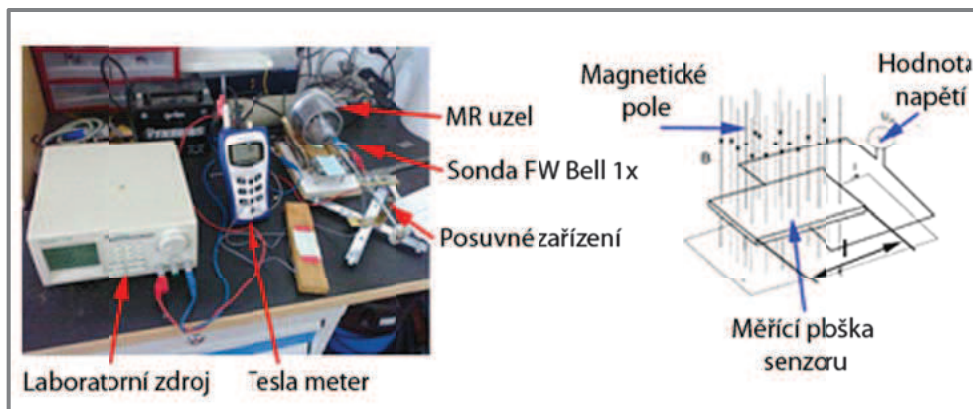
Problém tohoto zobecnění je, že magnetickou indukci nemůžeme měřit přímo v MR kapalině. Je to proto, že materiál sondy by zásadně ovlivnil výsledky měření. Se vzduchem v těsnící mezeře je to možné. Materiál sondy má obdobné magnetické charakteristiky jako vzduch. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k vytvoření modelu magnetického obvodu s MR kapalinou a stejného modelu se vzduchem. Rozdíl mezi modely je pouze v permeabilitě prostředí v těsnící mezeře jak je možno vidět na obrázku 3-3. Předpokládá se analogie modelů mezi MR kapalinou a vzduchem.



Obr. 3-3 Analogie modelů

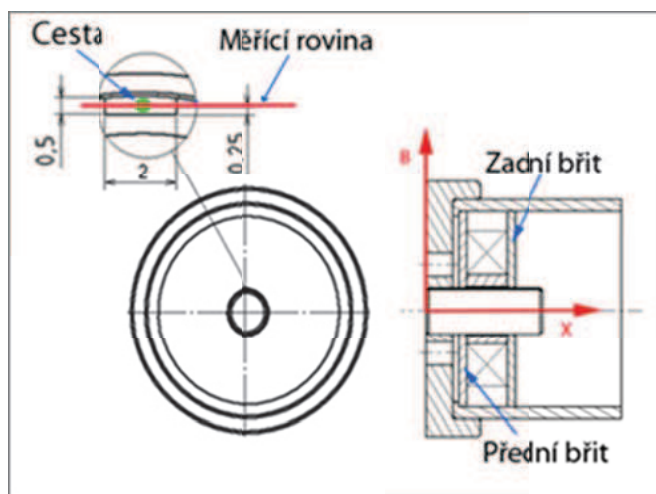
Modely byly vytvořeny pomocí metody konečných prvků v systému Ansys Workbench. Jelikož existuje více přístupů k řešení tohoto problému, bylo vytvořeno více typů MKP modelů. Vytvořené modely budou porovnány s experimenty, aby bylo možné zjistit, který model nejlépe popisuje rozložení a velikosti magnetické indukce z experimentů. K tomuto účelu byl zkonstruován testovací magnetický obvod a středící přípravek. Jedná se o koncepci MR uzlu, ale jak již bylo uvedeno výše, místo MR kapaliny je zde v těsnící mezeře vzduch. Tento uzel byl konstrukčně upraven drážkou v hřídeli pro měřicí senzor. Jedná se o funkční vzorek typu G č. 26050. Experimenty byly provedeny s pomocí Tesla metru Tectra 5180. Jednoduché schéma zapojení na obrázku 3-4 vlevo. K Tesla metru byla připojena měřicí sonda F W BELL 1x. Sonda byla připevněna k posuvnému zařízení, aby bylo možné měřit

s krokem 0,1 mm. Tato sonda pracuje na principu Hallova jevu. Jedná se o tenkou destičku polovodičového materiálu. Do této destičky vedou čtyři vodiče. Každý je připojen k jedné hraně destičky jak je vidět na obrázku 3-4 vpravo. Materiálem protéká konstantní proud přes dva vodiče. Na ostatních dvou vodičích je nulové napětí, pokud je nulové magnetické pole.



Obr. 3-4 Schéma měření a hallův jev

Jestliže indukční čáry procházejí materiálem, objeví se na vodičích Hallovo napětí. Tato jediná číselná hodnota popisuje počet i rozložení indukčních čar na ploše měřicí sondy. Proto se předpokládá, že měřicí sonda měří průměrnou hodnotu magnetické indukce při konstantním rozložení. Jelikož výsledky z MKP modelů jsou nezávislé na měřicí sondě, bylo vhodné přikročit k zprůměrování výsledků po délce měřicí sondy. Je to především proto, aby bylo možné modely kvantitativně porovnat s experimenty. Průměrováním se dosáhlo vyhlazení křivky a malého snížení maximální indukce. Dále měřicí sonda není dostatečně dlouhá na to, aby bylo možné provést měření na jednou. Z tohoto důvodu byly experimenty rozděleny na měření předního a zadního břitu (obr. 3-5 vpravo). Dále byl zaveden souřadný systém, který bude výchozí bod pro všechna naměřená či vypočtená data. Experimenty byly provedeny 3x a z těchto hodnot byl vytvořen aritmetický průměr magnetické indukce.



Obr. 3-5 Měřicí rovina a rozdělení měření

Pro porovnání jednotlivých měření s MKP bylo nutné zavést rovinu, ve které budou data srovnána, protože rozložení magnetické indukce po výšce drážky není zcela konstantní. Byla zvolena rovina ležící ve středu drážky pro senzor. Tuto rovinu lze nalézt na obrázku 3-5 vlevo. Posléze bylo provedeno srovnání měření a MKP modelů¹. Z této analýzy byl vybrán MKP model se vzduchem, který nejlépe popisuje měření. Z této skutečnosti lze předpokládat, že tento MKP model je experimentálně odladěn. Jelikož existuje analogie mezi modelem se vzduchem a model s MR kapalinou lze předpokládat, že byl **odladěný i model s MR kapalinou**. Z pomoci tohoto odladěného modelu byl navrhnout MR uzel pro testovací stand. Následně pomocí analyticko-syntetické metody byla provedena konstrukce testovacího standu, který vychází z konstrukce navrhnutého MR uzlu.

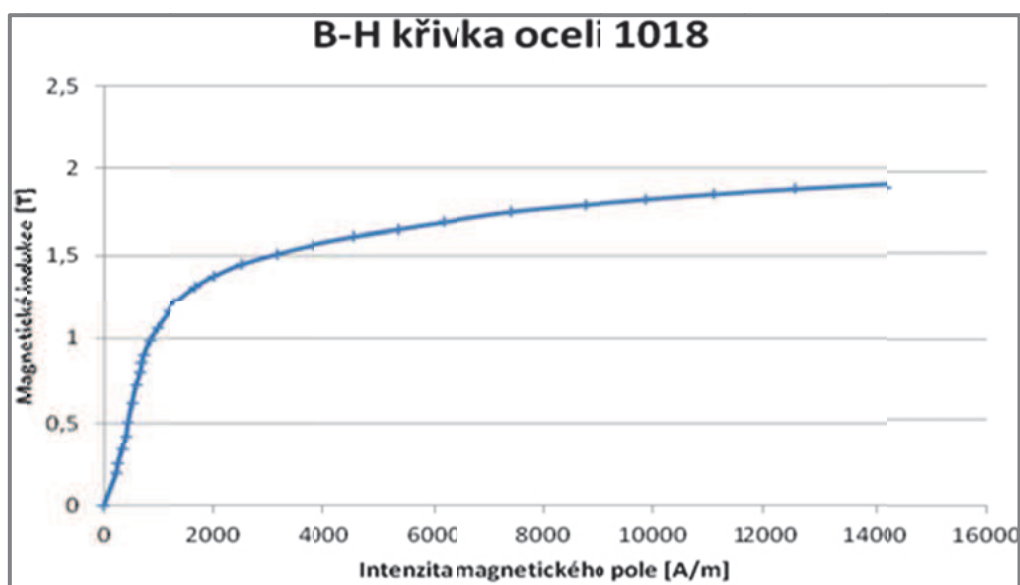
3.3 Experimentální odladění MKP modelu

3.3

3.3.1 Geometrie, materiálové charakteristiky, síť a řešič

3.3.1

Pro magnetické nádstavce byl zvolen nelineární (nelineární magnetizace) model materiálu oceli, který je popsán B-H křivkou zobrazenou na obrázku níže. Jedná se o ocel 1018, která se svými materiálovými charakteristikami blíží, dle ČSN normy, oceli 11 523².

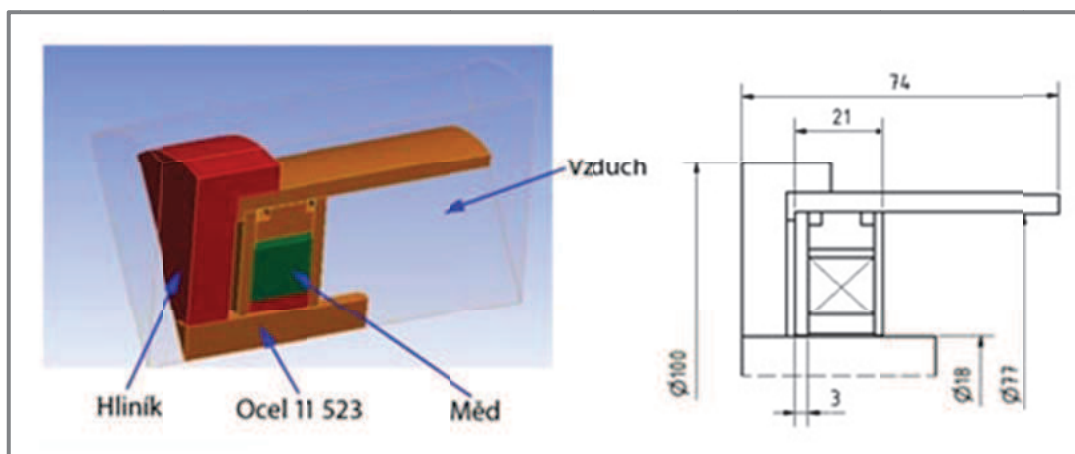


Obr. 3-6 B-H křivka oceli 11 523

Ocel 11 523 byla použita na výrobu magnetického obvodu. Na obrázku 3-7 je zobrazena oranžovou barvou. Dále byla použita hliníková slitina s relativní permeabilitou rovnou 1. Cívka byla navinuta z měděného drátu. Celý model byl obklopen okolím prostředím, kterým je v tomto případě vzduch s relativní permeabilitou 1.

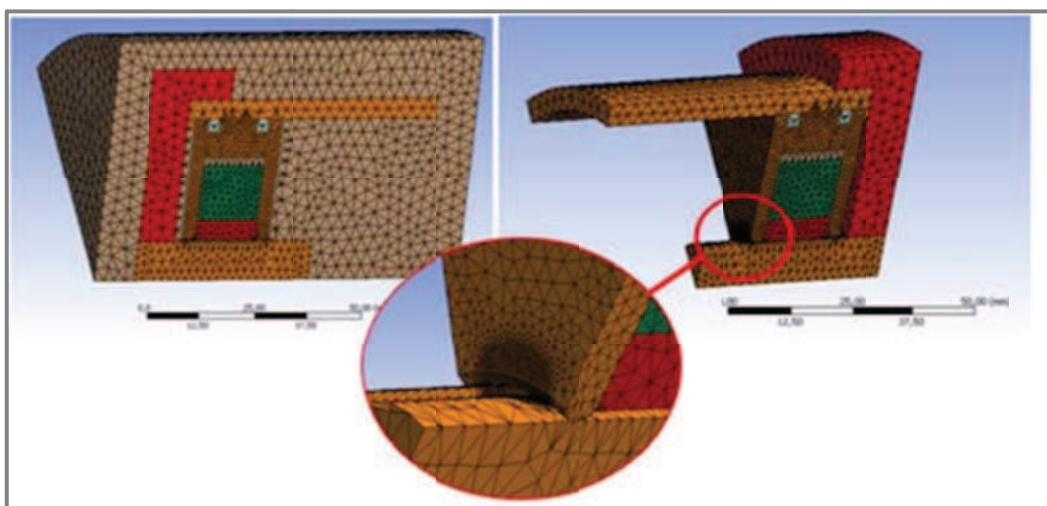
¹ Pro získání velikostí a rozložení magnetické indukce v MKP bylo použito tzv. path.

² Odůvodnění volby této oceli v kapitole 4.4.1.



Obr. 3-7 Geometrie a materiálové charakteristiky

Na diskretizaci bylo použito 907 164 uzlových bodů a 673 883 prvků tvaru čtyřstěnu. Použit byl prvek SOLID117. Jedná se o 20 uzlový prvek. Magnetický obvod diskretizován prvky o velikosti 1 mm a geometrie hřídele 1,2 mm. Na ostatní části přípravku byla použita velikost prvku 3 mm.



Obr. 3-8 MKP síť

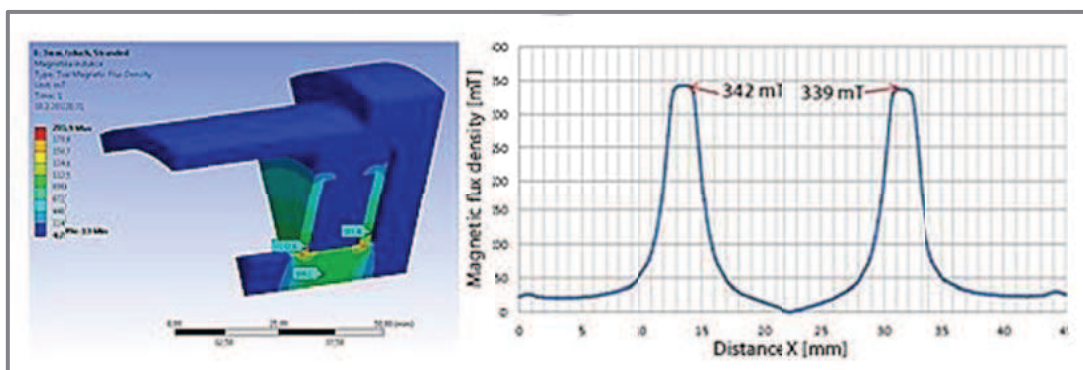
V místě drážky pro senzor byla zjemněná síť v kouli s poloměrem 3mm. Prvky v zjemnění měly velikost 0,25 mm. Ilustrace na obrázku 3-8. K zhodnocení kvality vytvořené sítě bylo použito metody Aspect ratio a Skewness. Aspect ratio je poměr nejdelší k nejkratší straně prvku. Nej kvalitnější síť je s poměrem 1, ale do poměru 10 je síť zcela vyhovující [27]. Ve vygenerované síti je průměrný poměr **2,73**. Tedy vyhovující. Skewness je číslo v rozsahu od 0 do 1 vyjadřující, jak moc se prvky liší od ideálních. Ve vygenerované síti je průměrná hodnota **0,28**. Dle [27] mezi hodnotami 0,25 a 0,5 je síť ucházející.

K řešení magnetostatické úlohy byl použit přímý (direct) řešitel. Tento řešitel kombinuje rychlost a robustnost. Pomocí Newton-Raphsonovi³ metody byla numericky řešena vytvořená soustava rovnic.

³ Tato metoda je známá také pod názvem Metoda tečen či Newtonova metoda.

3.3.2 MKP vypočet conductor type stranded se vzduchovou mezerou

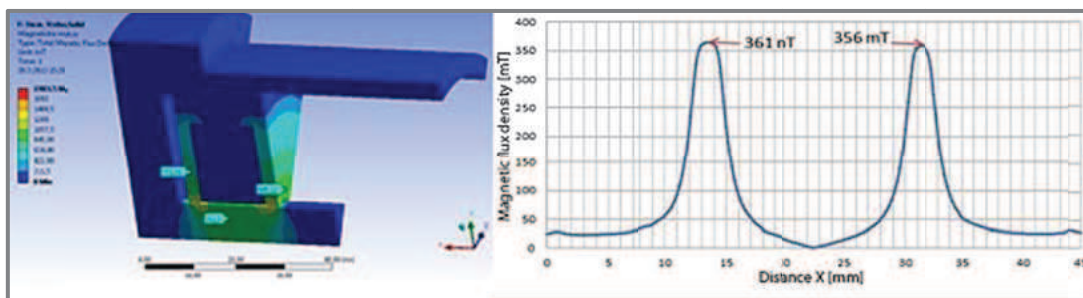
Úloha byla řešena, jako 3D rotačně symetrická. Zatížení aplikované na model bylo pomocí prvku conductor type stranded. Do parametru source conductor byl zadán počet závitů cívky, který je **118**. Posléze byl zadán proud **3,36A**. Dále bylo nutné zadat parametr conducting area. Abychom se co nejvíce přiblížili skutečné cívce, tento parametr byl určen z indukčnosti cívky. Popis určení parametru conducting area lze nalézt v příloze II. Conducting area byla určena na **224 mm²**. Rozložení a velikost magnetické indukce v celém modelu při proudu 3,36A na obrázku 3-9. Na obrázku 3-9 v grafu vpravo je možno vidět rozložení a velikost magnetické indukce v měřící rovině pomocí path.



Obr. 3-9 Výsledky z MKP typu stranded

3.3.3. MKP vypočet conductor type solid se vzduchovou mezerou

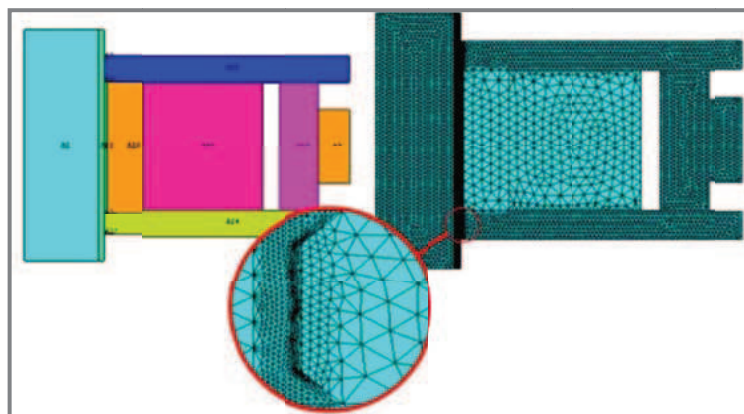
Konečnoprvková úloha byla řešena s pomocí 3D rotační symetrie. Na jednu stranu rotační symetrie cívky nastavena nulová hladina potenciálu a na druhou aplikován zatěžující proud 3,36 A. Parametry cívky stejné jak v předchozí kapitole. Rozložení a velikosti magnetické indukce pro MKP model conductor type solid vyobrazeny na obrázku 3-10.



Obr. 3-10 Výsledky z MKP typu solid

3.3.4 MKP vypočet 2D úlohy s axisymetrií se vzduchovou mezerou

Tento model byl vytvořen pomocí APDL skriptu v systému Ansys. APDL kód lze nalézt v příloze IV. V tomto případě je síť rozdílná oproti výše uvedeným modelům. Na diskretizaci bylo použito 8759 uzlových bodů a 16 998 prvků tvaru trojúhelníku. Byl použit rovinný prvek PLANE13. Jedná se o 4 uzlový prvek.

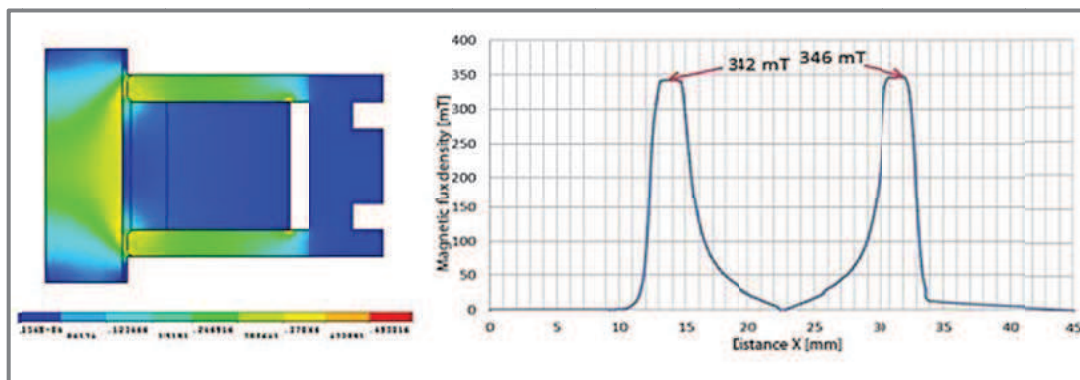


Obr. 3-11 Sít' MKP 2D úlohy

Zatížení modelu bylo uskutečněno přes proudovou hustotu. Hodnota proudové hustoty byla vypočtena ze zatěžujícího proudu $I = 3,36 \text{ A}$, počtu závitů cívky $N = 118$ a conducting area $S = 224 \text{ mm}^2$ dle vztahu:

$$J = \frac{N \cdot I}{S} = \frac{118 \cdot 3,36}{224} = 1770 \frac{\text{mA}}{\text{mm}^2} \quad (3-5)$$

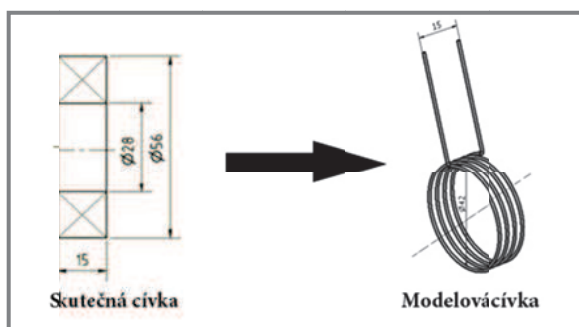
Rozložení a velikost magnetické indukce vyobrazeny na obrázku 3-12.



Obr. 3-12 Výsledky z MKP typu 2D

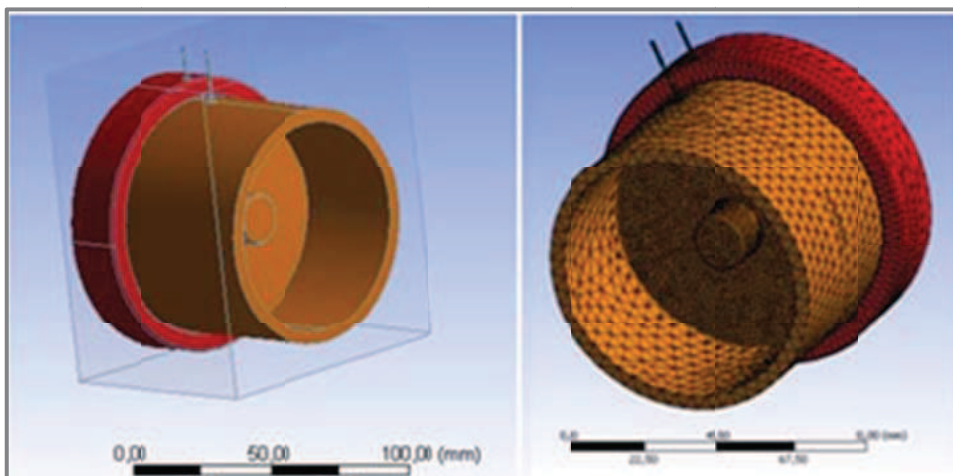
3.3.5 MKP 3D vypočet se vzduchovou mezerou

Tento model byl vytvořen s plnou 3D geometrii. Skutečná geometrie cívky nahrazena modelovou cívku. Modelová cívka má 5 závitů a je vymodelována na střední průměr skutečné cívky.



Obr. 3-13 Modelová cívka

Jelikož byla použita plná geometrie, bylo přistoupeno k vytvoření nové sítě. Na diskretizaci bylo použito 986 000 uzlových bodů a 732 000 prvků tvaru čtyřstěnu. Použit prvek SOLID117.



Obr. 3-14 Geometrie a síť

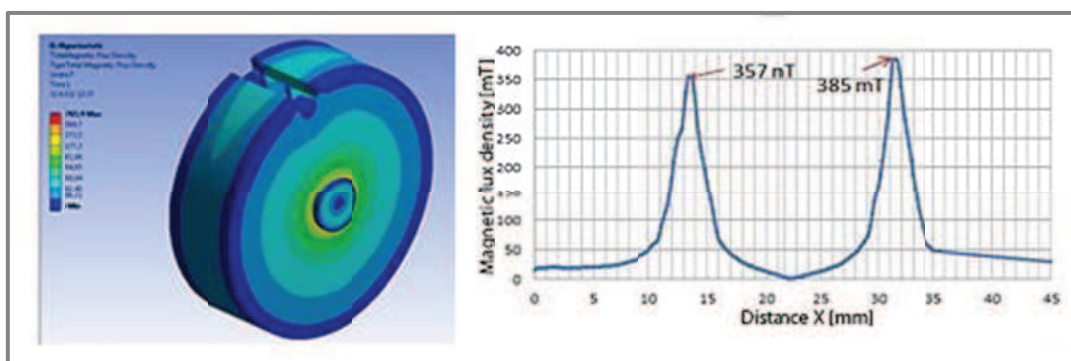
Jelikož v konečnoprvkovém programu byla použita modelová cívka místo skutečné, bylo nutné zajistit jejich zaměnitelnost. Zaměnitelnost byla uskutečněna přes vztah uvedený níže.

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (3-6)$$

Skutečná cívka má $N_2 = 118$ závitů a bylo použito $I_1 = 3,36$ A. Virtuální cívka má $N_1 = 5$ závitů. Dle vztahu 3-6 dopočítán proud, který musí být aplikován na modelovou cívku, aby byla zachována ekvivalence.

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} = 3,36 \cdot \frac{118}{5} = 79 \text{ A} \quad (3-7)$$

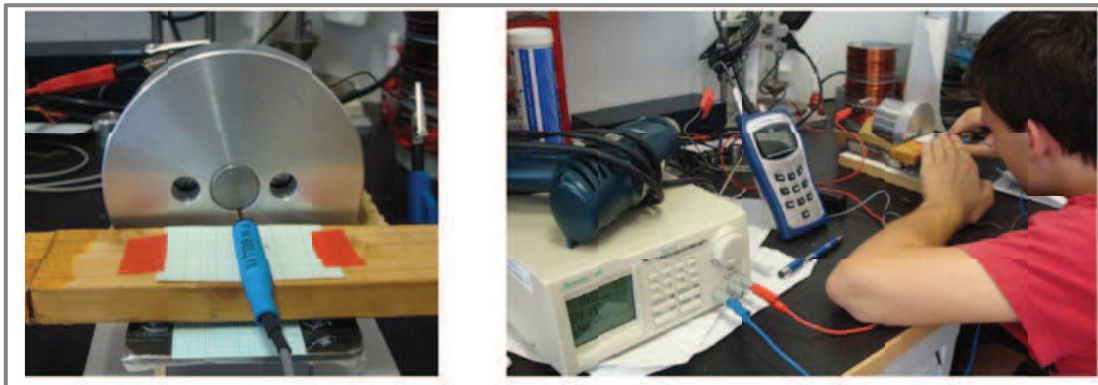
Rozložení a maximální hodnotu z 3D modelu MKP magnetostatické analýzy lze nalézt na obrázku 3-15.



Obr. 3-15 Výsledky z MKP typu 3D

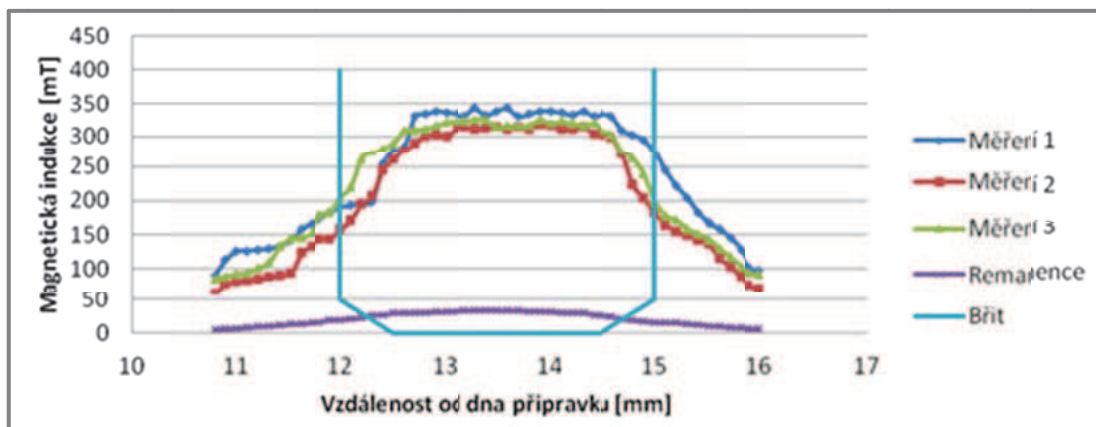
3.3.6 Experimenty na funkčním vzorku

Měření magnetické indukce bylo provedeno na funkčním vzorku G č. 26050. Jedná se o navrhnutý testovací magnetický obvod. Postup měření lze nalézt v kapitole metodický přístup.

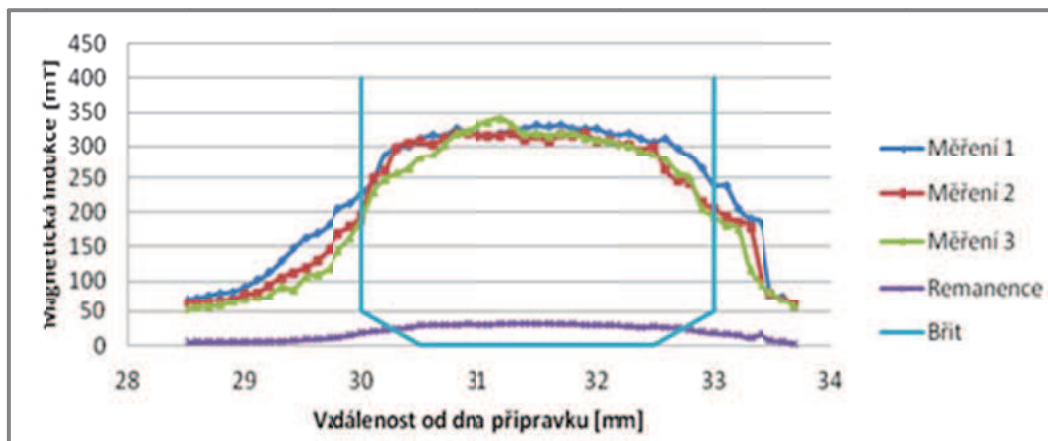


Obr. 3-16 Ukázka z měření magnetické indukce

Na cívku testovaného MR uzlu byl přiveden z laboratorního zdroje proud **3,36 A**, který vytváří magnetický tok v obvodu. Tento proud přes odpor vinutí cívky vytvořil elektrické napětí 1,68 V a ohmický výkon 5,8 W. Jak již bylo uvedeno v metodickém přístupu, nelze provést měření najednou. Z tohoto důvodu jsou výsledky rozděleny na přední a zadní břit. Výsledky z měření na obrázcích 3-17 a 3-18. Každý břit byl měřen 3-krát. Poté bylo provedeno zprůměrování těchto tří hodnot magnetické indukce. Výsledky z průměrování na obrázcích 3-19 a 3-20.



Obr. 3-17 Naměřená data přední břit 3,36 A



Obr. 3-18 Naměřená data zadní břit 3,36 A

3.3.7 Výběr nejvhodnějšího MKP modelu

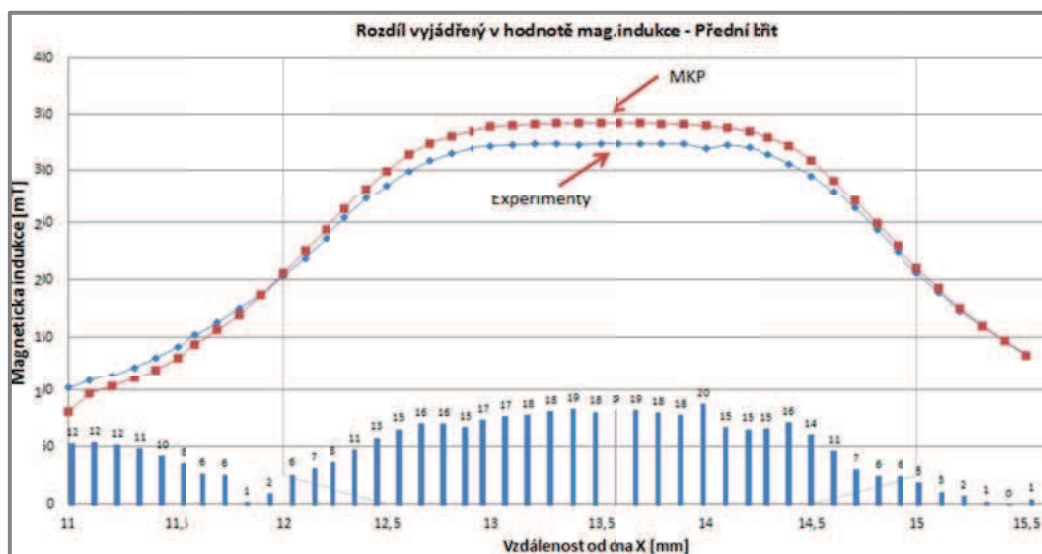
3.3.7

Tabulka níže srovnává jednotlivé MKP modely dle počtu prvků, času řešení a maximální magnetické indukce.

Tab. 7 Porovnání hodnot MKP a měření

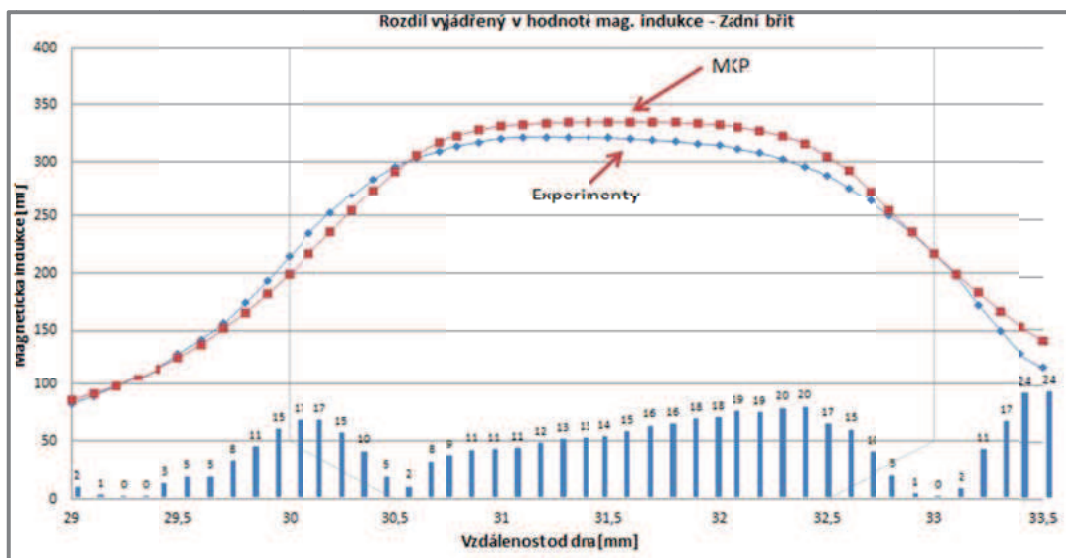
	Stranded	Solid	2D	3D	Experiment
Počet prvků	673 883	673 883	16 998	732 000	/
Čas řešení	20 min	21 min	15 sec	35 min	/
Max. indukce	342 mT	361 mT	346 mT	385 mT	328 mT

Dle tabulky 7 byl vybrán MKP model Stranded, protože se nejvíce blíží k experimentům v hodnotě maximální magnetické indukce. Tento model bude dále používán pro MKP výpočty při návrhu MR uzlu do testovacího standu. Nicméně 2D model se k měření také velice přibližuje. Pro rychlý náhled do problému či zjištění parametrů, které nejvíce ovlivňují řešení, je lepší použít 2D model. Je to především kvůli úspoře času řešení MKP úlohy.



Obr. 3-19 Rozdíl MKP a experimenty přední břit

Z obrázku 3-19 si lze povšimnout, že hodnoty magnetické indukce vypočtené pomocí MKP mají vyšší maximální indukci oproti hodnotám z měření. Průměrný rozdíl po délce břitu pro přední břit je **14 mT**. Tato hodnota odpovídá průměrné chybě **4,1%**. Detail obrázků 3-19 a 3-20 v příloze VII.



Obr. 3-20 Rozdíl MKP a experimenty zadní břit

Pro zadní břit je situace obdobná. Průměrný rozdíl mezi měřením a MKP je **13 mT**. Tato hodnota magnetické indukce odpovídá průměrné chybě modelu **3,9%**.

3.4 Varianty konstrukce MR uzlu

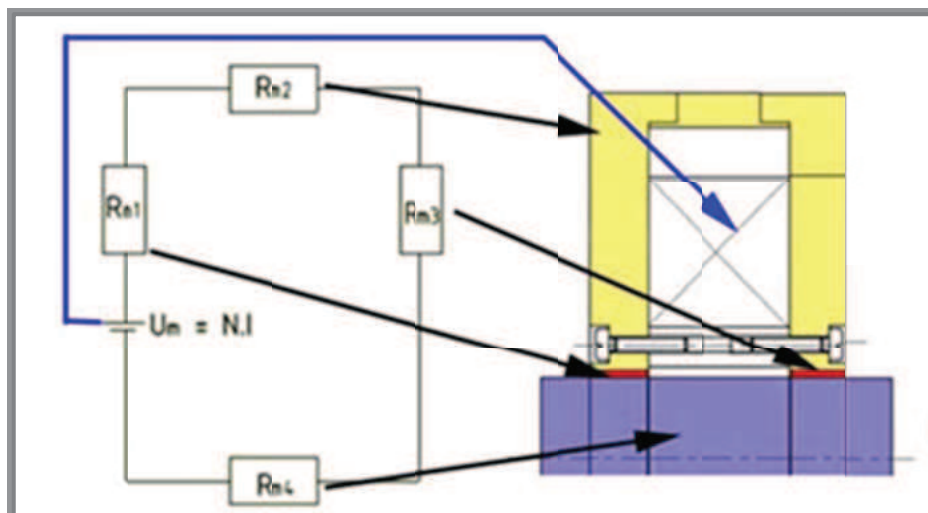
3.4.1 Parametry ovlivňující konstrukci MR uzlu

Konstrukce testovacího standu je úzce spjata s konstrukcí magnetického obvodu (MR uzlu). Vhodně navržený magnetický obvod zásadně ovlivní účinnost celého standu. Celý obvod bude řešen pomocí metody konečných prvků. Bohužel tato metoda je časově náročná a nedá představu o jednotlivých závislostech v modelu. I z tohoto důvodu bylo přistoupeno k analytickému modelu. Tento model je relativně nepřesný, ale dá představu o tom, které faktory jsou kritické při konstrukci. Nejdůležitější parametr pro testovací stand je velikost magnetické indukce v olejové mezeře. Dle vzorce 4-8 lze vypočítat, že tato veličina závisí přímo úměrně na magnetomotorickém napětí $N \cdot I$ a nepřímo úměrně na reluktanci⁴ R_m a ploše obvodu S .

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{N \cdot I}{S \cdot R_m} \quad (4-8)$$

Abychom dosáhli co největší magnetické indukce při stejném magnetomotorickém napětí, musíme buď snížit reluktanci či snížit plochu.

⁴ Reluktance = magnetický odpor [H^{-1}]



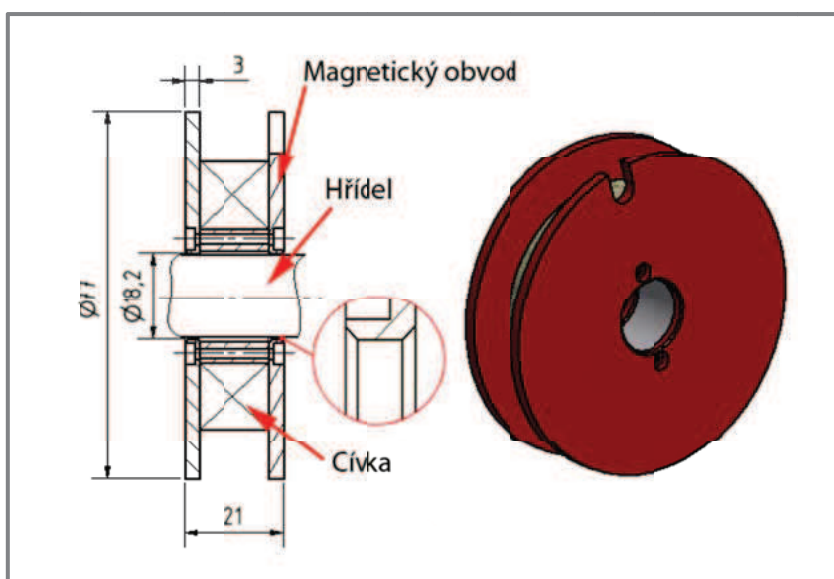
Obr. 3-21 Parametry ovlivňující konstrukci MR uzlu

Reluktance je nepřímo úměrná permeabilitě [29]. Tento fakt nám ovlivní volbu materiálu pro magnetický obvod. Čím vyšší permeabilita, tím vyšší magnetická indukce a nižší magnetický odpor. Proto byl požadavek na materiál s co nejvyšší permeabilitou. Nejvíce vyhovující se ukázala nízkouhlíková ocel. Dle dostupnosti na trhu byla vybrána nízkouhlíková ocel **11 523**.

3.4.2 První varianta konstrukce

3.4.2

Jak již bylo uvedeno MR uzel je složen z magnetického obvodu, hřídele, magnetické kapaliny a cívky. První varianta konstrukce byla navržena na utěsnění hřídele o průměru 18 mm. Magnetický obvod byl navrhnut se šířkou těsnícího břítu 3 mm. Zdrojem magnetického pole byla cívka se 118 závitů, která byla navinutá z měděného drátu o průměru drátu 1,2 mm. Bylo přistoupeno k výrobě této varianty MR uzlu. Jedná se o funkční vzorek G č. 26050. Při montáži této konstrukce se vyskytl problém. Magnetické nástavce při lisování do trubky pružily. Mohlo by dojít k destrukci celého uzlu.

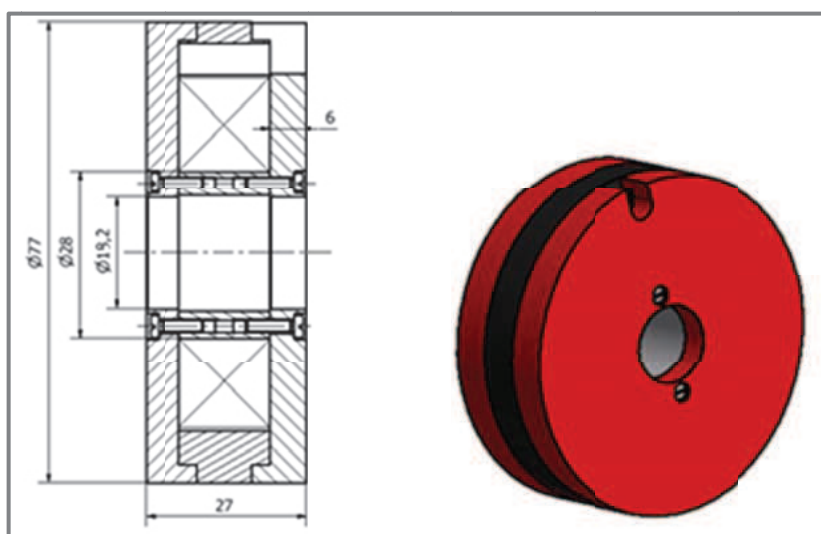


Obr. 3-22 První varianta konstrukce MR uzlu

Z magnetického hlediska tento uzel má nevýhodu v sražení břitů. V tomto místě dojde k nasycení ocelových částí, což zvýší magnetický odpor. Tento typ konstrukce je spíše vhodný při použití permanentních magnetů jako zdroje magnetického pole.

3.4.3 Druhá varianta konstrukce

Druhá varianta konstrukce oproti variantě první byla upravena v geometrie a konstrukci magnetického obvodu. Změna spočívala ve zvýšení tloušťky břity na 6 mm a v doplnění zpevňujícího prvku. Tento uzel byl navrhnut pro hřídel $\varnothing 19$ mm. Tato koncepce zlepší montáž a demontáž celého MR uzlu ze zařízení. Celý uzel byl vyroben a testován. Jedná se funkční vzorek G č. 26650.



Obr. 3-23 Druhá varianta MR uzlu

3.4.4 Výběr optimální varianty

Tabulka níže ukazuje výhody a nevýhody jednotlivých konstrukčních variant MR uzlu.

Název	Výhody	Nevýhody	Výběr řešení
První varianta	Menší zástavbový prostor	- Problém s montáží - Nasycení mag. nádstavců vlivem sražení břitu - Nížší výsledný přetlak těsnění - Vyšší magnetický odpor než varianta druhá	
Druhá varianta	- Snadná montáž - Rovnoměrné rozložení mag. indukce oproti první verzi	Nasycení hřídele mag. indukcí	

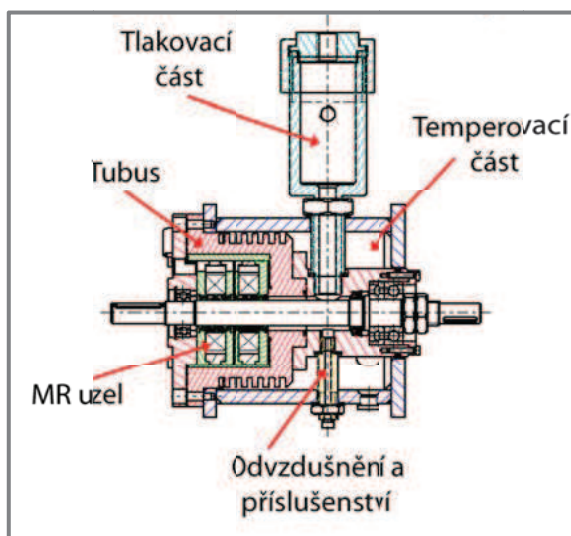
3.5 Konstrukční varianty testovacího standu

3.5

3.5.1 Požadavky na konstrukci

3.5.1

Hlavním požadavkem na konstrukci standu je odměření provozních parametrů magnetického těsnění. Stand umožní experimentálně ověřit vliv otáček, teploty náplně, vnitřního přetlaku, úrovně vibrací, pracovní polohy či vůle mezi magnetickým kroužkem a hřídelí či jejich kombinace. Dalším požadavkem je snadná montáž a demontáž zařízení. Dále je důležité snadné čištění prostoru s MR kapalinou. Ke konstrukci budou připojeny senzory pro snímání měřených veličin. Jedná se o připojení senzoru tlaku, teploty a otáček. V neposlední řadě je důležité odvzdušnění prostoru s MR kapalinou.



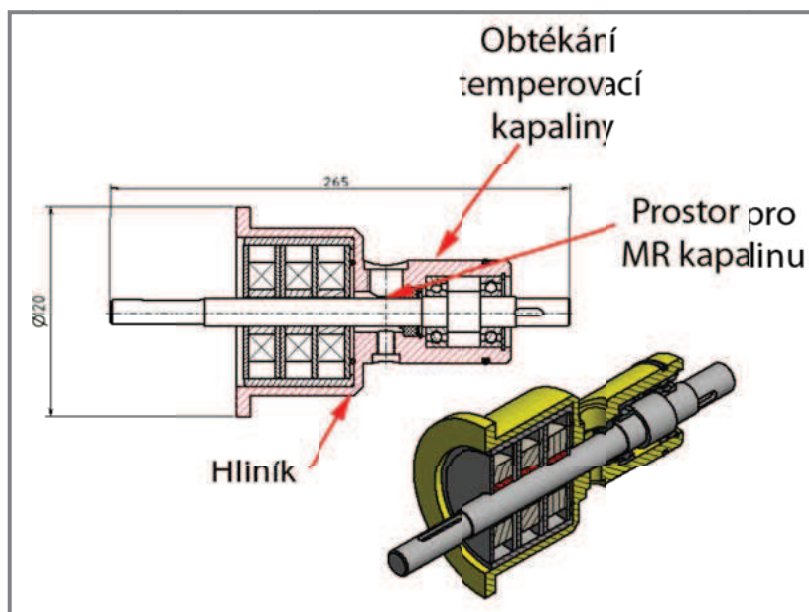
Obr. 3-24 Konstrukční celky (finální varianta)

Konstrukce bude přizpůsobena pro připojení všech přídatných zařízení jako přívod temperovací kapaliny či vzduchu. Celou konstrukci lze rozdělit na jednotlivé konstrukční celky, jak je možné vidět na obrázku 3-24.

3.5.2 Varianty konstrukce tubusu

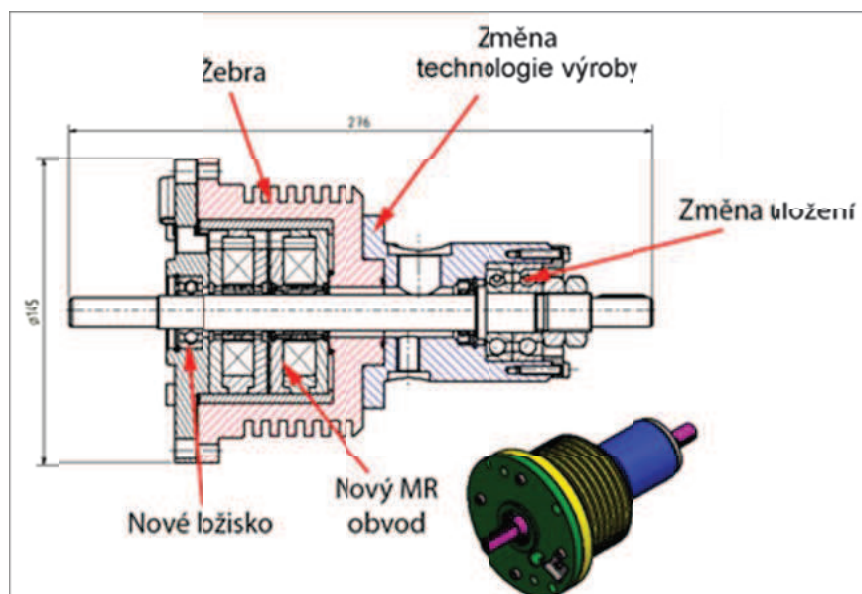
3.5.2

Tubus je část konstrukce, která je nosným prvkem pro magnetický obvod (MR uzel) a uložení hřídele. Dále tubus obsahuje komoru pro tlakování MR kapaliny. Tato část konstrukce umožňuje také připojení tlakovacího zařízení MR kapaliny, odvzdušnění a senzoru teploty. První varianta konstrukce je zobrazena na obrázku 3-25.



Obr. 3-25 Tubus varianta 1

Tento typ konstrukce má několik problémů. Pro lepší přestup tepla mezi konstrukcí a temperovací kapalinou byly vytvořena žebra na vnější části konstrukce. Další problém je s technologií výroby. Výroba hliníkového tubusu z jednoho kusu je neekonomická. Při obrábění by bylo velké množství odpadu. Z tohoto důvodu je lépe hliníkovou část tubusu rozdělit na dva díly. Další výhodou rozdělení je snadnější demontáž uložení hřídele a čištění pracovní části. Uložení hřídele ve variantě jedna s kuličkovými ložisky je zbytečně dlouhé. Tímto způsobem se prodlužuje celé testovací zařízení a tedy i cena. Uložení bude nahrazeno uložením s kuličkovými ložisky s kosoúhlým stykem do O. Tento způsob uložení hřídele umožňuje měnit tuhost a obvodové házení hřídele [2]. V neposlední řadě došlo k změně uložení hřídele v magnetické části. Do této části přibylo ložisko.



Obr. 3-26 Tubus varianta 2

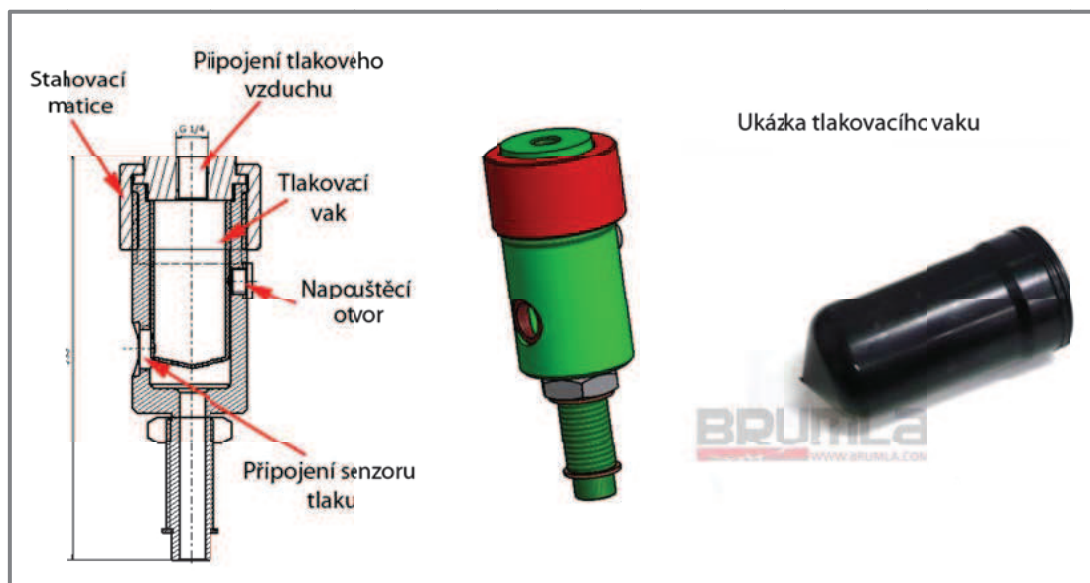
Tabulka níže shrnuje nejdůležitější výhody a nevýhody konstrukčních variant tubusu.

Název	Výhody	Nevýhody	Výběr řešení
První Varianta	- Jednoduchá konstrukce - Nižší hmotnost	- Problém s demontáží MR uzlu a ložisek hřídele - Problém s tuhostí uložení hřídele	✗
Druhá Varianta	- Lepší přestup a prostup tepla stěnami k MR kapalině oproti variantě první - Nastavitelná tuhost uložení hřídele - Snadnější demontáž	- Více přesně obrobených ploch - Výroba dvou dílů - Více normalizovaných komponent než varianta první	➡

3.5.3 Varianty konstrukce tlakovací části konstrukce

3.5.3

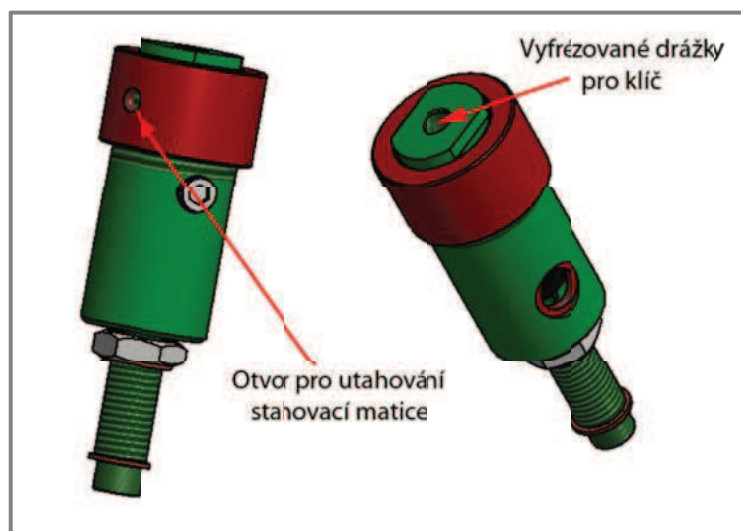
Tlakovací část konstrukce je částí standu, kterou bude možné nastavit požadovaný tlak v MR kapalině. Tento tlak bude kontrolován pomocí senzor tlaku kapaliny, který bude připojen ve spodní části konstrukce. Jelikož tlak v uzavřené nádobě s kapalinou je všude stejný, bude naměřený tlak stejný, jak v místě magnetického těsnění.



Obr. 3-27 Varianta 1 konstrukce tlakování

Konstrukce zařízení je složena z tlakovacího polymerního vaku, nosné konstrukce, stahovací matice a dílu pro připojení tlakového vzduchu. Přes polymerní vak se bude přenášet tlak vzduchu do MR kapaliny. Ukázka vaku na obrázku 3-27 vpravo. Problémem této konstrukce je fakt, že stahovací matice bude obtížné rukou stáhnout tak, aby nedocházelo k průsakům MR kapaliny. Z tohoto důvodu byl v druhé variantě konstrukce v stahovací matici vytvořen otvor se závitem. Do tohoto otvoru se při montáži našroubuje dlouhý šroub a přes páku se vyvodí potřebný utahovací

moment. Posléze se pomocí menšího šroubu ve vytvořeném závitu zajistí stahovací matice proti uvolnění.



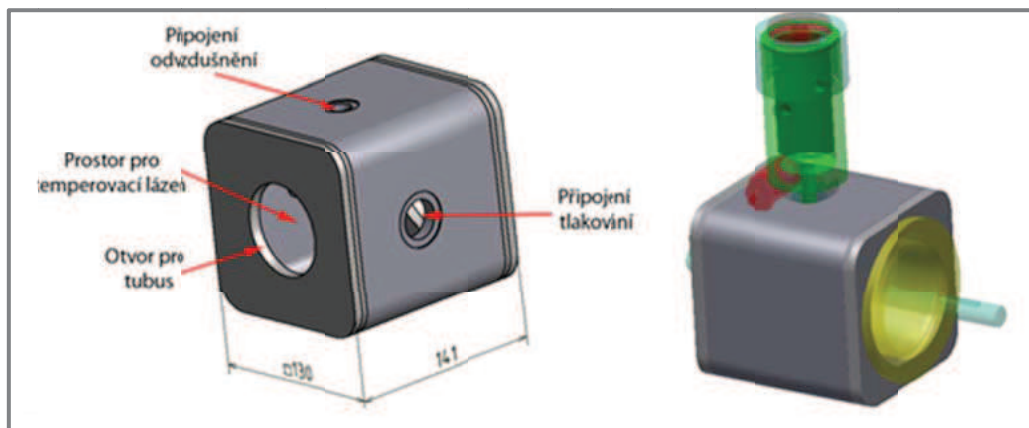
Obr. 3-28 Varianta 2 tlakovací části konstrukce

Tlakový vzduch bude připojen přes závit G $\frac{1}{4}$ v horní části tlakovacího zařízení. Aby nedošlo při připojování tlakového vzduchu k destrukci vaku, bylo vhodné vytvořit na tomto díle drážky pro klíč, jak je možné vidět na obrázku 3-28 vpravo.

Název	Výhody	Nevýhody	Výběr řešení
První Varianta	• Levnější a jednodušší výroba	• Obtížná montáž • Složité zajištění těsnosti v prostoru připojení vaku	✗
Druhá Varianta	• Jednodušší montáž oproti variantě první • Zabránění destrukce vaku při připojení tlakového vzduchu	• Složitější výroba	➡

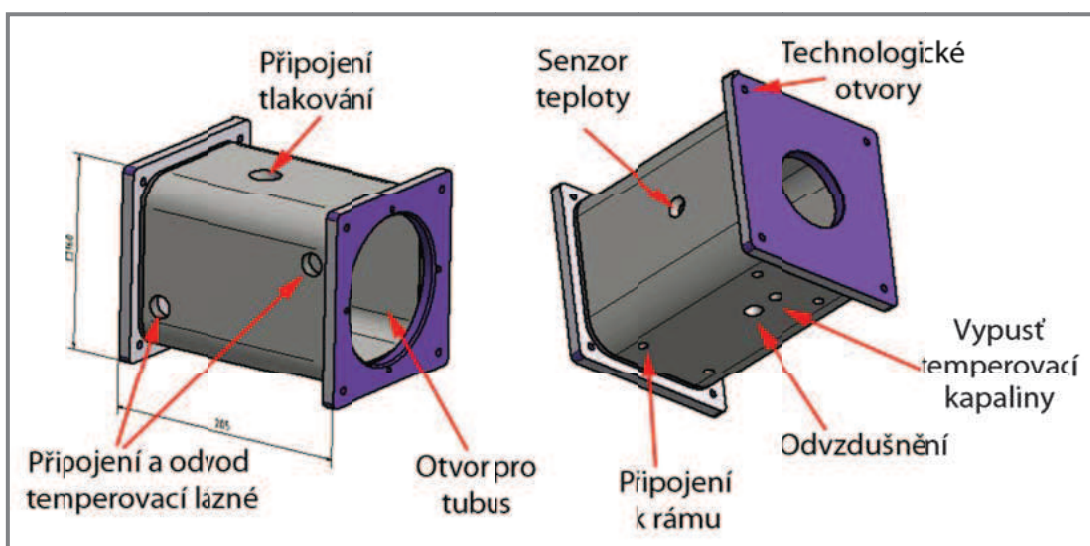
3.5.4 Varianty temperovací části konstrukce

Temperovací část konstrukce slouží k uložení tubusu a jeho následnému ohřevu či ochlazení dle požadavků. Ohřev bude uskutečněn pomocí temperovací kapaliny, která bude obtékat žebra tubusu. Temperovací část také musí umožnit připojení tlakování, odvzdušnění a senzoru teploty. Je důležité utěsnění temperovací komory. Varianta konstrukce zobrazená na obrázku 3-29 je složena z jeklu a dvou navařených čel. U této konstrukce je problém s přesným obrobením otvorů a utěsněním pracovního prostoru. Výhodou je relativně jednoduchá konstrukce a tedy i výrobní cena.



Obr. 3-29 Temperovací část variantu 1

Druhá varianta konstrukce se v mnoha ohledech podobá variantě první. Zásadní rozdíl je ve způsobu přivaření čelních desek k nosné části. Přivaření je provedeno pomocí koutových svarů po celém obvodu. Další rozdíl je v otvorech v rozích čel. Tyto otvory slouží k upevnění obrobku k lící desce soustruhu a tedy i k snadnějšímu obrábění na soustruhu.



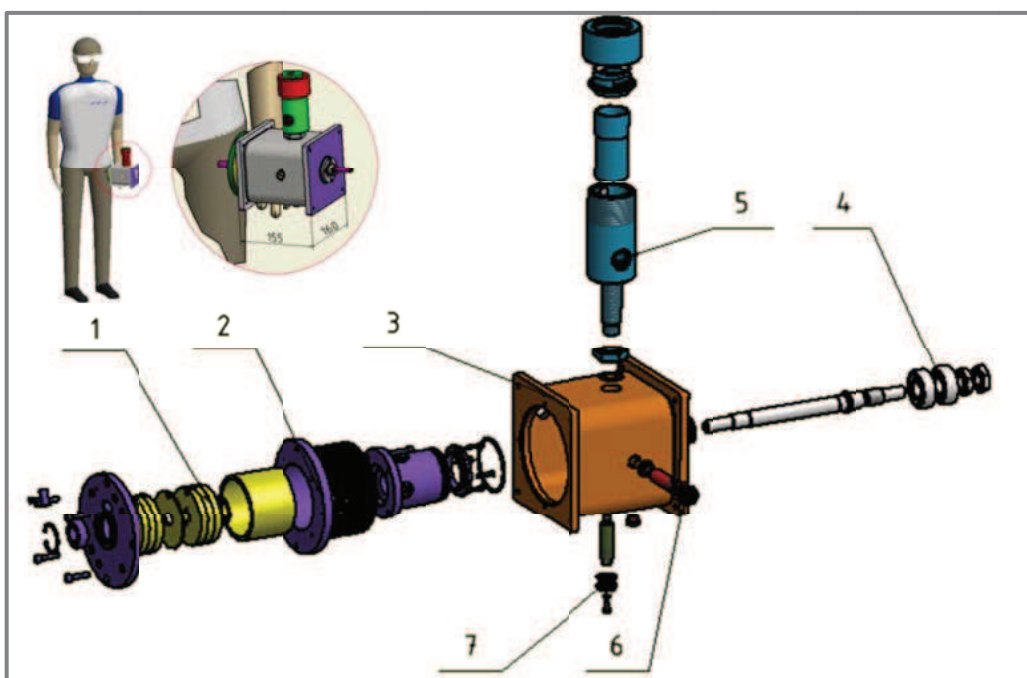
Obr. 3-30 Temperovací část variantu 2

Název	Výhody	Nevýhody	Výběr řešení
První varianta	Jednoduchost konstrukce	- Problém s výrobou - Zajištění těsnosti	✗
Druhá varianta	Jednoduchá a relativně levná výroba	Vyšší hmotnost oproti variantě první	➡

4. OPTIMÁLNÍ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Testovací stand

V první fázi konstrukce testovací standu byla celá konstrukce rozdělena do několika jednodušších podsestav. Tyto podsestavy byly zpracovány v modeláři Autodesk Inventor. Na základě konstrukčních variant a rešerše bylo vybráno optimální konstrukční řešení. Konstrukční návrh celého standu vychází z rozměrové rozvahy MR uzlu (1). Pomocí experimentálně odladěného MKP modelu byl zkonstruován MR uzel v testovacím standu. MR uzel byl vložen do tubusu (2). Pomocí příruby navrhnuté z hliníku, byl uzel vystředěn a pevně ukotven. Do tubusu byl dále uložen hřídel s ložisky (4). Celý tento komplet byl vložen do temperovací a nosné části konstrukce (3). Dále do tubusu vloženého do temperovací části byl zašroubován tlakovací (5) a odvzdušňovací systém (7). V neposlední řadě bylo připojeno příslušenství (6) jako senzory, či vypouštěcí víčka.



Obr. 4-1 Rozpad sestavy standu

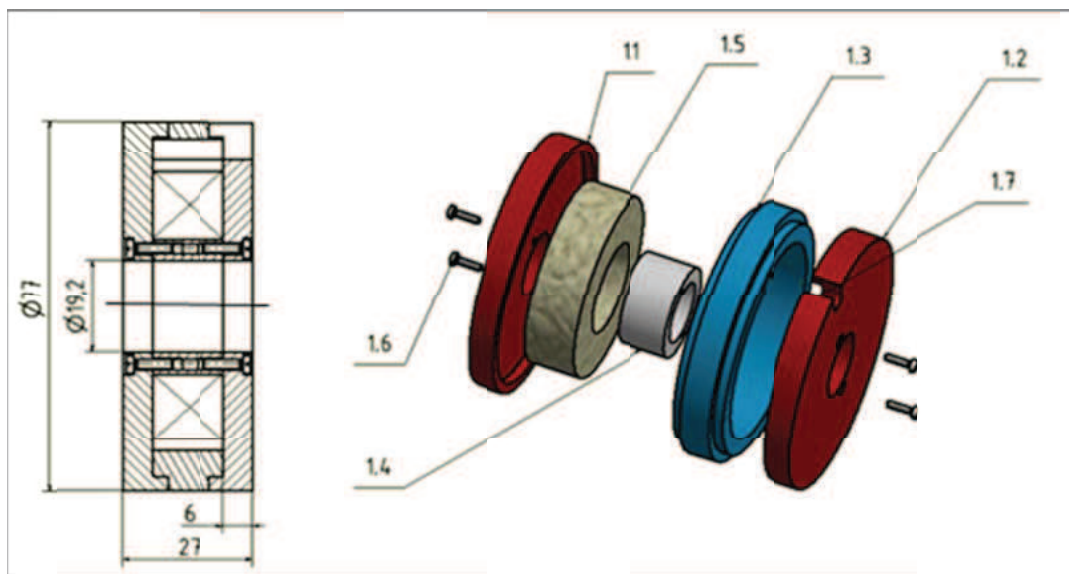
4.2 Konstrukční uzly

4.2.1 Konstrukce MR uzlu

Vhodná konstrukce MR uzlu je zásadní pro účinnost celého systému. Konstrukce tohoto uzlu byla úzce spjata s odladěným MKP modelem. Z pomoci tohoto modelu byla provedena analýza, jejichž výsledkem je vhodná geometrie a rozměry MR uzlu. Magnetický obvod je složen z břitů (1.1, 1.2) a středícího prvku (1.3) vyrobeného z oceli 11 523. Zdrojem magnetického pole je cívka (1.5) s parametry:

Počet závitů	118
Průměr drátu	1,2 mm (měď)
Proudová hustota	3 A/mm ² (příloha III.)
Maximální proudové zatížení	3,36 A

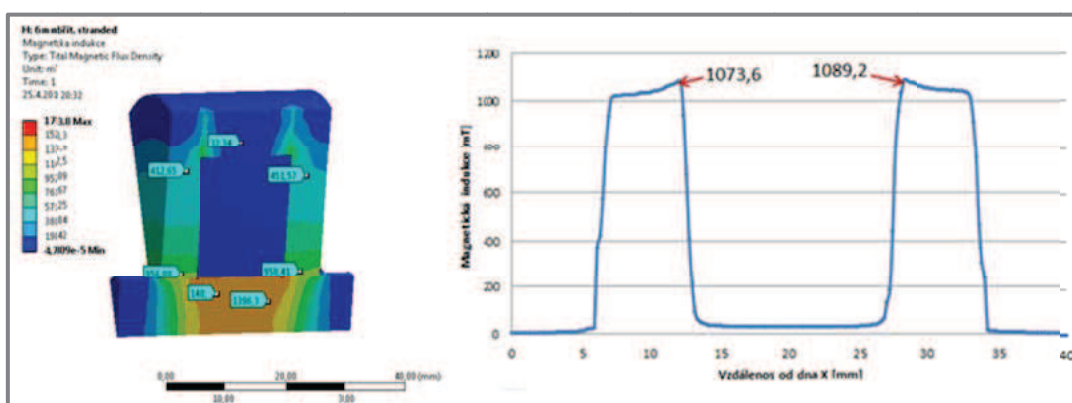
Tato cívka byla navinuta na hliníkový nákrůžek (1.4) a uzavřena v magnetickém obvodu pomocí čtyř šroubů M2 (1.6). Aby bylo možné vyvést dráty z cívky, byl jeden břit upraven drážkou (1.7) na vnějším obvodu břitu.



Obr. 4-2 MR uzel

V rešeršní části bylo zjištěno, že u velkého množství konstrukcí magnetického těsnění je těsnící mezera o velikosti 0,1 mm [3,4]. Je to především kvůli výhodným magnetickým vlastnostem [14]. Z tohoto důvodu byla navržena těsnící mezera 0,1 mm také v testovacím standu.

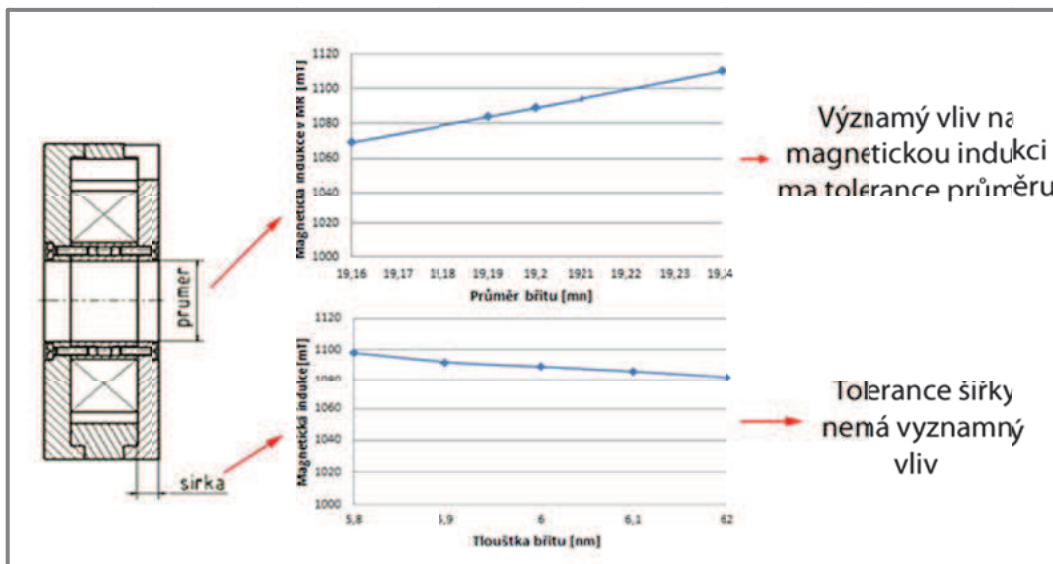
Experimentálně odladěný MKP model byl použit pro výpočet velikosti a rozložení magnetické indukce v zkonstruovaném MR uzlu. V tomto uzlu byla použita MR kapalina od firmy Lord MRF-140 CG. Podrobnosti výpočtu lze nalézt v příloze I. MKP model byl proudově zatížen 1 A, protože vlivem magnetické kapaliny ve štěrbině značně poklesne magnetický odpor (obr. 4-3).



Obr. 4-3 Výsledky z MKP MR uzlu

Na základě tohoto výpočtu dle [12] lze predikovat maximální statický přetlak těsnění v závislosti na proudu. Dále byl tento MKP model využit pro geometrickou citlivostní analýzu MR uzlu. Pro tuto analýzu byly vybrány dva rozměry zobrazené na obrázku 4-4. Jedná se o průměr a šířku břitu. Dle výpočtu vliv tolerance průměru

břítu je nezanedbatelný. Při přihlédnutí k těmto skutečnostem a výrobní ceně byla zvolena geometrická tolerance průměru $\pm 0,01 \text{ mm}$ ⁵. Rozdíl mezi maximálním a minimálním průměrem břitu činí rozdíl v magnetické indukci 10 mT, což odpovídá chybě 1,5 %.

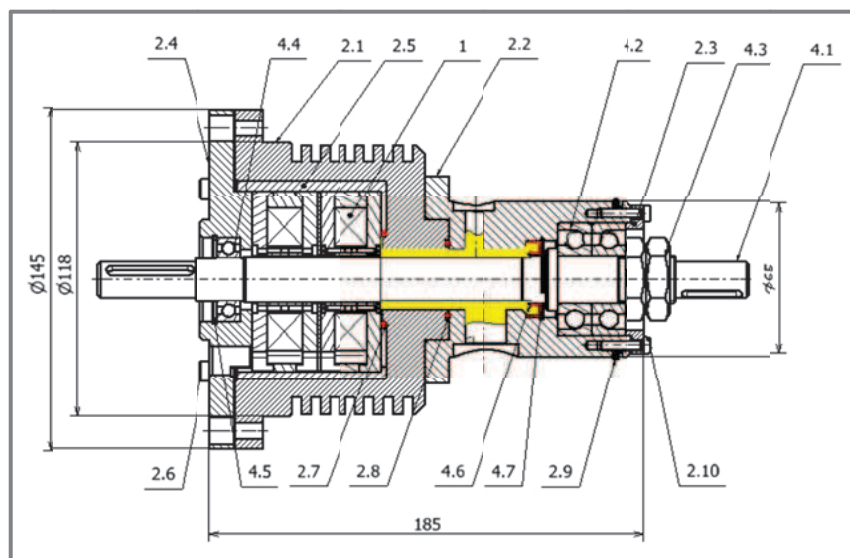


Obr. 4-4 Citlivostní analýza

Co se týče šířky břitu, tak byla zvolena geometrická tolerance šířky břitu $\pm 0,1 \text{ mm}$. Rozdíl v hodnotě magnetické indukce mezi nejširším a nejúžším břitem je 6 mT. Procentuálně je tento rozdíl pod 1 %.

4.2.2 Tubus

Tubus je konstrukční skupina testovacího standu v nichž je pracovní prostor s MR kapalinou. Tento prostor je z jedné strany utěsněn testovaným magnetických těsněním (1) a z druhé polymerním hřídelovým těsněním (4.6).

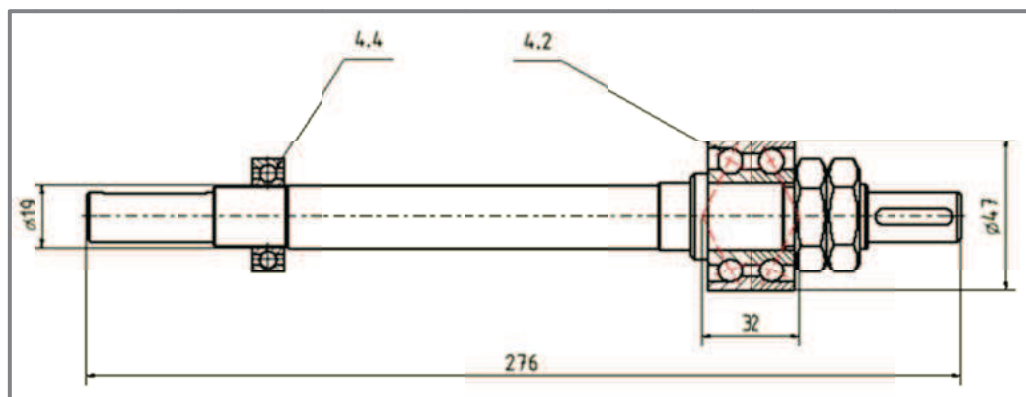


Obr. 4-5 Tubus

⁵ Předpokládá se ideální průměr vloženého hřídele.

V tubusu bude také docházet k tlakování celého systému. Jelikož tlaková komora je rozdělena na dvě části, bylo přistoupeno k utěsnění pomocí O kroužku (2.8). Na těsnění rotačního pohybu jsou kladeny vysoké požadavky, jelikož se předpokládají vysoké testovací tlaky a otáčky. Pro utěsnění hřídele vybráno těsnění BABSL DIN 3760 od firmy Simrit s číslem 12001667. Toto těsnění je vyrobeno z materiálu 72 NBR 902 o tvrdosti 75 shore A. Maximální teplota pracovní kapaliny, která bude těsněná je 100°C. Pro tento typ těsnění je uvedena závislost obvodové rychlosti na maximálním tlaku těsnění v příloze (Příloha V.). Tento graf je důležitý pro pozdější testovací podmínky na standu.

Hřídel testovacího standu (4.1) byl uložen v kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem do O (4.2). Byla použita dvě ložiska firmy SKF 7204 BEP. Tento typ uložení zajistí vhodné nastavení tuhosti uložení. Tímto způsobem lze tedy ovlivnit házení hřídele v testovacím prostoru a také testovat vliv tohoto házení hřídele. Díky této koncepci uložení se minimalizuje výsledná délka standu, protože ložiska jsou umístěna těsně vedle sebe. Únosnost a životnost ložisek vzhledem k téměř nulovému zatížení jsou nepodstatné. Hřídel byla vyrobena z oceli 11 523. Je to protože magnetický tok v těsnění se bude uzavírat přes hřídel.



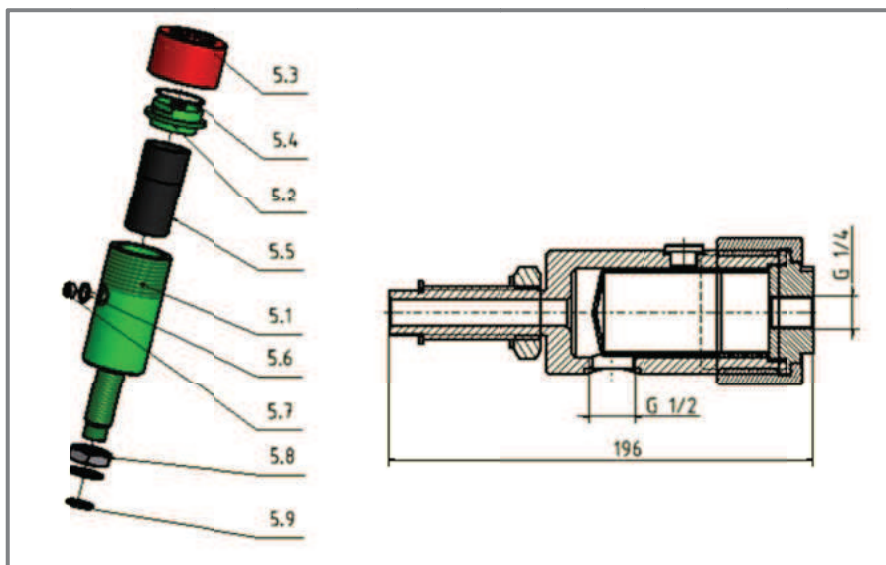
Obr. 4-6 Uložení hřídele

Pokud se bude testovat vliv vibrací na těsnost těsnění, bude vhodné odstranit ložisko 4.4. Potom bude hřídel uložen pouze v ložiscích 4.2.

Hlavní tělo tubusu (2.1) bude vyrobeno z hliníku. Je to především kvůli výhodné tepelné vodivosti tohoto materiálu. Dalším důvodem volby tohoto materiálu je paramagnetické chování. Je to výhodné, aby nedocházelo k magnetickému ovlivnění MR uzlu.

4.2.3 Tlakování část konstrukce

Tlakovací část je sekce konstrukce, která zajistí natlakování systému při testech těsnění. Je složena z nosné trubky (5.1) do které je vložený pryžový vak (5.5). Tento vak je nasazen na vstupní díl (5.4) a pevně utažen upravenou trubkou se závitem (5.3). Poté se našroubuje zátka (5.7).

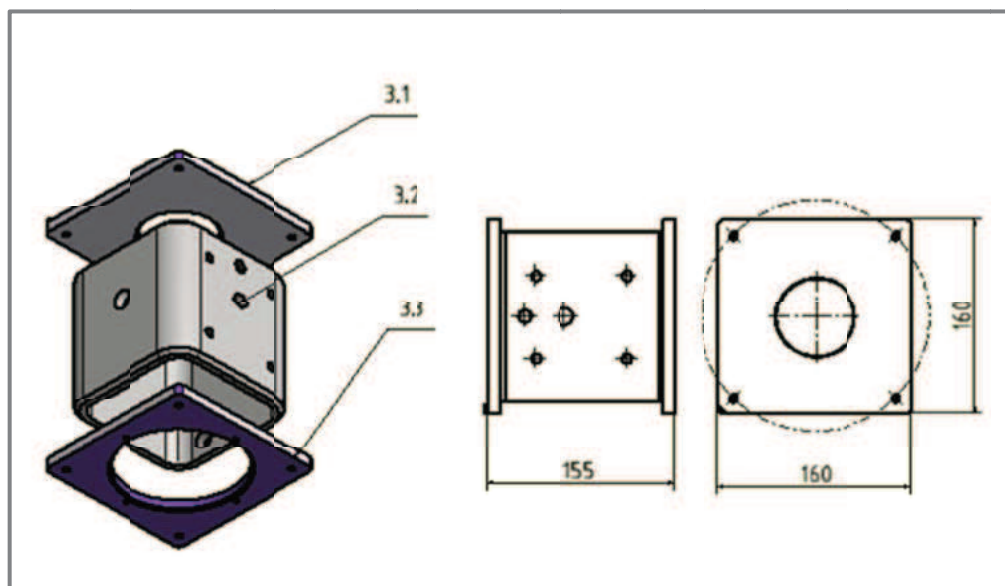


Obr. 4-7 Tlakovací část konstrukce

Tlakový vzduch bude připojen k tlakovací části pomocí závitů G 1/4. Závit G 1/2 je připraven pro připojení senzoru tlaku.

4.2.4 Temperovací část

Tato část konstrukce je nosnou a temperovací částí celého testovacího standu. Tato konstrukční skupina zajišťuje přívod a odvod temperovací kapaliny do testovacího standu. Objem prostoru pro temperovací kapalinu v standu je 0,9 l. Celá konstrukční skupina je složena z jeklu 120x120 (3.2) ke kterému jsou přivařena dvě čela (3.1, 3.3).

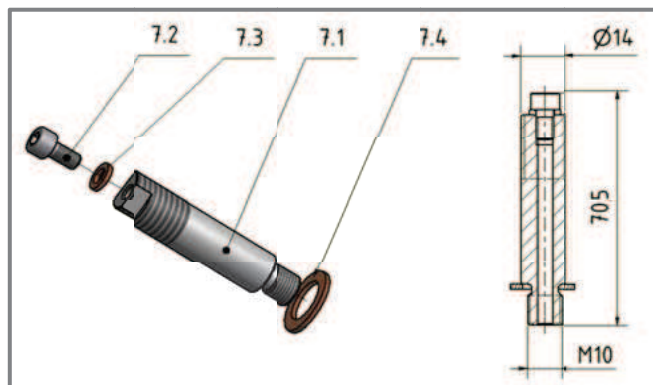


Obr. 4-8 Temperovací část

Otvory po obvodu čela (3.1 a 3.2) jsou připraveny k snadnějšímu upnutí této konstrukce k lícni desce soustruhu.

4.2.5 Odvzdušnění a příslušenství

Jako každý hydraulický obvod je nutné i testovací stand odvzdušnit. Naplnění MR kapaliny bude uskutečněno přes tlakovací část konstrukce (5). Objem kapaliny napuštěné do standu je 25 ml. Poté se obvod uzavře. Z pomoci odvzdušňovacího šroubu (7.2) dojde k uniku vzduchu z hydraulického obvodu. Poté je možné doplnění zbývajících místa MR kapalinou.

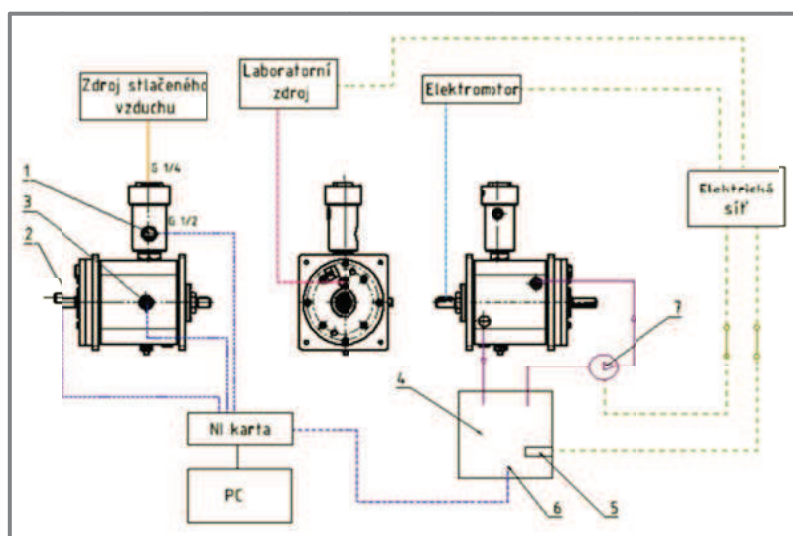


Obr. 4-9 Odvzdušnění

K příslušenství se řadí senzory otáček, teploty, tlaku a i vypouštěcí víčka pro temperovací kapalinu. Přesnější popis ve výkresové dokumentaci.

4.4 Nastavení standu

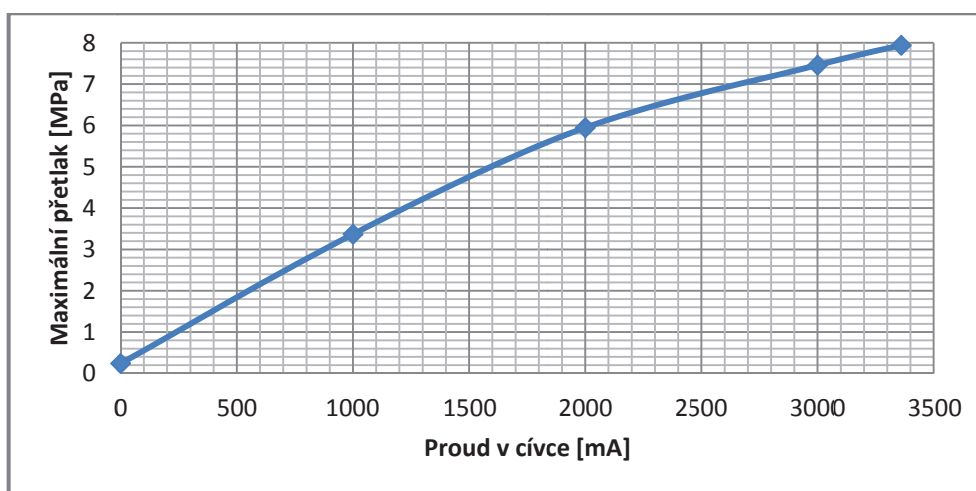
K správné funkci celého testovacího standu je potřeba celá řada externích přístrojů či senzorů. Pro testování konkrétního provozního parametru je často potřeba různá konfigurační přídavných zařízení. Na obrázku 4-10 jsou vyobrazeny všechna zařízení či senzory, které je možné připojit. K natlakování celého systému je vhodné připojit vzdušník (tlakovou nádobu). K snímání tlaku bude sloužit piezoelektrický senzor tlaku (1). Signál z tohoto senzoru bude připojen k NI USB-6008 měřicí kartě.



Obr. 4-10 Nastavení standu

Dále bude celý stand poháněn elektromotorem. Hlavním požadavkem na tento motor bude stálost a jednoduchá regulace otáček. Otáčky hřídele standu budou snímány

indukčním popřípadě optickým senzorem (2). Vystupující signál z obou senzorů je obdobný. Tento senzor bude opět připojen k NI kartě. Stand bude temperován kapalinou. Tato kapalina bude tlačena do testovacího standu pomocí čerpadla (7). Aby byla zajištěna homogenní teplota v celém standu bylo přikročeno k návrhu externí nádoby na kapalinu (4). V této nádobě bude kapalina s pomocí spirály (5) ohřívána a teplota bude sledována pomocí teplotního čidla (6). Objem nádoby bude minimálně desetinásobný oproti prostoru pro kapalinu v testovacím standu, aby byla zajištěna požadovaná homogenita. V neposlední řadě je nutné napájet cívku magnetického obvodu. Napájení bude uskutečněno přes laboratorní zdroj. Pomocí odladěného MKP modelu byl sestaven graf závislosti proudu v cívce na magnetické indukci v těsnící mezeře. Z této veličiny dle vztahu v [12] a geometrie magnetických nástavců lze predikovat statický přetlak těsnění pro testovací stand. Tento graf vyobrazen na obrázku 4-11.

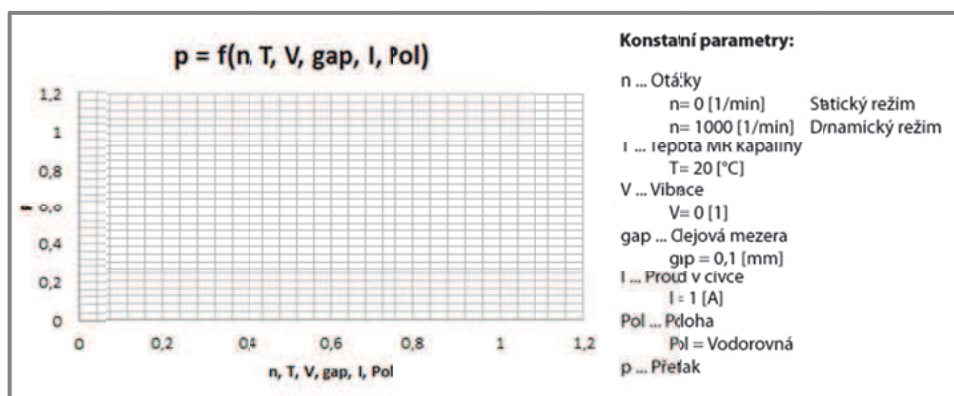


Obr. 4-11 Závislost přetlaku těsnění na proudu v cívce

4.5 Testování provozních parametrů

4.5.1 Měření provozních parametrů

Základní testování provozních parametrů bude probíhat tak, že se vynese závislost přetlaku těsnění na jednom vybraném provozním parametru. Ostatní provozní parametry budou konstantní. Výchozí hodnoty pro experimenty uvedeny na obrázku 4-12.



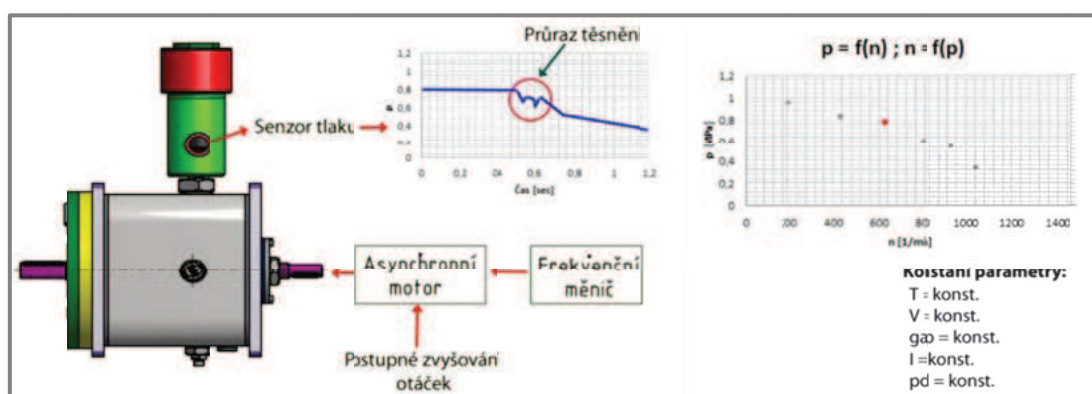
Obr. 4-12 Provozní parametry (graf)

Po těchto experimentech bude možné přikročit k jednotlivým kombinacím provozních parametrů.

4.5.2 Vliv otáček hřídele

4.5.2

K testovacímu standu bude připojen asynchronní elektromotor Siemens o výkonu 1,5 kW. Tento motor bude řízen pomocí frekvenčního měniče Sinamics G110. Připojení motoru k hřídeli standu bude pomocí navrhnuté spojky. Otáčky budou vypočteny dle frekvence napájení elektromotoru. Otáčky budou také ověřeny pomocí indukčního čidla otáček. Měření bude probíhat tím způsobem, že se nastaví konstantní přetlak těsnění. Posléze se bude zvyšovat rychlost otáčení hřídele. Pokud dojde k průsaku těsnění, zobrazí se na senzoru tlaku tento průsak poklesem tlaku. Pokud dojde k pozorovatelnému poklesu tlaku, zapíše se hodnota otáček. Tímto způsobem se naměří nejméně 20 hodnot pro různé přetlaky těsnění.



Obr. 4-13 Vliv otáček na přetlak těsnění

Experimenty budou provedeny také v opačném pořadí. Nastaví se konstantní otáčky a bude se zvyšovat hodnota přetlaku. Opět se z naměřených hodnot sestaví závislost přetlaku těsnění na otáčkách. Obě experimentálně sestavené závislosti by si měly odpovídat. Dle rešeršní části se předpokládá zhruba do otáček 30 1/min růst maximálního přetlaku. Poté dojde k mírnému poklesu [3].

4.5.3 Vliv vůle mezi magnetickým kroužkem a hřídelí

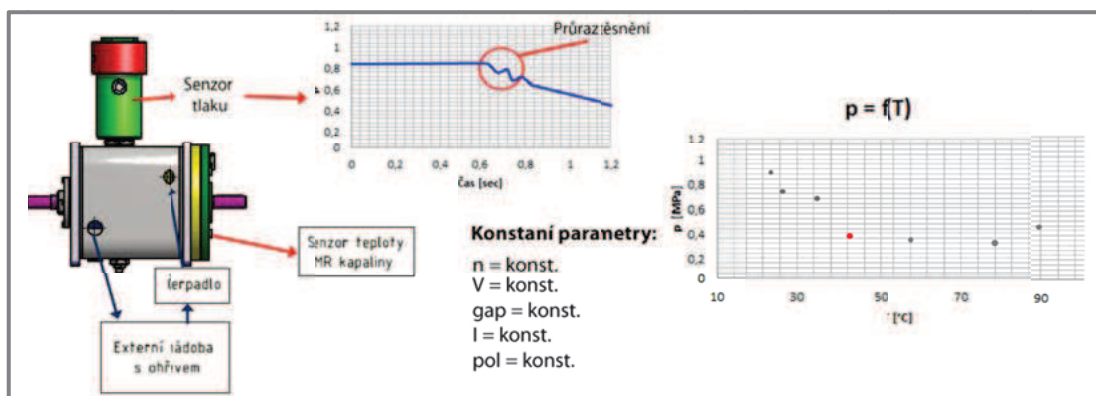
4.5.3

Pro každou velikost testovací těsnicí štěrby je nutné vyrobit nové břity. Tento parametr má zásadní vliv na velikost magnetické indukce v olejové mezeře. Všechny provozní parametry je nutné otestovat znovu pro jinou velikost olejové mezery. Dle rešeršní části zvolena výchozí hodnota velikosti štěrby 0,1 mm.

4.5.4 Vliv teploty náplně

4.5.4

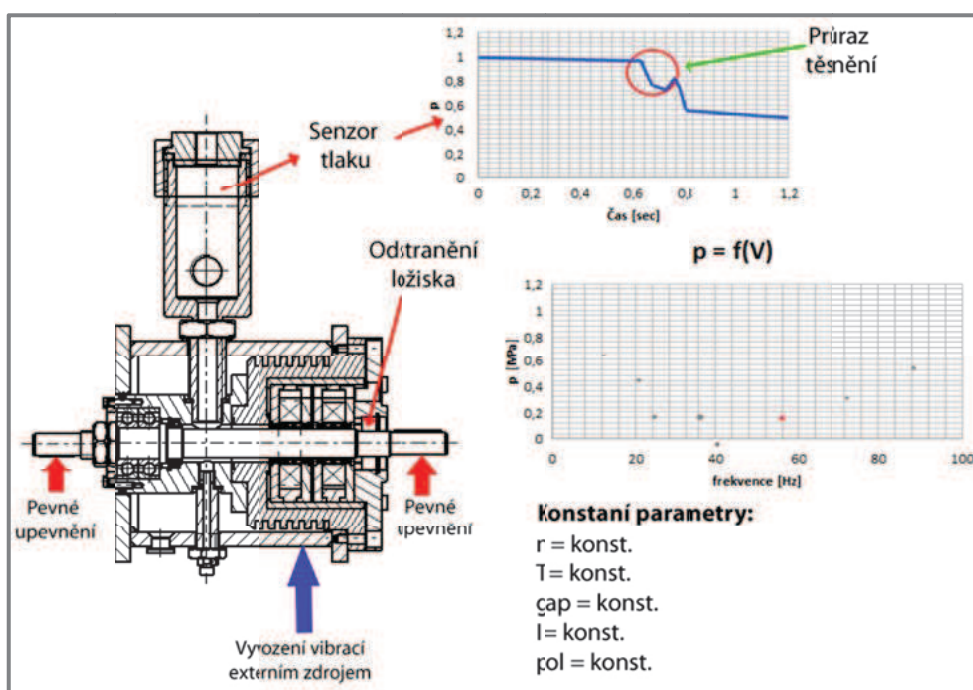
Testování vlivu teploty magnetické kapaliny na přetlak těsnění je uskutečněno přes temperovací kapalinu. Kapalina se v externí nádobě ohřeje na požadovanou teplotu. Objem této nádoby je desetinásobně větší než objem prostoru v standu. Poté se zapne čerpadlo a temperovací kapalina bude protékat standem. Pomocí senzoru teploty se bude snímat teplota MR kapaliny. Až se teplota magnetické kapaliny ustálí, začnou experimenty. Postupně se bude zvyšovat hodnota přetlaku až do momentu, kdy dojde k průrazu. Tyto hodnoty se vynesou do grafu. V dostupné literatuře nebyla nalezena žádná závislost tohoto provozního parametru.



Obr. 4-14 Vliv teploty náplně

4.5.5 Vliv úrovně vibrací

Vibrace v standu budou vyvozeny pomocí externího zařízení. Bude se zkoumat vliv frekvence vibrací při konstantní amplitudě na přetlak těsnění. Pro toto měření musí být stand upraven. Musí být odstraněno ložisko za magnetickým těsněním v místě příruby, jak je možné vidět na obrázku níže.



Obr. 4-15 Vliv vibrací

Testy budou probíhat při konstantní hodnotě vibrací a bude se zvyšovat přetlak těsnění. Zjištěné hodnoty budou zaneseny do grafu.

4.5.6 Vliv montážní polohy

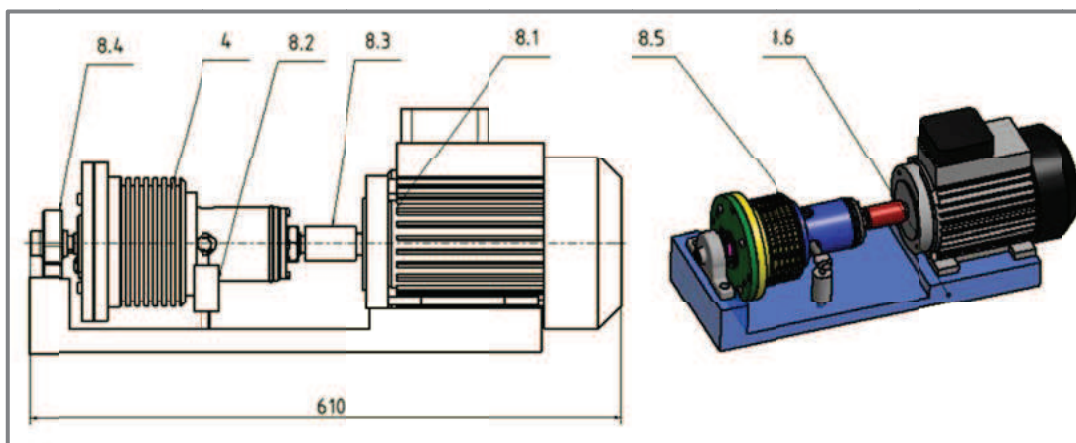
Testování vlivu montážní polohy bude uskutečněno nepřímo. Otestuje se maximální přetlak těsnění při stanovených parametrech ve vodorovné a svislé poloze. Z rozdílu mezi těmito přetlaky se bude usuzovat vliv montážní polohy těsnění. Pokud bude vliv podstatný, budou provedeny rozsáhlejší studie.

4.5.7 Vliv tlaku kapaliny

Vliv tohoto provozního parametru bude zanesen ve všech experimentech. Tento parametr se předpokládá jako nejpodstatnější pro budoucí možné použití magnetického těsnění v praxi. Graf vlivu maximálního přetlaku těsnění při ideálních podmínkách na proud v cívice zobrazen na obrázku 4-11.

4.6 Třecí moment magnetického těsnění

Magnetické hřídelové těsnění, jako každé hřídelové těsnění, při své funkci odebrává určitý moment. U elastomerního těsnění je tento ztrátový moment závislý především na obvodové rychlosti. Z fyzikálního hlediska se jedná o adhezní síly působící mezi třecím povrchem a segmenty makromolekul těsnění. U magnetického těsnění je stav odlišný. Dle [3] je ztrátový moment závislý především na proudě v cívce a z ní vycházejícího smykového napětí v magnetické kapalině. Na obrázku 4-16 je schéma zapojení standu pro testování velikosti odebíraného momentu v těsnění. Stand je složen z tubusu (4), který je uložen z jedné strany v ložiskovém domku (8.4) a z druhé přes spojku (8.3) na hřídeli elektromotoru (8.1). Do tubusu je zašroubována tyč (8.5) kde na jejím konci je připevněn tenzometrický senzor síly (8.2). Otáčky budou snímány indukčním čidlem v místě spojky (8.3).



Obr. 4-16 Stand na testování ztrátového momentu v magnetickém těsnění

Experimenty budou probíhat tak, že se bude testovat odebíraný moment bez magnetické kapaliny, poté s magnetickou kapalinou. Rozdíl mezi těmito naměřenými hodnotami je odebíraný moment magnetickou kapalinou. Bude se testovat vliv smykového napětí v kapalině a otáček na velikost ztrátového momentu. Tubus je upraven tak, že je možné testovat i elastomerní těsnění. Výsledkem bude porovnání ztrátového momentu elastomerního a magnetického těsnění.

5. DISKUZE

Přesnost přístrojů a experimentálních metod

Použité experimentální přístroje a metody mají své přesnosti a omezení. Experimenty na zkonstruovaném magnetickém obvodu byly provedeny z pomocí Tesla metru Tectra 5180 a sondy F W BELL 1x. Základní přesnost přístroje Tectra 5180 se pohybuje okolo 1%. Přesnost tohoto zařízení se také lehce mění v závislosti na pracovní teplotě. Nelinearita sondy F W BELL 1x je při magnetické indukci 2 T okolo 1%. Cívka magnetického obvodu byla napájena laboratorním zdrojem Manson SDP 2603. Přesnost dodávaného proudu do cívky je ± 1 %.

V MKP systému Ansys byl vytvořen model magnetického obvodu. Přesnost tohoto modelu je silně závislá na konstrukci a typů prvků sítě (bázové funkci). Jako každá numerická metoda tak i MKP má zásadní požadavek na konvergenci. Se zvyšujícím se počtem prvků se zvyšuje přesnost výpočtu (h-metoda) [33]. Tento postup byl použitý pro model magnetického obvodu MR uzlu.

Předpoklady a zjednodušení MKP modelů

Důležitý předpoklad diplomové práce je analogie dvou materiálů v MKP modelu (obr. 3-3). Předpokládá se analogie MKP modelů v těsníci štěrbině (viz. 3.2). Jestliže bude experimentálně odladěný MKP model se vzduchem, poté z této analogie bude odladěný i model s magnetickou kapalinou.

Přístupy k modelování magnetických obvodů v MKP jsou v zásadě tři (viz. 3.3). První z nich je 2D model s rotační axisymetrií. U tohoto modelu nelze zahrnout vliv otvorů či drážek po obvodu magnetického uzlu. Druhý přístup je 3D z pomocí rotační symetrie. U tohoto modelu lze postihnout rovnoměrně rozmístěné otvory či jiné prvky po obvodu magnetického uzlu. Poslední přístup je plný 3D model. Tento přístup zahrnuje vlivy nesymetrických prvků v modelu, ale požaduje vysoký výpočetní čas a výkon. Byly provedeny experimenty, aby bylo možné říci, který model se nejvíce blíží experimentům.

Porovnání MKP z experimenty

Výsledky z různých přístupů k modelování v MKP lze nalézt v tabulce 7. Byly zvoleny 4 přístupy. Model nejpřesněji popisující experimenty byl 3D MKP model s rotační symetrií, kde se zatížení cívky zadávalo přes parametr stranded. Jelikož nebylo možné provést experimenty na jednou, bylo měření rozděleno na měření předního a zadního těsníciho břítu. Pro přední břit průměrný rozdíl mezi experimenty a MKP modelem byl 14 mT. Tato hodnota odpovídala průměrné chybě 4,1 %. Pro zadní břit je rozdíl 13 mT, což odpovídá průměrné chybě 3,9 %. Při přihlédnutí k přesností měřící aparatury a MKP výpočtu, lze konstatovat, že průměrná chyba MKP modelu 4% je akceptovatelná.

Simulace výrobních nepřesností

Každé experimentální zařízení je vyrobeno s určitou výrobní přesností. Bylo vhodné provést citlivostní analýzu nejvýznamnějších geometrických faktorů, které mohou zásadně ovlivňovat výsledky. Experimentálně odladěný MKP model byl využit pro tyto testy. Výpočtově bylo zjištěno, že zásadní vliv na výsledky má velikost olejové mezery a s tím související průměr břitů (viz 4.2.1). Tolerance zvolená na břitových

nástavcích může v nejhorším případě ovlivnit výsledky o 1,5 %. Ostatní geometrické parametry nemají významnější vliv.

Pozorované efekty

Při měření magnetické indukce pomocí sondy F W BELL 1x docházelo k velkému rozptylu měřených hodnot. Tento rozptyl se pohyboval maximálně kolem 20 % měřené hodnoty magnetické indukce. Bylo to způsobeno vysokou citlivostí hallovovy sondy na úhel naklonění sondy v měřicí drážce. Tento fakt je vhodné respektovat při budoucích měřeních s touto sondou.

Testovací omezení standu

Testovací stand, jako každé zařízení má své konstrukční omezení. Nejvýraznější vliv má elastomerní hřídelové těsnění. Maximální tlak uvnitř standu může být 10 bar do 500 otáček. Maximální otáčky standu mohou být 6000 při maximálním tlaku 0,2 bar. Tohle omezení odpadá při testování ztrátového momentu v těsnění, protože se elastomerní těsnění ze standu odstraní. Maximální temperovací teplota standu může být 100 °C. Při překročení této teploty může dojít k destrukci těsnících elementů a magnetické kapaliny. Poslední omezení se týče maximálního dlouhodobého proudového zatížení cívky, které je 3,36 A.

6. ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce byl návrh testovacího standu pro stanovení provozních parametrů magnetického hřídelového těsnění. Návrh této konstrukce úzce souvisel s konstrukční skupinou MR uzlu. Tato skupina je zásadní pro výsledné parametry magnetického těsnění. Práce se z velké části zabývala vytvořením MKP modelů magnetického obvodu a jejich experimentálního odladění. Ze 4 MKP modelů byl vybrán nejpresnější model. Jednalo se o 3D model s rotační symetrií, kde se zatížení zadávalo přes parametr stranded. Rozdíl mezi MKP modelem a experimenty byl průměrně 4 %. Tato hodnota vzhledem k přesnostem měřících přístrojů a modelu byla ucházející. Z pomoci tohoto modelu byla navrhována geometrie břitových nástavců a zatěžující proud v MR uzlu. Také byla pomocí tohoto modelu provedena geometrická citlivostní analýza, která odhalila problematická místa a tolerance. Zásadní vliv na těsnost těsnění má velikost těsnící štěrbiny a sousost hřídele a těsnících břitů. Tyto dva parametry spolu úzce souvisí, protože při ne sousém uložení hřídele dojde z jedné strany k zmenšení a z druhé k zvětšení těsnící štěrbiny.

Diplomová práce se z velké části zabývala návrhem testovacího standu. Tato konstrukce byla rozdělena do 5 konstrukčních celků. Pro každý tento konstrukční celek byla vybrána z různých konstrukčních variant varianta nejvhodnější. Hodnotícími parametry byly především funkčnost a cena. Konstrukce byla také ovlivněna technologií výroby jednotlivých dílů. Byl požadavek na co nejvyšší sousost jednotlivých ploch, která je nejsnadněji dosažitelná na jedno upnutí na soustruhu.

V budoucnu na tomto standu proběhnou testy magnetického těsnění při různých provozních podmínkách. Výsledky z těchto experimentů poskytnou údaje pro predikci chování magnetického těsnění při různých provozních stavech. Dále budou provedeny experimenty, které ukáží výhody či nevýhody tohoto způsobu těsnění oproti ostatním druhům těsnění.

Věda nikdy nevyřeší jeden problém, aniž by nevyprodukovala deset nových.
George Bernard Shaw

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

7

7.1 Knihy

7.1

- [1] MAYER, Daniel a Josef POLÁK. *Metody řešení elektrických a magnetických polí*. 1983. vyd. Praha: SNTL, 1983.
- [2] SHIGLEY, J. E., MISCHKE, Ch. R., BUDYNAS, R. G. *Konstruování strojních součástí*. Překlad 7. vydání (McGraw Hill 2004), 2008, 1300 s.

7.2 Vědecké články

7.2

- [3] IYENGAR, VARDARAJAN R., ALEXANDER A. ALEXANDRIDIS, SIMON C. TUNG a DAVID S. RULE. Wear Testing of Seals in Magneto-Rheological Fluids. *Tribology Transactions*. 2004, vol. 47, no. 1, pp. 23-28. ISSN 1040-2004. DOI: 10.1080/05698190490279083. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/05698190490279083>
- [4] CONG, Ming a Huili SHI. A study of magnetic fluid rotary seals for wafer handling robot. *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*. 2010, roč. 8, 1/2/3/4, s. 158-. ISSN 1740-8865. DOI: 10.1504/IJISTA.2010.030197. Dostupné z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=30197>
- [5] MITAMURA, Y, S ARIOKA, D SAKOTA, K SEKINE a M AZEGAMI. Application of a magnetic fluid seal to rotary blood pumps. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2008-05-21, roč. 20, č. 20, s. 204145-. ISSN 0953-8984. DOI: 10.1088/0953-8984/20/20/204145. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0953-8984/20/i=20/a=204145?key=crossref.38161d91b4dd036f9f4cf1987c7505b9>
- [6] MATUSZEWSKI, Leszek, Zbigniew SZYDŁO, D SAKOTA, K SEKINE a MAZEGAMI. The application of magnetic fluids in sealing nodes designed for operation in difficult conditions and in machines used in sea environment. *Polish Maritime Research*. 2008-01-1, roč. 15, č. 3, s. -. ISSN 1233-2585. DOI: 10.2478/v10012-007-0083-0. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/pomr.2008.15.issue-3/v10012-007-00830/v10012-007-0083-0.xml>
- [7] MENG, Zhao, Zou JIBIN, Hu JIANHUI, K SEKINE a M AZEGAMI. An analysis on the magnetic fluid seal capacity. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006, roč. 303, č. 2, e428-e431. ISSN 03048853. DOI: 10.1016/j.jmmm.2006.01.060. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885306000758>
- [8] POTO CZNY, Marcin, Bolesław ZACHARA, Hu JIANHUI, K SEKINE a M AZEGAMI. Influence of Magnetorheological Fluid Volume onto Obtained Critical Pressures on Rotary Shaft Seals. *Key Engineering Materials*. 2011, roč. 490, č. 2, s. 119-127. ISSN 1662-9795. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.490.119.
- [9] MATUSZEWSKI, Leszek, Zbigniew SZYDŁO, Hu JIANHUI, K SEKINE a M

- AZEGAMI. Life tests of a rotary single-stage magnetic-fluid seal for shipbuilding applications. *Polish Maritime Research*. 2011-01-1, roč. 18, č. 2, s. –. ISSN 1233-2585. DOI: 10.2478/v10012-011-0012-0. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/pomr.2011.18.issue-2/v10012-011-0012-0/v10012-011-0012-0.xml>
- [10] ULICNY, John C., Michael P. BALOGH, Noel M. POTTER, Richard A. WALDO a M AZEGAMI. Magnetorheological fluid durability test – Iron analysis. *Materials Science and Engineering: A*. Lausanne: Elsevier Sequoia, 2007, roč. 443, 1-2, s. 16-24. ISSN 09215093. DOI: 10.1016/j.msea.2006.06.050. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509306010215>
- [11] LIU, B, W H LI, P B KOSASIH, X Z ZHANG a M AZEGAMI. Development of an MR-brake-based haptic device. *Smart Materials and Structures*. Lausanne: Elsevier Sequoia, 2006-12-01, roč. 15, č. 6, s. 1960-1966. ISSN 0964-1726. DOI: 10.1088/0964-1726/15/6/052. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/15/i=6/a=052?key=crossref.003badc1c3d65bf8dba813dd994675da>
- [12] KORDONSKI, W. I. a S. R. GORODKIN. Magnetorheological Fluid-Based Seal. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1996-09-01, roč. 7, č. 5, s. 569-572. ISSN 1045-389x. DOI: 10.1177/1045389X9600700518. Dostupné z: <http://jim.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/1045389X9600700518>

7.3 Vysokoškolské práce

- [13] NOVÁČEK, V. *Technologie výroby Magnetoreologických kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Roupec.
- [14] NOVÁČEK, V. *Konstrukce MR spojky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Roupec.
- [15] ROUPEC, J. *Mezní a degradační procesy magnetoreologických tlumičů odpružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 140 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc
- [16] GRAVATT, John W. Magneto-Rheological Dampers for Super-sport Motorcycle Applications. 2003. Available from: http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-05202003-214157/unrestricted/Gravatt_MS_Thesis_2003.pdf

7.4 Internetové zdroje

- [17] BONSOR, Kevin. Buildings and Bridges. [online]. [cit. 2012-09-20]. Dostupný z: <http://science.howstuffworks.com/engineering/structural/smart-structure2.htm>
- [18] *Ferrotec: Ferrotec (USA) Corporation*. [online]. [cit. 2012-09-19]. Dostupný z: <http://www.ferrotec.com/>
- [19] POYNOR, James. Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers. pp. 12. Dostupný z: <http://www.writing.engr.psu.edu/me5984/poynor.pdf>
- [20] TOROCSIK, D. Some design issues of multi-plate magnetorheological clutches. 2011, pp. 4. Dostupný z: http://konyvtar.uni-pannon.hu/hjic/HJIC39_041_044.pdf
- [21] T., Butz. Modelling and Simulation of Electro- and Magnetorheological Fluid Dampers. 1998. Dostupný z: <http://www.sim.informatik.tu-darmstadt.de/publ/download/2002-ZAMM-Butz-vonStryk.pdf>
- [22] *Liquids Research Ltd* [online]. 2011. vyd. [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: <http://www.liquidsresearch.co.uk/>
- [23] *Ferrolabs: Sealing the unsealable* [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: <http://www.ferrolabs.com/en/>
- [25] *LORD Corporation* [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: <http://www.lord.com/>
- [26] *Vehicle dynamics: Solving the powertrain mount dilemma* [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: http://www.vehicledynamicsinternational.com/bwi_porsche.php
- [27] *Ansys tutorial* [online]. 2001. vyd. [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: <http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/CL/CIT/IT>
- [28] Magnetické kapaliny a jejich použití. MAYER, Daniel. [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34814
- [29] IVÁNEK, Lubomír. *Elektromagnetismus: Učební text* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2013-03-31].
- [30] Controlling Vibration with Magnetorheological Fluid Damping. CARLSON. [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.sensorsmag.com/sensors/electric-magnetic/controlling-vibration-with-magnetorheological-fluid-damping-999>
- [31] Ossur. [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.ossur.cz/>

- [32] Actuators based on Magnetorheological Fluid. [online]. [cit. 2013-03-31].
Dostupné z: <http://www.hs-owl.de/fb5/en/labor/rt/forschung/mrf-aktorik.html>
- [33] PETRUŠKA, Jindřich. *MKP v inženýrských výpočtech* [online]. [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: www.umt.fme.vutbr.cz/

8. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN

8

Seznam použitých zkratk

2D	- dvourozměrný
3D	- třírozměrný
FF	- ferrofluid
MKP	- metoda konečných prvků
MR	- magnetoreologický
NI	- National instruments

Seznam symbolů a veličin

b	[mm]	- výška těsnící šterbiny
B	[T]	- magnetická indukce
B_r	[T]	- zbytková magnetická indukce
h	[mm]	- šířka těsnícího bříty
H	[A/m]	- intenzita magnetického pole
I	[A]	- elektrický proud
J	[A/m ²]	- proudová hustota
L	[H]	- indukčnost
M	[A/m]	- magnetizace
n	[min ⁻¹]	- otáčky
N	[1]	- počet závitů cívky
p	[Pa]	- tlak, přetlak
p_{pl}	[Pa]	- plastická složka přetlaku
p_{mag}	[Pa]	- magnetická složka přetlaku
R_m	[Ω]	- reluktance
S	[mm ²]	- conducting area
V	[mm ³]	- objem magnetické kapaliny
V_n	[mm ³]	- objem šterbiny
y	[mm]	- vzdálenost
μ_r	[1]	- relativní permeabilita
τ	[Pa]	- smykové napětí
Φ	[Wb]	- magnetický tok
ω	[s ⁻¹]	- úhlová rychlost

9. SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

9.1 Seznam obrázků

Obr. 1-1 Porovnání Ferro kapaliny (1) a MR kapaliny (2) [6]	16
Obr. 1-2 MR efekt [32]	16
Obr. 1-3 Módy MR kapaliny [22]	16
Obr. 1-4 Zjednodušené B-H křivky MR kapalin firmy Lord, převzato z [24]	18
Obr. 1-5 Příklad magnetického obvodu [29]	19
Obr. 1-6 Magnetizační křivka [29]	19
Obr. 1-7 Hysterezní křivka [29]	20
Obr. 1-8 Typy hysterezních křivek [29]	20
Obr. 1-9 Magnetický a elektrický obvod [29]	21
Obr. 1-10 Typy úloh [29]	21
Obr. 1-11 MR tlumič [19]	22
Obr. 1-12 Sedadlo dopravního prostředku [18]	22
Obr. 1-13 Tlumič pračky [30]	23
Obr. 1-14 Brzda kolenního kloubu [31]	23
Obr. 1-15 Uložení motoru Porsche 911 GT3 [25]	24
Obr. 1-16 Těsnění lodního šroubu [6]	24
Obr. 1-17 Elektro-optický sledovací systém [18]	25
Obr. 1-18 Koncepce těsnění čerpadla krve [5]	26
Obr. 1-19 Výsledky experimentů čerpadla krve [5]	26
Obr. 1-20 Schéma manipulačního zařízení [4]	26
Obr. 1-21 Konstrukční uspořádání magnetického obvodu [4]	27
Obr. 1-22 Testovací stand [8]	28
Obr. 1-23 Schéma standu [8]	28
Obr. 1-24 Geometrie [8]	28
Obr. 1-25 Schéma geometrie [8]	29
Obr. 1-26 Výsledky práce [8]	29
Obr. 1-27 Výsledky práce - konkretizace [8]	30
Obr. 1-28 Závislost počtu břitů [8](z...počet břitů v těsnění)	30
Obr. 1-29 Rozložení magnetické indukce [7]	31
Obr. 1-30 Provozní parametry [7]	32
Obr. 1-31 Testovací stand [3]	32
Obr. 1-32 Opatřování polyuretanového těsnění v MR kapalině [3]	33
Obr. 1-33 Výsledky práce [3]	33
Obr. 1-34 Testovací stand [12]	34
Obr. 1-35 Vliv proudu na přetlak těsnění [3]	35
Obr. 1-36 Vliv otáček na přetlak těsnění [3]	35
Obr. 1-37 Vliv geometrie břitu na přetlak těsnění [3]	36
Obr. 1-38 Odebíraný krouticí moment [3]	36
Obr. 3-1 Koncepce konstrukce standu (konečná verze)	40
Obr. 3-2 Metodický přístup	41
Obr. 3-3 Analogie modelů	41
Obr. 3-4 Schéma měření a hallův jev	42
Obr. 3-5 Měřicí rovina a rozdělení měření	42

Obr. 3-6 B-H křivka oceli 11 523	43
Obr. 3-7 Geometrie a materiálové charakteristiky	44
Obr. 3-8 MKP síť	44
Obr. 3-9 Výsledky z MKP typu stranded	45
Obr. 3-10 Výsledky z MKP typu solid	45
Obr. 3-11 Síť MKP 2D úlohy	46
Obr. 3-12 Výsledky z MKP typu 2D	46
Obr. 3-13 Modelová cívka	46
Obr. 3-14 Geometrie a síť	47
Obr. 3-15 Výsledky z MKP typu 3D	47
Obr. 3-16 Ukázka z měření magnetické indukce	48
Obr. 3-17 Naměřená data přední břit 3,36 A	48
Obr. 3-18 Naměřená data zadní břit 3,36 A	49
Obr. 3-19 Rozdíl MKP a experimenty přední břit	49
Obr. 3-20 Rozdíl MKP a experimenty zadní břit	50
Obr. 3-21 Parametry ovlivňující konstrukci MR uzlu	51
Obr. 3-22 První varianta konstrukce MR uzlu	51
Obr. 3-23 Druhá varianta MR uzlu	52
Obr. 3-24 Konstrukční celky (finální varianta)	53
Obr. 3-25 Tubus varianta 1	54
Obr. 3-26 Tubus varianta 2	54
Obr. 3-27 Varianta 1 konstrukce tlakování	55
Obr. 3-28 Varianta 2 tlakovací části konstrukce	56
Obr. 3-29 Temperovací část varianta 1	57
Obr. 3-30 Temperovací část varianta 2	57
Obr. 4-1 Rozpad sestavy standu	58
Obr. 4-2 MR uzel	59
Obr. 4-3 Výsledky z MKP MR uzlu	59
Obr. 4-4 Citlivostní analýza	60
Obr. 4-5 Tubus	60
Obr. 4-6 Uložení hřídele	61
Obr. 4-7 Tlakovací část konstrukce	62
Obr. 4-8 Temperovací část	62
Obr. 4-9 Odvzdušnění	63
Obr. 4-10 Nastavení standu	63
Obr. 4-11 Závislost přetlaku těsnění na proudu v cívce	64
Obr. 4-12 Provozní parametry (graf)	64
Obr. 4-13 Vliv otáček na přetlak těsnění	65
Obr. 4-14 Vliv teploty náplně	66
Obr. 4-15 Vliv vibrací	66
Obr. 4-16 Stand na testování ztrátového momentu v magnetickém těsnění	67

9.2 Seznam tabulek

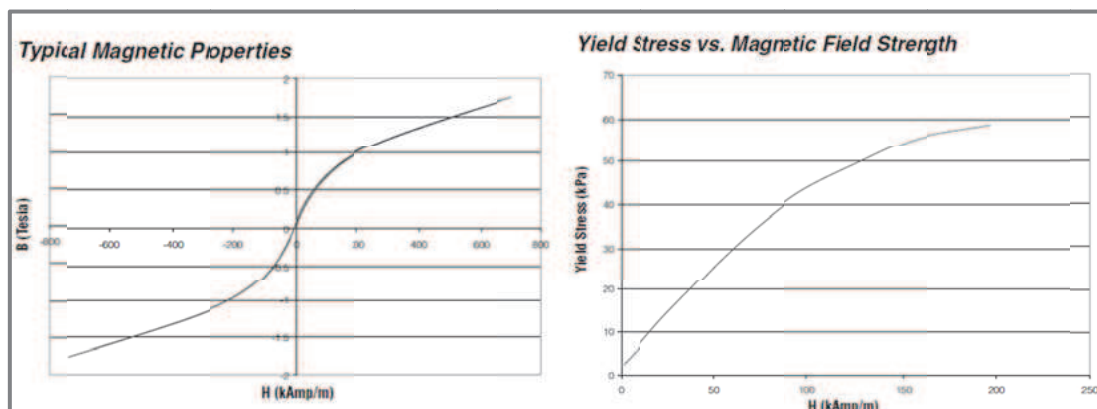
Tab. 1 Ferrolabs nanomagnetické kapaliny	17
Tab. 2 Ferrolabs magnetoreologické kapaliny	17
Tab. 3 LORD MR kapaliny	17
Tab. 4 Liquids research nanomagnetické kapaliny	18
Tab. 5 Liquids research MR kapaliny	18
Tab. 6 Výsledky práce [4]	27
Tab. 7 Porovnání hodnot MKP a měření	49

10. SEZNAM PŘÍLOH

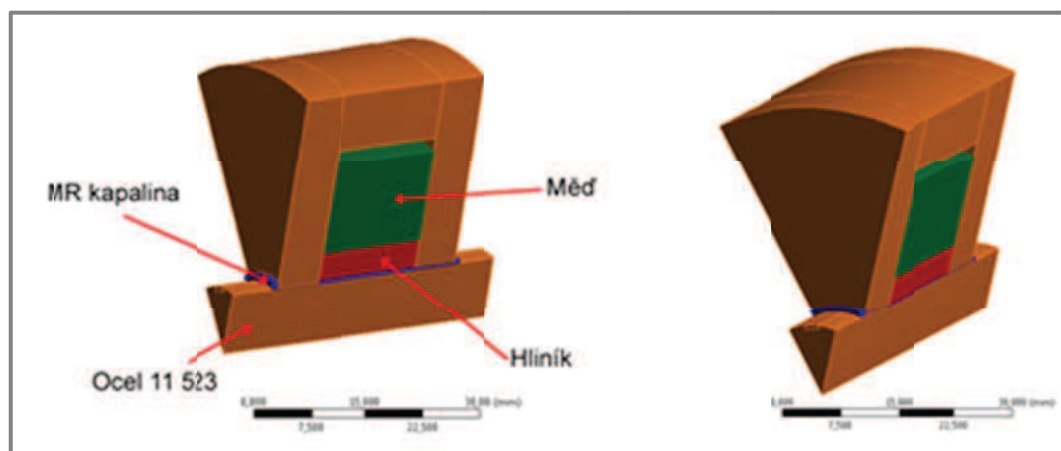
10

Příloha I. – MKP výpočet MR uzlu v testovacím standu

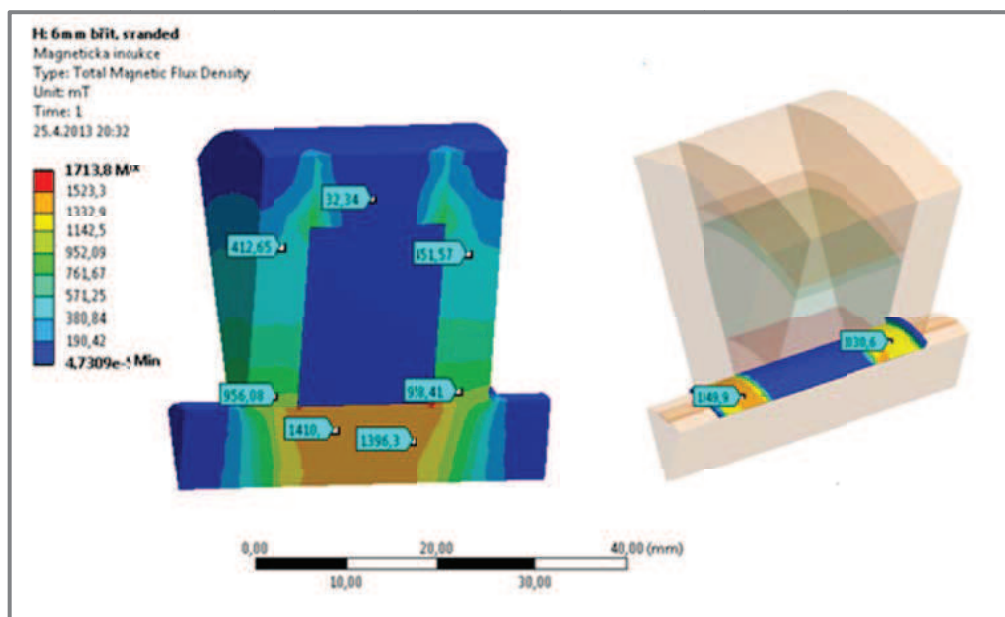
Geometrie MR uzlu je uvedena na obrázku 3-23. Materiálové charakteristiky stejné, jak v kapitole 3.3.1. Rozdíl v materiálových vlastnostech od předchozí varianty je v magnetické kapalině v těsnící štěrbině. Byla použita MR kapalina firmy Lord MRF-140 CG. B-H křivka této kapaliny byla použita pro výpočet a je vyobrazena na obrázku níže.



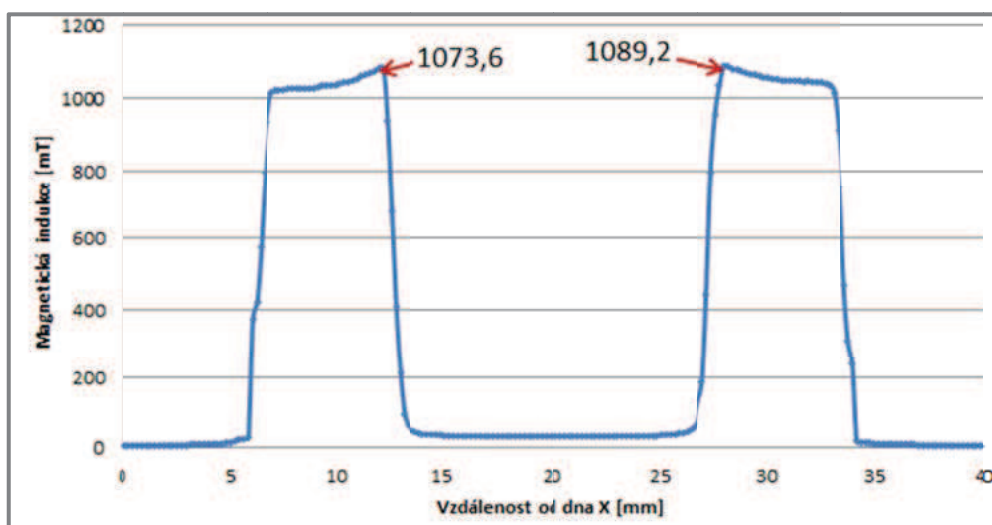
MKP síť stejná jak v předchozím případě kvůli zachování analogie modelů. Model byl proudově zatížen 1 A.



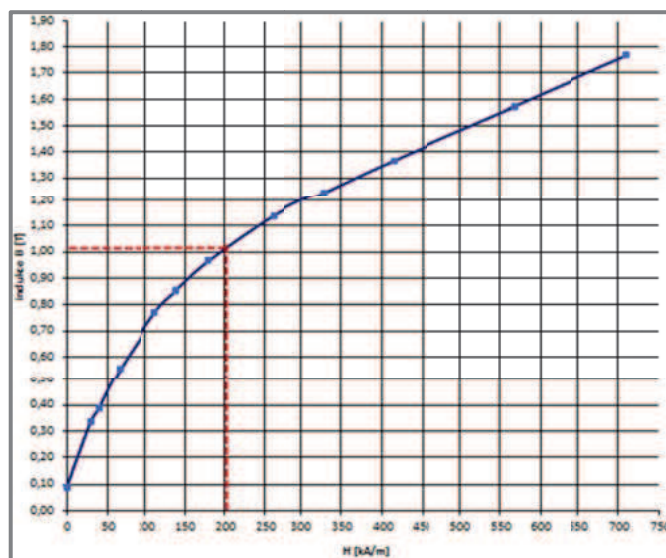
Rozložení a velikosti magnetické indukce v MR uzlu na obrázku níže. Nejvyšší hodnota magnetické indukce je v hřídeli. Při zvyšování zatěžujícího proud dojde v tomto místě k magnetickému nasycení.



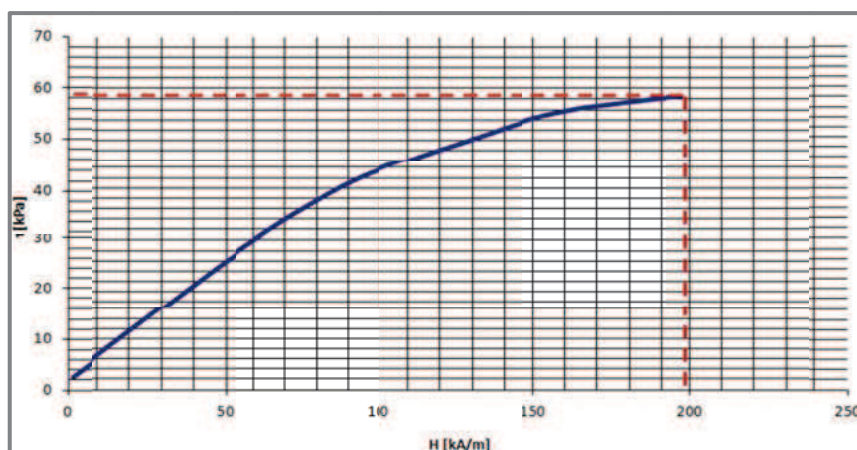
Rozložení magnetické indukce v MR kapalině pod těsnicími břitmi je konstantní a dosahuje hodnoty 1050 mT, jak je možné vidět na obrázku výše vpravo.



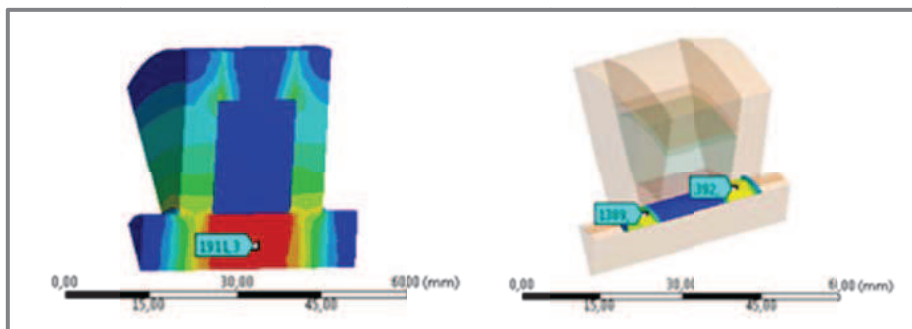
Na obrázku výše je možné vidět rozložení a velikosti magnetické indukce ve středu těsnicí štěrbině. Nejvyšší hodnota dosahuje 1089 mT. Intenzita magnetického pole dle B-H křivky kapaliny MRF-140 CG níže dosahuje hodnoty 200 kA/m. Tato hodnota byla také vypočtena ověřena v systému Ansys.



Z intenzity magnetického pole lze dle křivky níže stanovit smykové napětí v MR kapalině při tomto proudovém zatížení. Smykové napětí dosahuje hodnoty 58,5 kPa. Tato hodnota je důležitá pro pozdější testy odebíraného momentu (4.5).

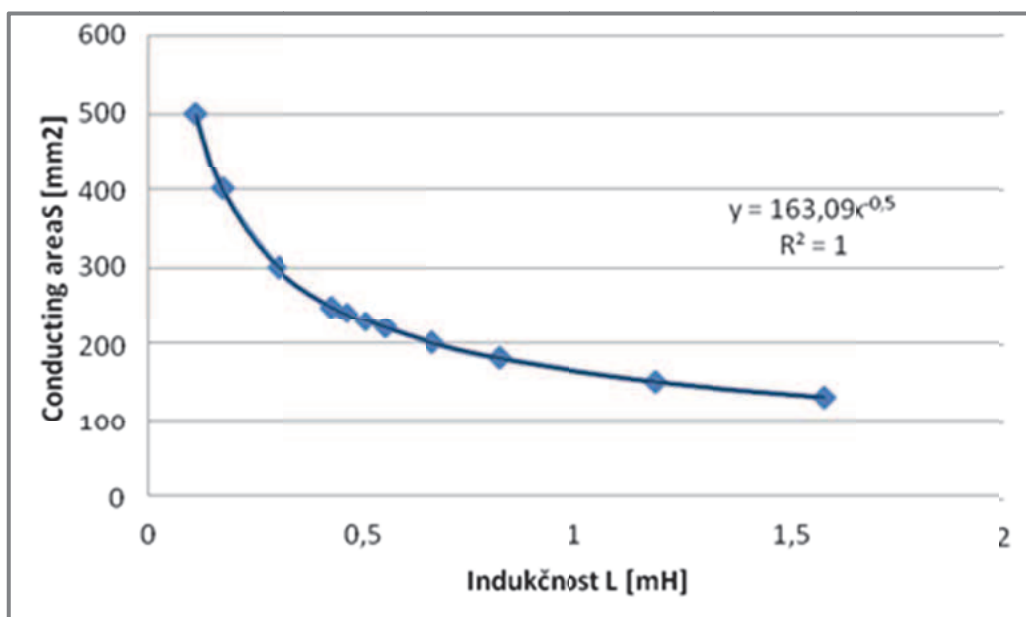


MKP výpočet byl také proveden pro proudové zatížení 3,36 A. Tímto způsobem se zjistí, jakou maximální magnetickou indukci můžeme v MR kapalině v našem magnetickém obvodu dosáhnout. Bylo vypočteno, že maximální magnetická indukce dosahuje 1,44 T.



Příloha II. - Určení conducting area

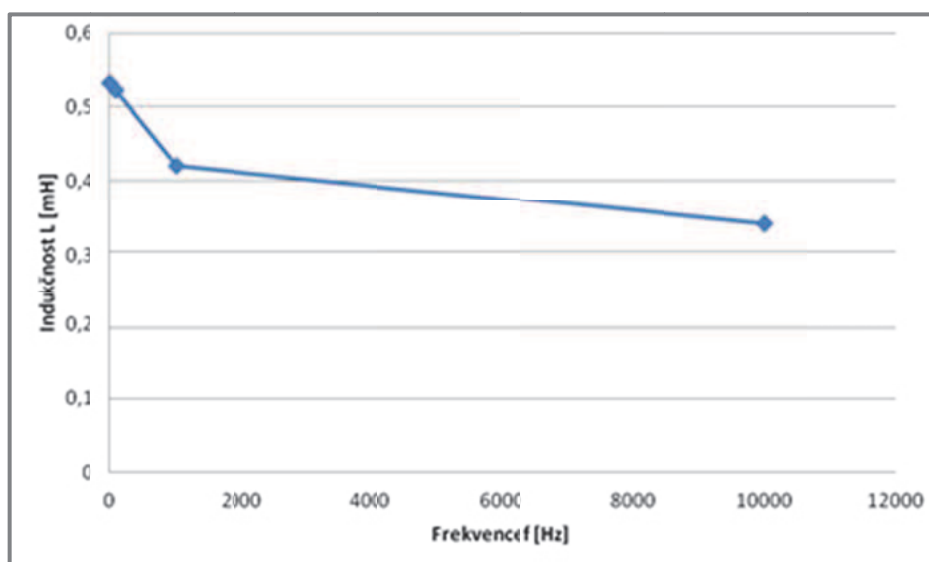
Na 3D MKP modelu cívky byla zjištěna mocninná závislost mezi parametrem conducting area a indukčností testované cívky. Tuto skutečnost ilustruje graf níže.



Mocninná závislost dle grafu je popsána vztahem:

$$S = \frac{163}{\sqrt{L}}$$

Dále bylo provedeno měření indukčnosti testované cívky na LCR můstku LCR-819 INSTRON. Cívka byla navinuta na hliníkovém nákržku.



Indukčnost cívky měřená na LCR můstku je ovlivněna budící frekvencí. Graf výše prezentuje naměřená data. Na LCR můstku byla proměřena indukčnost s minimálně možnou

frekvencí. Tendence grafu byla protáhnuta do hodnoty 0 Hz. Hodnota indukčnosti při nulové frekvenci $L = 0,5342$. Posléze se tato indukčnost dosadila do vztahu z MKP.

$$S = \frac{163}{\sqrt{0,5342}} = \frac{163}{0,7309} = 224mm^2$$

Conducting area testované cívky vypočtena na $224mm^2$.

Příloha III. – Proudová hustota

Hustota elektrického proudu nebo také proudová hustota je podíl elektrického proudu k průřezu vodiče. Pro dlouhodobě pracující cívky se tato hodnota volí v rozmezí od $2,5 \frac{A}{mm^2}$ do $3 \frac{A}{mm^2}$. Pro krátkodobou činnost je možné zvolit proudovou hustotu až $10 \frac{A}{mm^2}$. Maximální proud, kterým budeme zatěžovat cívku v MR uzlu je 3,36 A. Dle vztahu a výpočtu níže z proudové hustoty $3 \frac{A}{mm^2}$ byl zvolen průměr vodiče 1,2 mm.

$$J = \frac{I}{S_v} = \frac{4 \cdot I}{\pi \cdot d^2} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot I}{J \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,36}{3 \cdot \pi}} = \sqrt{1,42} = 1,19 \text{ mm}$$

Příloha IV. – APDL program

```
!Parametry
a=0.4          ! velikost sítě v železných částech
b=0.04         ! velikost sítě ve vzduchové mezeře
sr=0.5         ! sražení břitu
curdes=1770    ! proudová hustota A/mm2

!***** Konec parametry *****

/NOPR
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,1
KEYW,MAGNOD,1
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO

! ***** Geometrie *****

/PREP7
/PNUM,AREA,1
RECTNG,8.45,0,10,37 ! hřidel X1,X2,Y1,Y2
RECTNG,9.1,38.5,13,16 ! břit levý
RECTNG,9.1,38.5,31,34 ! břit pravý
RECTNG,9.5,14,16,31 !hliníkový nakružek
RECTNG,14,27.5,16,31 !cívka
RECTNG,38.5,35,16,31 !ukončení obvodu část vrchní
RECTNG,35,30,19,28 !ukončení obvodu část spodní
RECTNG,9.1,8.45,10,37 ! zjemnění mešče
RECTNG,9.1,9.5,16,31
k,101,9.1+sr,13          !sražení hran
k,102,9.1,13+sr
l,101,102,
l,102,5,
l,5,101
al,37,38,39
ASBA,2,10, „KEEP
k,103,9.1+sr,16          !sražení hran
k,104,9.1,16-sr
k,105,9.1,16
l,103,104,
l,103,105,
```

```

l,104,105,
al,5,8,42
ASBA,11,2, „KEEP
k,106,9.1+sr,31      !srazení hran
k,107,9.1,31+sr
k,108,9.1,31
l,106,107,
l,106,108,
l,108,107,
al,41,45,7
ASBA,3,11, „KEEP
k,109,9.1+sr,34      !srazení hran
k,110,9.1,34-sr
k,111,9.1,34
l,109,110,
l,110,111,
l,111,109,
al,9,12,48
ASBA,13,3, „KEEP

AGLUE,all              !slepení dohromady geometrie

ARSCALE,all, , ,0.001,0.001,1,    ! nastavení rozměrů na mm

! ***** Výběr prvku *****

ET,1,PLANE13           ! nastavení axisymetrie
!*
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,5,0
!*

! ***** Nastavení materiálu *****

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,1,,1      ! hliník

                                !Nelineární ocel

TB,BH,2,1,29,
TBPT,,0.210,0.187      ! A/mm , T
TBPT,,0.245,0.246
TBPT,,0.315,0.328
TBPT,,0.385,0.421
TBPT,,0.420,0.503

```

TBPT,,0.490,0.62
TBPT,,0.560,0.725
TBPT,,0.630,0.795
TBPT,,0.665,0.854
TBPT,,0.700,0.901
TBPT,,0.803,0.982
TBPT,,0.946,1.06
TBPT,,1.153,1.16
TBPT,,1.296,1.22
TBPT,,1.678,1.32
TBPT,,1.996,1.38
TBPT,,2.490,1.45
TBPT,,3.118,1.51
TBPT,,3.737,1.56
TBPT,,4.558,1.61
TBPT,,5.362,1.65
TBPT,,6.165,1.69
TBPT,,7.438,1.75
TBPT,,8.751,1.79
TBPT,,9.864,1.82
TBPT,,11.058,1.85
TBPT,,12.570,1.88
TBPT,,14.240,1.91
TBPT,,15.672,1.93

!konec nelinerání ocel

MPDATA,MURX,3,,1 ! měď
MP,RSVX,3,3.04878E-8 ! rezistivita mědi
MPDATA,MURX,4,,1 ! vzduch

! ***** Přirazení materiálu *****

AESIZE,18,1 !nastavení velikosti
MSHAPE,1 !nastavení tetrahedrů
AMESH,18
mat,2
AESIZE,20,a !nastavení velikosti
MSHAPE,1 !nastavení tetrahedrů
AMESH,20
AESIZE,21,a !nastavení velikosti
MSHAPE,1 !nastavení tetrahedrů
AMESH,21
AESIZE,19,a !nastavení velikosti
MSHAPE,1 !nastavení tetrahedrů
AMESH,19
AESIZE,1,a !nastavení velikosti
MSHAPE,1 !nastavení tetrahedrů
AMESH,1

AESIZE,7,a
MSHAPE,1 !nastaveni tetrahedrů
AMESH,7
mat,3
AESIZE,16,1
MSHAPE,1 !nastaveni tetrahedrů
AMESH,16
mat,4
AESIZE,10,b
MSHAPE,1 !nastaveni tetrahedrů
AMESH,10
AESIZE,15,b
MSHAPE,1 !nastaveni tetrahedrů
AMESH,15
AESIZE,13,b
MSHAPE,1 !nastaveni tetrahedrů
AMESH,13
AESIZE,3,b
MSHAPE,1 !nastaveni tetrahedrů
AMESH,3
AESIZE,22,b
MSHAPE,1 !nastaveni tetrahedrů
AMESH,22
AESIZE,17,b
MSHAPE,1 !nastaveni tetrahedrů
AMESH,17
LREFINE,44, , ,2,1,1,1 !Trojka znamená, jak moc zahustit
LREFINE,50, , ,2,1,1,1

! ***** Current density *****

BFA,16,JS, , ,curdes,0

! ***** Magnetic flux paralel *****

FLST,2,14,4,ORDE,14
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,-4
FITEM,2,22
FITEM,2,29
FITEM,2,31
FITEM,2,39
FITEM,2,-40
FITEM,2,48
FITEM,2,-49
FITEM,2,61
FITEM,2,63
FITEM,2,65

FITEM,2,-66
DL,P51X, ,ASYM

! ***** Solve *****

/SOL

MAGSOLV,0,5,0.001,

NLDIAG,NRRE,1

NLDIAG,EFLG,1

/POST1

PLF2D,27,0,10,1

PATH,rez,2,60,60,

PPATH,1,0,8.8,10,,0,

PPATH,2,0,8.8,35,,0,

PDEF, ,B,X,AVG

PDEF, ,B,Y,AVG

PLPATH,BX,BY

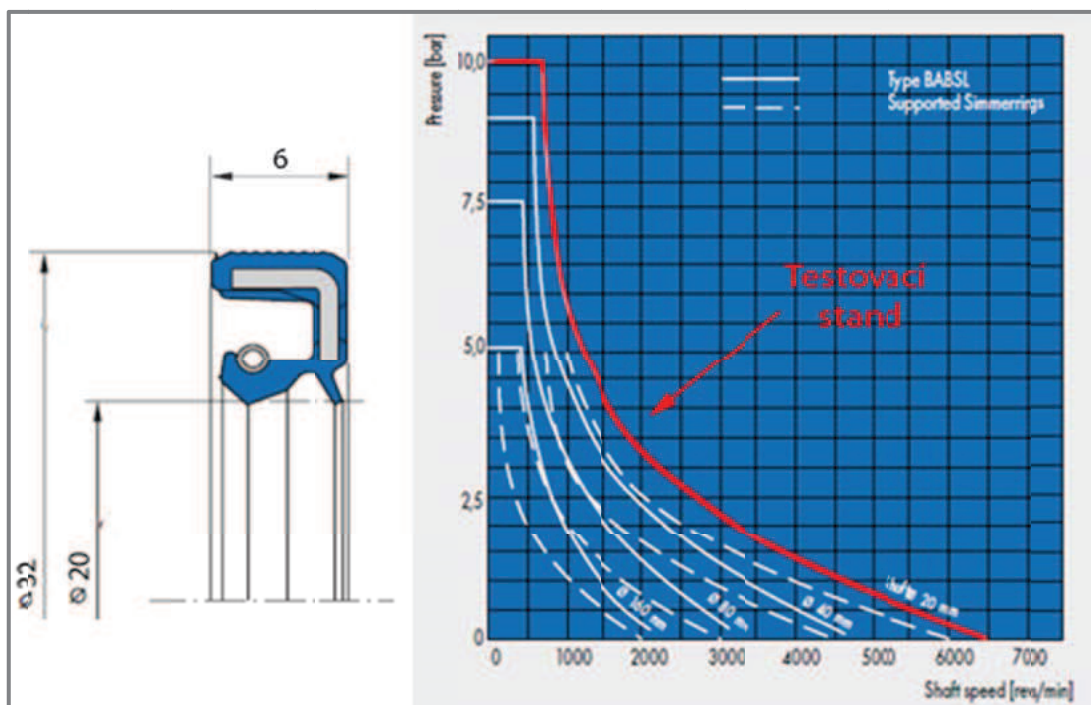
! Definovani nazvu cesty a počtu bodu na cestě

! Počáteční a koncové body cesty

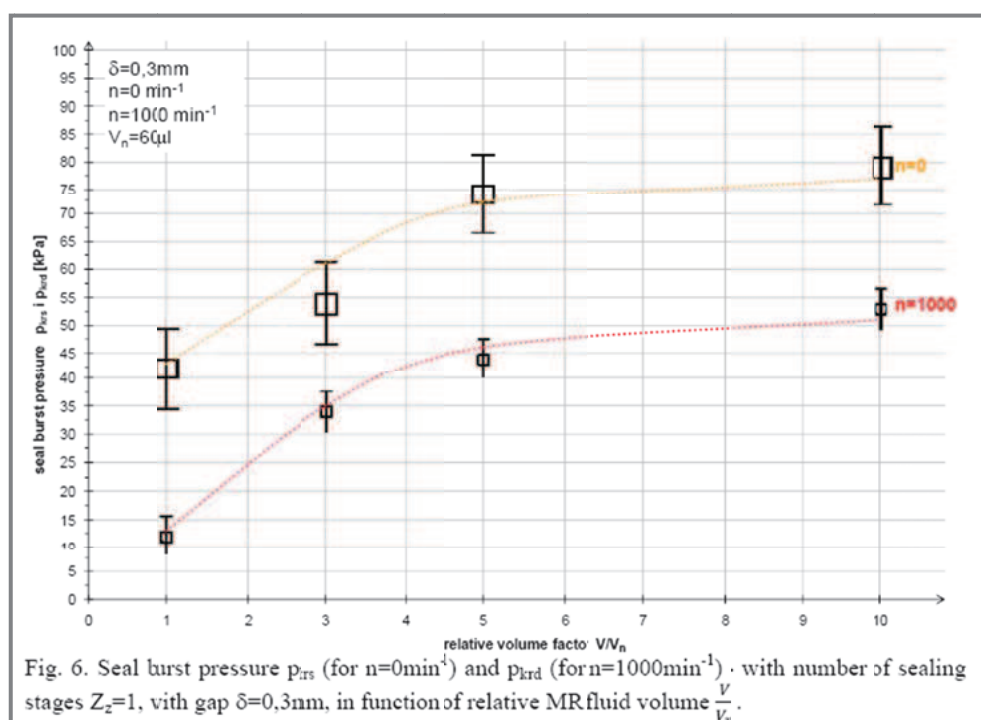
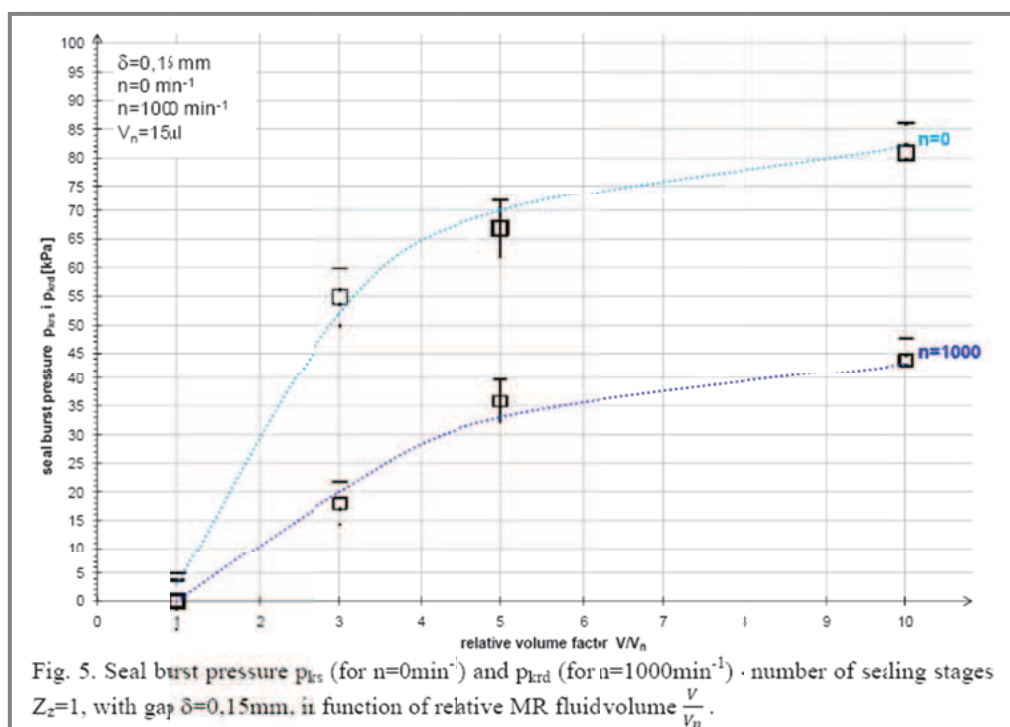
! Definovani B ve směru X

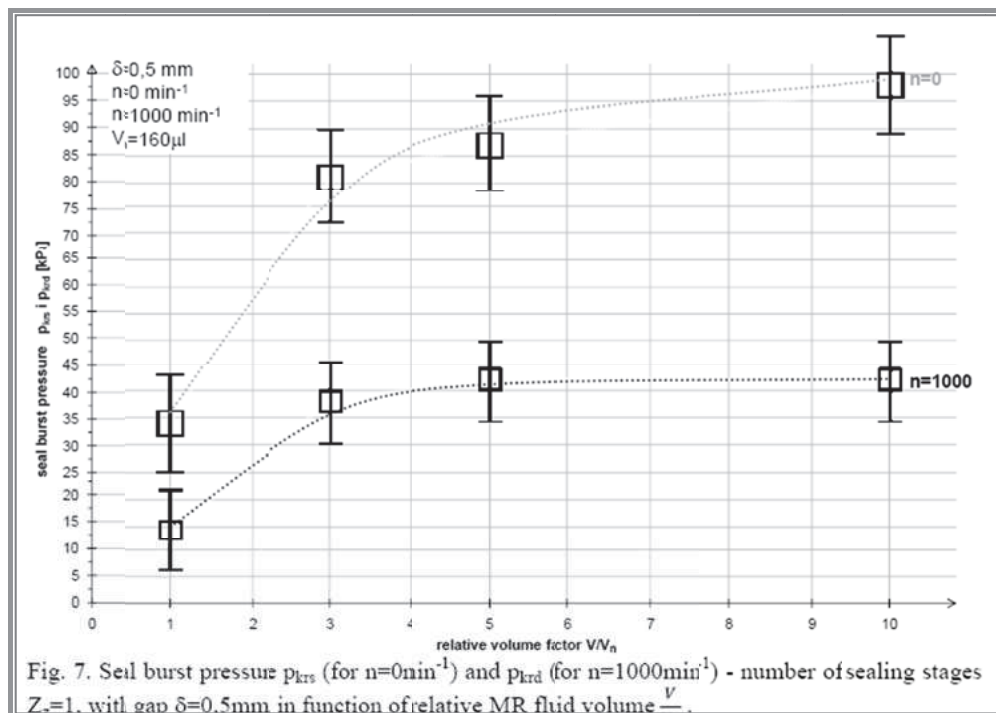
! Vykreslení

Příloha V. – p.v charakteristika těsnění



Příloha VI. – Grafické závislosti z článku [18]





Příloha VII. – Porovnání MKP a měření