



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

ÚPRAVA STÁVAJÍCÍ KONSTRUKCE MAGNETOREOLOGICKÉ SPOJKY

OPTIMIZATION OF THE EXISTING CONSTRUCTION OF MAGNETORHEOLOGICAL CLUTCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MIROSLAV BEDŘICH

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAKUB ROUPEC, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Miroslav Bedřich

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 bakalářské práce:

Úprava stávající konstrukce magnetoreologické spojky

v anglickém jazyce:

Optimization of the existing construction of magnetorheological clutch

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je konstrukční návrh rekonstrukce stávající MR spojky s těmito parametry: 10Nm při 3000 ot/min a budícím proudem 2,5A. Rekonstrukce MR spojky bude zaměřena na tyto problematické části stávající konstrukce: přesné uložení výstupní hřídele vyšší pevnost hřídele při zachování stávajících rozměrů snížení hmotnosti naddimenzovaných částí MR spojky vhodnější postup plnění spojky MR kapalinou.

Cíle bakalářské práce:

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

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulaci řešeného problému a jeho technickou a vývojovou analýzu
4. Vymezení cílů práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Návrh variant řešení a výběr optimální varianty
7. Konstrukční řešení
8. Závěr (Konstrukční, technologický a ekonomický rozbor řešení)

Forma práce: Průvodní zpráva, výkresová dokumentace

Typ BP: konstrukční

Účel zadání: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

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] CARLSON, J. D. Critical factors for MR fluids in vehicle systems. International Journal of Vehicle Design. 2003, 33, 1-3, s. 207-217.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 15.12.2011

L.S.

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

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá rekonstrukcí magnetoreologické (MR) spojky. V první části byl vypracován rozsáhlý průzkum využití magnetoreologické technologie v praxi. Byly popsány principy funkce MR tlumičů, MR brzd a MR spojek. Dále byly vypsány a porovnány některé parametry MR spojek. Druhá část se zabývá konstrukčními úpravami pro zlepšení některých parametrů MR spojky. Ve třetí části byly provedeny experimenty ověřující zlepšení provozních parametrů MR spojky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologická kapalina, MR, spojka, brzda, tlumič, kroutící moment

ABSTRACT

This work deals with the reconstruction of magnetorheological (MR) clutch. The extensive research on the use of magnetorheological technology in practice was developed in the first part. The function of MR dampers, MR brakes and MR clutches were described. Some parameters of MR clutches were listed and compared. The second part concentrates on construction modifications to improve some parameters of MR clutch. The experiments verifying improvement of operating parameters of MR clutch were carried out in the third part.

KEY WORDS

Magnetorheological fluid, MR, clutch, brake, damper, torque

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BEDŘICH, M. *Úprava stávající konstrukce magnetoreologické spojky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 74 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Roupec, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci „Úprava stávající konstrukce magnetoreologické spojky“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce Ing. Jakuba Roupce Ph.D. a v seznamu jsem uvedl všechny literární a odborné zdroje.

V Brně 24. Května 2012

Miroslav Bedřich

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto způsobem poděkoval vedoucímu práce Ing. Jakubu Roupcovi, Ph.D. za jeho ochotu, odborné vedení, věcné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| 1. ÚVOD | 13 |
| 2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ..... | 14 |
| 2.1. MR kapalina..... | 14 |
| 2.2. MR efekt | 15 |
| 2.3. Režimy zatěžování MR kapalin | 15 |
| 2.4. Použití MR technologie | 17 |
| 2.4.1. Tlumiče..... | 17 |
| 2.4.2. Brzdy | 20 |
| 2.4.3. Další aplikace | 23 |
| 2.5. Koncepce MR spojek..... | 25 |
| 2.5.1. Spojky s axiální mezerou..... | 26 |
| 2.5.2. Spojky s radiální mezerou | 32 |
| 2.5.3. Shrnutí současného stavu poznání..... | 33 |
| 3. FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU, JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA..... | 36 |
| 3.1. Hmotnost..... | 36 |
| 3.2. Plnění MR kapaliny | 36 |
| 3.3. Teplota | 36 |
| 3.4. Házení rotoru | 36 |
| 4. VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE | 37 |
| 5. NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ..... | 38 |
| 5.1. Konstrukční..... | 38 |
| 5.2. Experimentální ověření magnetického pole..... | 38 |
| 5.3. Experimentální ověření provozních parametrů..... | 39 |
| 6. NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY | 40 |
| 6.1. Uložení hřídele v levé části..... | 40 |
| 6.1.1. Kombinované jehlové ložisko | 41 |
| 6.1.2. Kombinace jehlového a axiálního kuličkového ložiska | 42 |
| 6.1.3. Kombinace jehlového a axiálního jehlového ložiska | 43 |
| 6.1.4. Volba těsnění | 44 |
| 6.2. Uložení rotoru v pravé části..... | 44 |
| 6.2.1. Úprava stávající koncepce | 45 |
| 6.2.2. Kombinace jehlového a axiálního kuličkového ložiska v přírubě..... | 46 |
| 6.3. Chlazení | 47 |
| 6.3.1. Chlazení vzduchem..... | 47 |
| 6.3.2. Chlazení kapalinou | 48 |
| 6.4. Výběr optimální varianty | 49 |
| 7. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ..... | 51 |
| 7.1. Hřídel | 51 |
| 7.2. Uchycení lamel rotoru | 54 |
| 7.3. Příruba ložisek | 57 |
| 7.4. Modernizace uchycení částí statoru..... | 58 |

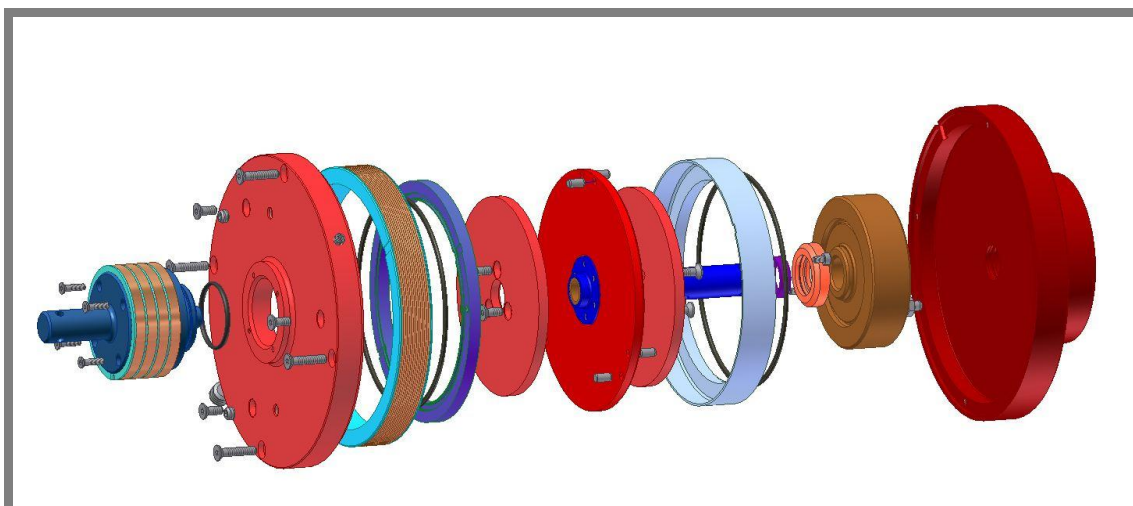
| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7.5. | Plnění pracovní mezery | 60 |
| 7.6. | Konstrukce vzduchového chlazení | 61 |
| 7.7. | Montáž | 61 |
| 7.8. | Experimentální ověření provozních parametrů | 64 |
| 7.8.1. | Experimentální měření magnetického pole | 64 |
| 7.8.2. | Experimentální měření kroutícího momentu | 67 |
| 7.8.3. | Experimentální měření teploty | 70 |
| 7.9. | Hmotnostní rozvaha | 72 |
| 7.10. | Ekonomická rozvaha | 73 |
| 8. | ZÁVĚR | 74 |
| 8.1. | Splnění cílů | 74 |
| 8.2. | Doporučení pro další vývoj | 74 |

1. ÚVOD

Současné trendy směřují k nahrazování klasických mechanických komponent tzv. smart prvky. Jedná se o prvky se snadnou regulací jejich mechanických vlastností elektrickým signálem. Jedním z nich je magnetoreologická (MR) kapalina. Tato kapalina se vyznačuje rychlými a reverzibilními změnami reologických vlastností. U této kapaliny můžeme pomocí magnetického pole plynule měnit její viskozitu a mez kluzu.

Díky svým vlastnostem se objevuje čím dál více v různých průmyslových aplikacích, jako jsou spojky, brzdy, tlumiče aj.

Tato práce se zabývá rekonstrukcí již sestavené MR spojky s axiální mezerou, která byla zkonstruována v roce 2011 na Ústavu konstruování. Spojka má být v budoucnu použita pro testování MR kapalin.



Obr. 1.1 Původní konstrukční provedení MR spojky

2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

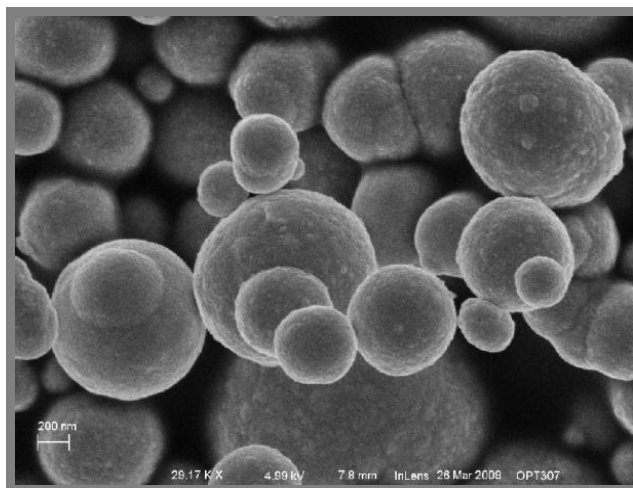
2.1. MR kapalina

Jedná se o suspenzi složenou z feromagnetických částic, nosných kapalin a aditivních přísad.

Nosná kapalina může být voda, olej, glycerín nebo silikon. Nosné kapaliny mají velký vliv na trvanlivost a výsledné vlastnosti. Zabírají asi 60-80% objemu kapaliny [1]. Nejčastěji používané nosné kapaliny jsou uhlovodíkové oleje, které mohou být minerální nebo syntetické. Při použití vody, jako nosné kapaliny, nastává problém s oxidací a korozí feromagnetických částic. Je však velmi levná a má dobrý viskózní index.

Nejčastěji používané feromagnetické částice jsou práškové železo, magnetit, nikl, ferit, aj. Částice mají většinou tvar kuliček, nabývají velikosti od 3 do 8 μm a tvoří asi 20 – 40% objemu kapaliny.

Aditivní přísady zajišťují lepší vlastnosti kapaliny, zabraňují sedimentaci feromagnetických částic a zlepšují jejich mísivost. Sedimentace feromagnetických částic má neblahý vliv na vlastnosti MR kapaliny v aktivovaném stavu [2].



Obr. 2.1 Mikroskopický snímek MR kapaliny [3]

Magnetoreologické kapaliny patří do skupiny tzv. chytrých materiálů. Vlastnosti MR kapalin jsou výrazně ovlivňovány velikostí magnetického pole, kterému jsou vystaveny. Za normálních podmínek (neaktivovaný stav) se MR kapalina chová jako obyčejná tekutina. Za působení magnetického pole na MR kapalinu (aktivovaný stav) nastává MR efekt (popsáno níže). V aktivovaném stavu může být změna magnetického pole velmi přesně ovládána mez kluzu. Výsledkem pak je, že tekutina má schopnost přenášet sílu. MR tekutiny v silně aktivovaném stavu mají téměř srovnatelné vlastnosti s tuhými látkami a to až do meze kluzu. Tato mez kluzu závisí na velikosti magnetického pole, ve kterém se MR kapalina nachází. Existuje jistá hranice, po které další zvyšování magnetického pole nemá žádný efekt, protože kapalina je magneticky přesycena.

MR kapaliny se chová jako Binghamský plast a řídí se rovnicí [4]:

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (1)$$

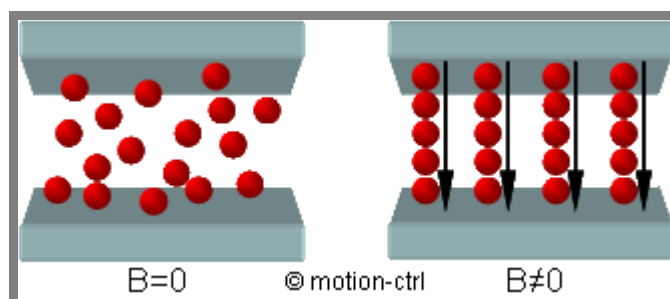
Kde:

| | | |
|----------------|--------------------|-----------------------|
| τ | [MPa] | - smykové napětí |
| τ_0 | [MPa] | - mez kluzu |
| η | [Pa.s] | - dynamická viskozita |
| $\dot{\gamma}$ | [s ⁻¹] | - smykový spád |

2.2. MR efekt

2.2

Magnetoreologický efekt probíhá u MR kapalin za působení magnetického pole. Původně rozptýlené magnetické mikročástice obsažené v MR kapalině se vlivem magnetického pole začnou uspořádávat ve směru siločar magnetického pole a začnou tvořit řetězce (Obr. 2.2). Při tomto jevu se výrazně mění viskozita a mez kluzu MR kapaliny. Skupenství kapaliny se mění z tekutého na polotuhé až tuhé. Kapalina se chová jako viskoplastická látka. U většiny aplikací je také důležitý opačný proces, tedy že kapalina ztratí své nově nabyté vlastnosti a vrátí se do původního stavu. Původního stavu dosáhneme tak, že již kapalinu nevystavujeme magnetickému poli. Celý proces přechodu kapaliny z neaktivovaného stavu na aktivovaný stav se děje téměř okamžitě [2].



Obr. 2.2 Chování MR částic v magnetickém poli [5]

2.3. Režimy zatěžování MR kapalin

2.3

MR kapaliny jsou používány ve třech hlavních provozních módech:

Ventilový mód

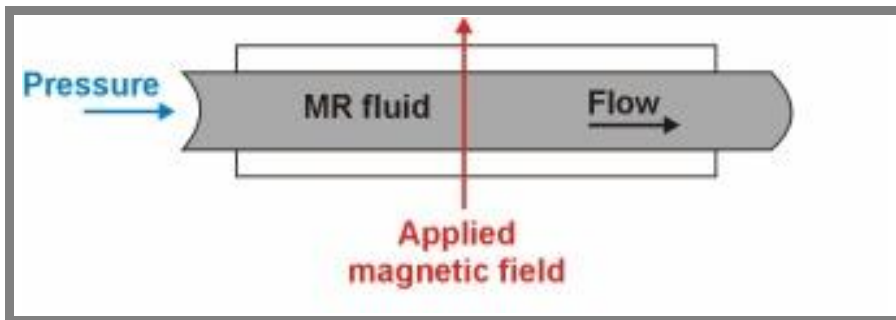
Smykový mód

Tahově - tlakový mód

Ventilový mód

Tekutina proudí pod tlakovým spádem mezi dvěma pevnými, rovnoběžnými deskami. Odolnost proti proudění tekutiny je řízena změnou magnetického pole.

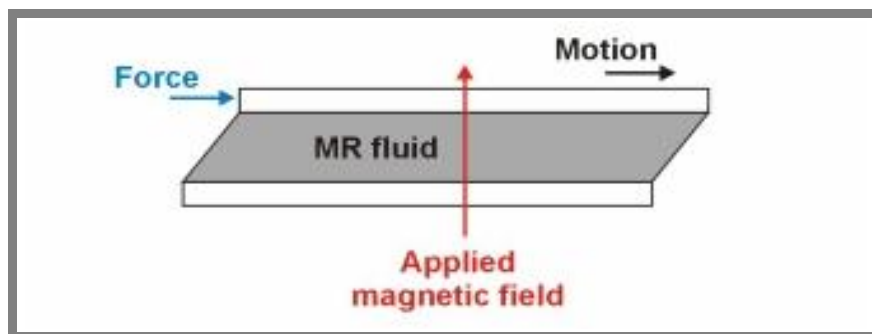
Zařízení používající tento způsob provozu jsou různé klapky, tlumiče, regulátory a ventily.



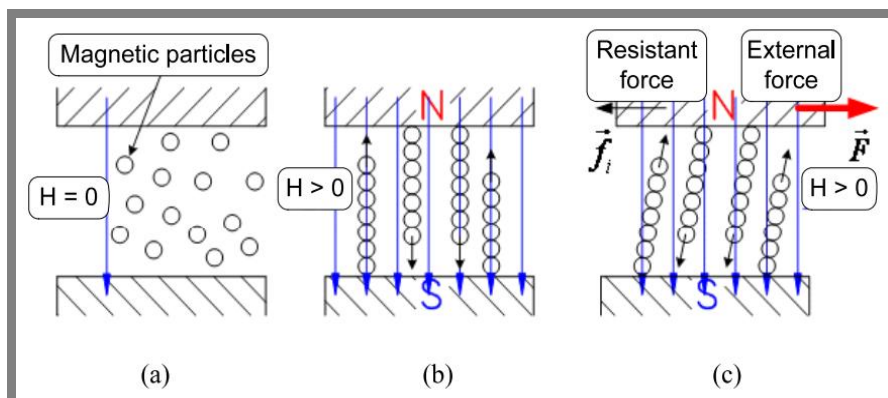
Obr. 2.3 Ventilový mód

Smykový mód

Tekutina se nachází mezi dvojicí pohyblivých desek. Magnetické pole působí kolmo na tyto pohyblivé desky. Namáhání kapaliny je na prostý smyk. Tenhle mód se uplatňuje hlavně u spojek, brzd, zajišťovacích zařízení a rotačních tlumičů.



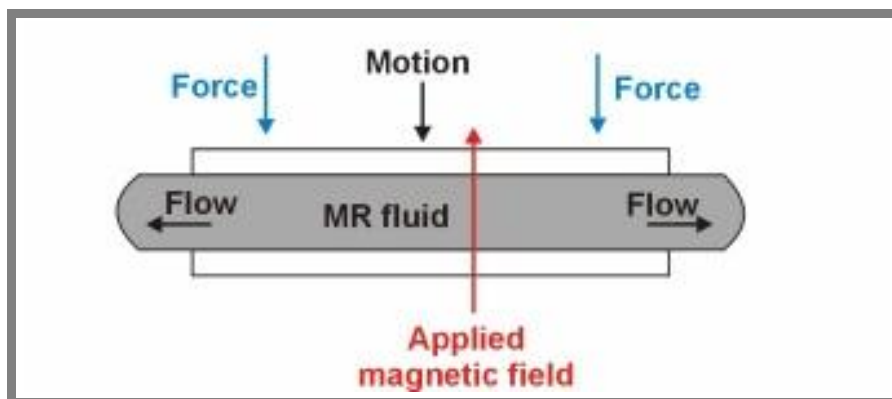
Obr. 2.4 Smykový mód



Obr. 2.5 a) Bez magnetického pole, b) S magnetickým polem bez zatížení, c) S magnetickým polem se zatížením

Tahově – tlakový mód

Jedna deska a kapalina jsou v klidu a druhá deska kmitá s malou amplitudou. Relativní posunutí je kolmé ke směru proudění. Tahově – tlakový mód je vhodnější pro řízení malých, milimetrových posuvů za působení velkých sil. Tento konkrétní mód je nejméně využíván a byl zatím nejméně prozkoumán. Používá se pro tlumiče vibrací a rázů o malé amplitudě.



Obr. 2.6 Tahově-tlakový mód.[7]

2.4. Použití MR technologie

2.4

V současné době se zařízení využívající MR technologii vyskytují stále častěji.

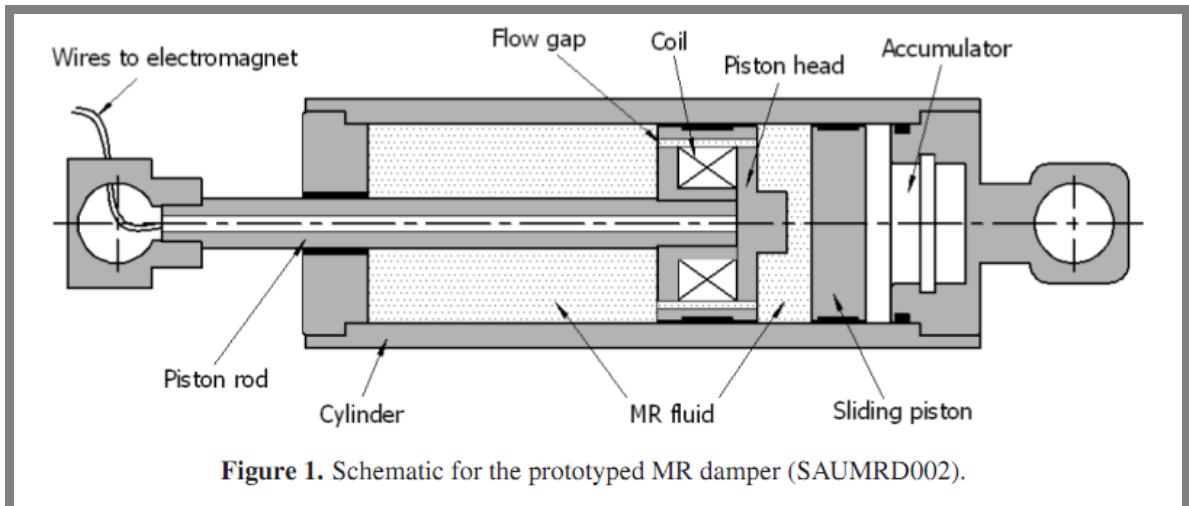
2.4.1. Tlumiče

2.4.1

Tlumení vibrací je problém, který se neustále vyvíjí. Vibrace mají neblahý vliv na funkčnost mnoha aplikací a na komfort, a proto se snažíme vibrace co nejvíce eliminovat. Použití MR technologie pro tlumení vibrací je skvělou alternativou hydrodynamických koncepcí. Její výhody spočívají v tom, že můžeme elektronicky měnit intenzitu tlumení tak, abychom dosáhli optimálního výsledku. MR tlumiče také disponují kratší dobou odezvy, řádově 3x rychlejší než konvenční tlumiče. Další výhodou je relativně nízký příkon. Tlumiče mohou pracovat i v fail-save (nefunkčně-bezpečný) módu, jako klasický pasivní tlumič (nedá se nastavovat tuhost). Nevýhodou je vyšší cena.

Přímý tlumič

Největší rozmach MR tlumičů je v automobilovém průmyslu, kde pomocí řídicí jednotky lze měnit tuhost podvozku v závislosti na situaci, důležité faktory jsou například: styl jízdy, stav vozovky nebo hmotnost nákladu.

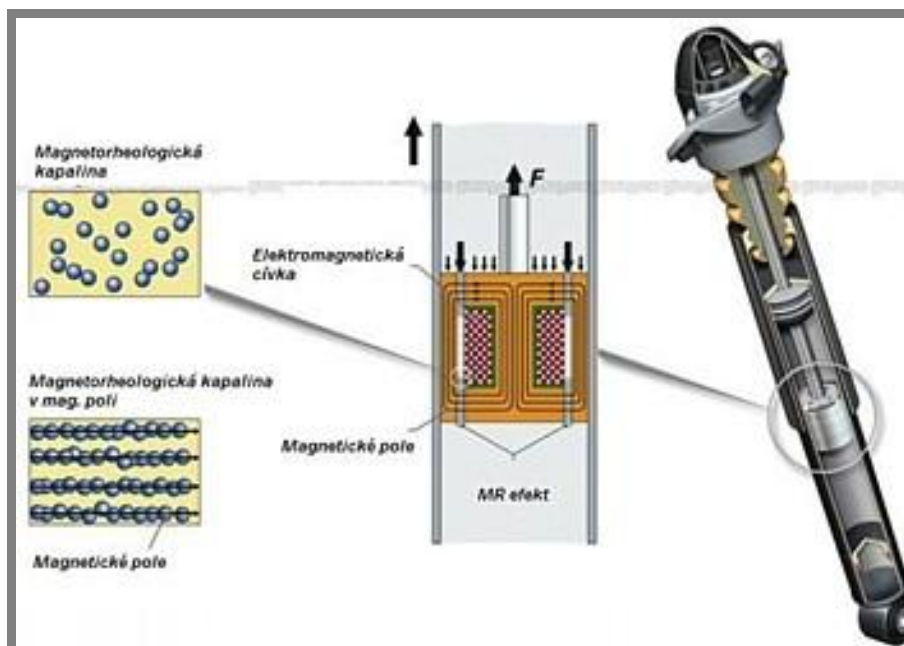


Obr. 2.7 Přímý MR tlumič

Magnetoreologické tlumiče pracují ve ventilovém režimu. Základní části těchto tlumičů jsou: Hydraulický válec, píst, budící cívka a MR kapalina.

Při pracovním pohybu pístu z levé úvrati do pravé úvrati protéká MR kapalina kanálkami v pístu. V pístu je navinutá cívka, která generuje magnetické pole v závislosti na procházejícím proudu. Vlivem tohoto magnetického pole MR kapalina zvyšuje svoji viskozitu a tím dochází k zabraňování pohybu pístu [9].

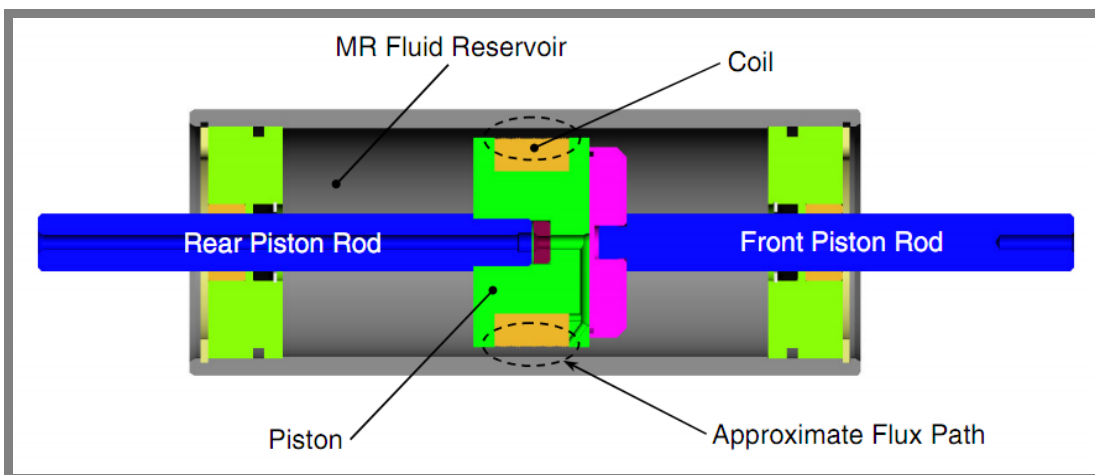
Takto koncipované tlumiče se mohou využívat například pro tlumení intenzivních vibrací, kterými jsou namáhány například sedadla v kamionech nebo zavěšení kol automobilů. Tlumiče pracující na tomto principu používají pro tlumení zavěšení kol například automobily značky Chevrolet Corvette, Audi TT, Ferrari, Cadillac, BMW aj.



Obr. 2.8 MR tlumič z Audi TT [8]

Oboustranný tlumič

Oboustranný tlumič je podobné konstrukce, jako přímý tlumič jednostranný, jen s tím rozdílem, že má pístní tyče vyvedené na obou koncích. Oboustranný tlumič nepotřebuje akumulátor, protože zde nedochází k změnám objemů na jednotlivých stranách. Je to dáno tím, že objem pístní tyče, který se na jedné straně zasouvá, se na druhé straně vysouvá. Tohle tvrzení ovšem platí za předpokladu, že obě pístní tyče mají stejný průměr. Oboustranné tlumiče se používají pro stabilizaci budov při zemětřesení a tlumení zpětného rázu zbraní.



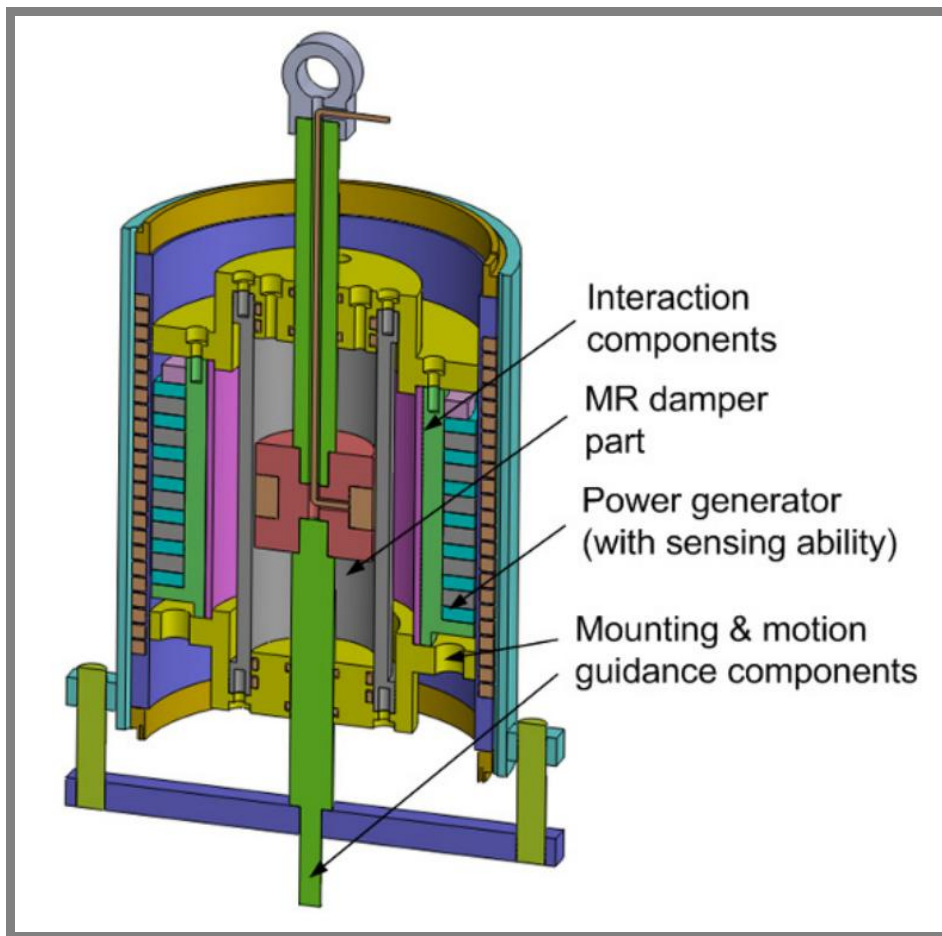
Obr. 2.9 Oboustranný tlumič [10]

Tlumič s generátorem napětí

Na obr. 2.10 je znázorněn oboustranný tlumič, který v sobě nese hned 3 technologie: MR tlumení, generování energie pro vlastní chod a snímání dynamických veličin. Tenhle inteligentní tlumič sám reguluje tlumící sílu a zároveň využívá energii uloženou ve vibracích pro vlastní chod. Navíc detekuje dynamické informace pro řídicí systém.

Vnitřní magnet sestavy elektrického generátoru je připojen k válci MR tlumiče. Vnější část elektrického generátoru je připojena k pístní tyči. Když se píst pohybuje vlivem vnějšího buzení, nastanou dva relativní pohyby. Vnější část sestavy elektrického generátoru se pohybuje zároveň s pístnicí, takže nastává relativní pohyb mezi vnitřní a vnější částí generátoru. Protože vnější část představuje cívku a vnitřní část magnetické jádro, tak při jejich relativním pohybu se na vnější cívce generuje napětí. Takhle vzniká elektrická energie. Současně dochází k relativnímu pohybu mezi pístem a válcem tlumiče, při kterém dochází k tlumení vibrací, jako u klasického MR tlumiče. Při využití získané elektrické energie může řídicí algoritmus nastavit vstupní proud do MR tlumiče. Pomocí relativního posunu mezi vnější cívku a vnitřním magnetickým jádrem, lze díky přepočtům určit dynamické veličiny.

Tato koncepce sebou nese velké výhody jako je úspora energie, nižší cena, menší velikost a nižší hmotnost.



Obr. 2.10 Tlumič s generátorem napětí [11]

2.4.2. Brzdy

Konvenční pasivní brzdy se časem opotřebují, což snižuje jejich brzdný výkon. Chceme-li využívat vždy nové třecí plochy s ovládním třecího výkonu za použití nízkých energií, pak mohou být pro nás MR brzdy dobrou alternativou. Magnetoreologické brzdy používané v automobilovém průmyslu se také mohou nazývat „Brake-by-wire“ neboli brzdy po drátě. Brake-by-wire nahrazují mechanické spojení brzdového pedálu s brzdovým válcem na každém kole elektrickými součástkami. V první generaci používání těchto brzdy se instalovaly i hydraulické brzdy z bezpečnostních důvodů, kdyby došlo k elektronické poruše. V druhé generaci již není nutné používat zálohovací hydraulické brzdy, protože elektronické systémy Brake-by-wire mají k dispozici systém odolný oproti chybám. Také mohou mít dílčí elektronickou řídicí jednotku v každém kole, které umožňují specifické nezávislé brzdění kola.

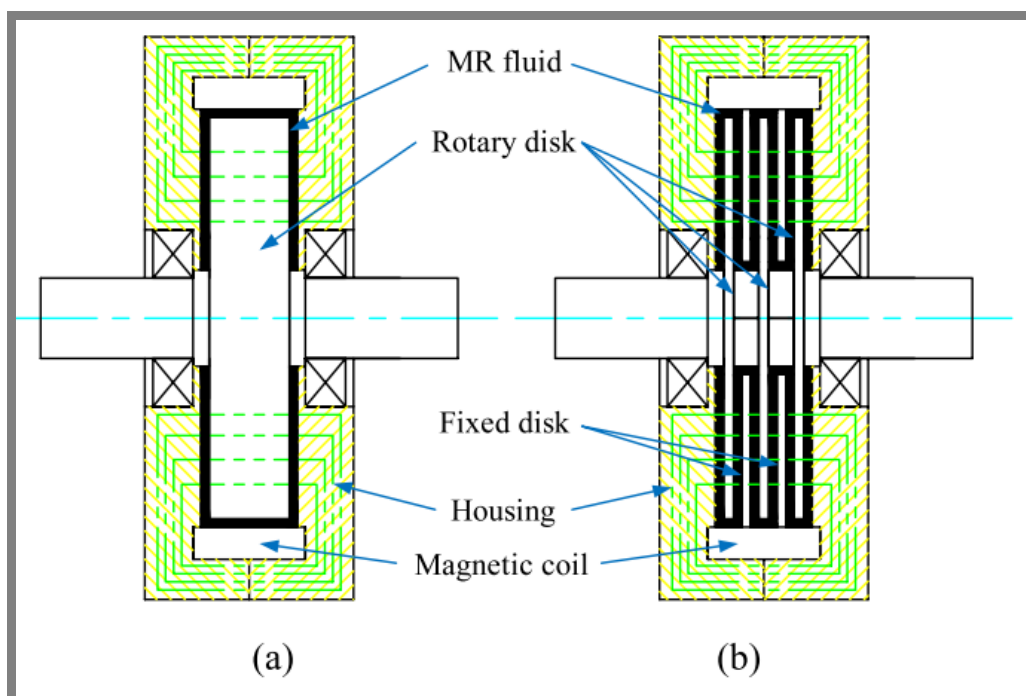
Tyhle brzdy mají oproti stávajícím brzdám hned několik výhod: vlastnosti a chování brzdy se dá lehce nastavit změnou softwaru, snadnější integrace kontrolních funkcí jako jsou protiblokový systém ABS, systém řízení stability vozu VSC a elektronická parkovací brzda EPB. Mezi další výhody MR brzd je výrazně kratší doba odezvy oproti klasickým hydraulickým brzdám.

Magnetoreologické brzdy pracují ve smykovém režimu. Magnetoreologická brzda se skládá ze vstupního hřídele, osazeného rotorovými lamelami, a statorové části, osazené statorovými lamelami. Statorové a rotorové lamely jsou od sebe odděleny mezerou, kterou vyplňuje MR kapalina. Po obvodu statorové části je navinuta cívka, která při průtoku proudu vyvolá magnetické pole. Brzdný moment tvoří MR kapalina změnou své viskozity.

Zvyšování brzdného momentu lze docílit:

- Přidáním více lamel
- Použitím MR kapalin s vysokou mezí kluzu
- Zvýšením viskozity MR kapaliny
- Snížením mezilamelové mezery

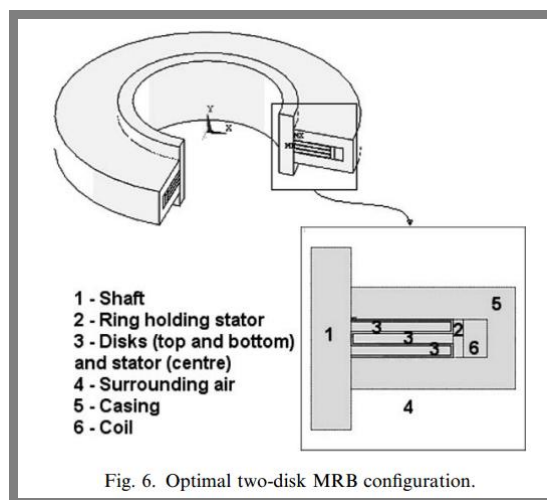
Snížování mezilamelové mezery má za následek vyšší zbytkový moment v neaktivovaném stavu [12].



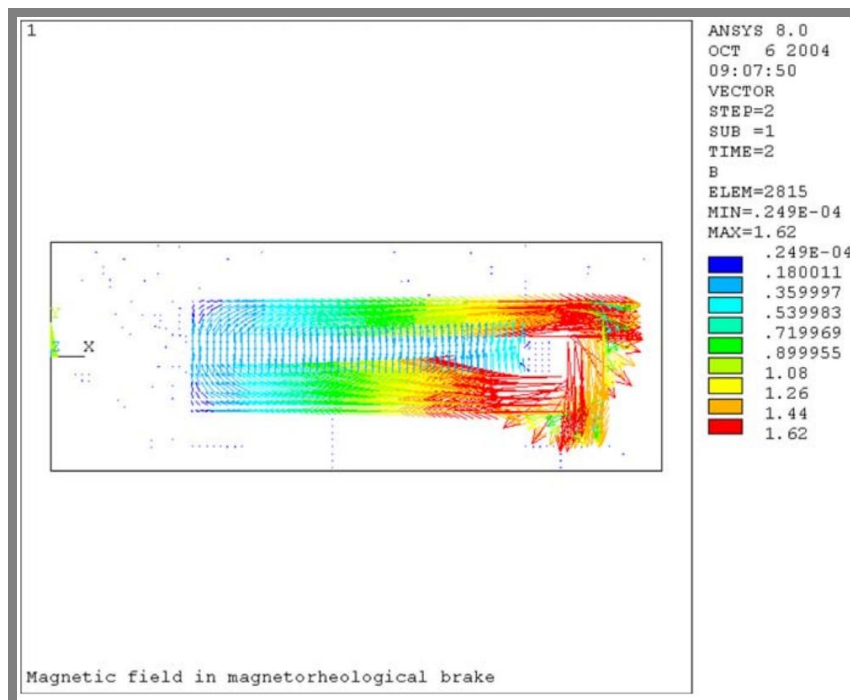
Obr. 2.11 a) Jednolamelová brzda; b) Vícelamelová brzda [6]

Na obr 2.12 je uvedena MR brzda jejíž provozní parametry jsou: [12]

- Průměr brzdy..... Ø168 mm
- Počet lamel..... 4
- Maximální proud..... 12 A
- Počet závitů drátu..... 80
- Velikost mezery..... 1 mm
- Váha..... 27,9 kg
- Max. kroutící moment..... 1013 N.m
- MR kapalina od firmy Lord Corporation na bázi uhlovodíků MRF-132AD



Obr. 2.12 Schéma MR brzdy



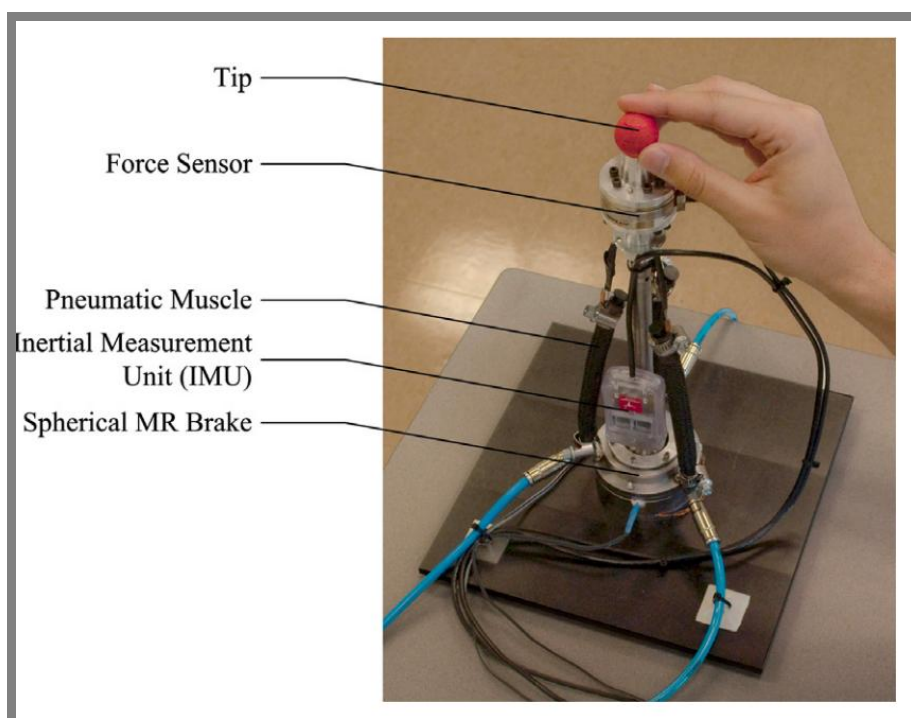
Obr. 2.13 Průběh magnetického toku

2.4.3. Další aplikace

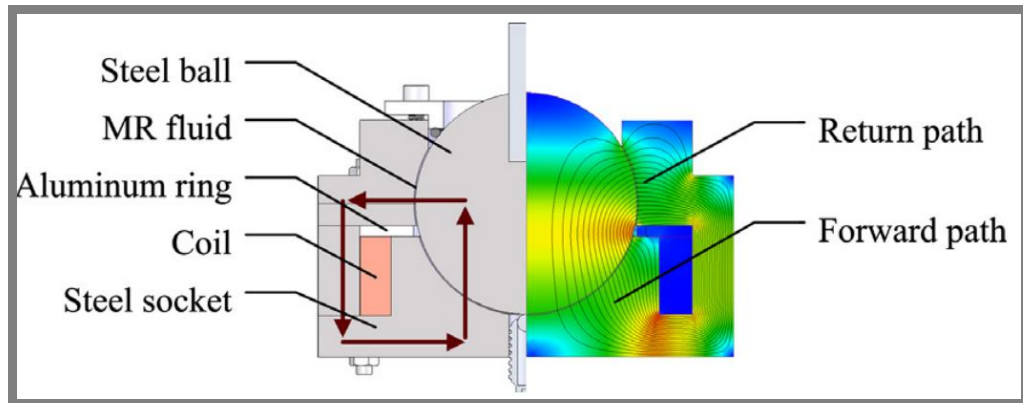
Haptic joystick [13]

Další aplikací MR technologie může být například hmatový joystick, který uživateli poskytuje silovou odezvu. Nejběžnější způsob ovládání těchto joysticků je pomocí elektrických motorů. Tyto elektrické motory disponují vysokou rychlostí a polohovou přesností a nízkými náklady. Mají ale jednu podstatnou nevýhodu. Tou je nízký poměr momentu ku hmotnosti, který výrazně omezuje síla na horní části joysticku. Když je poměr malý, může se joystick převrhnout.

Tahle nevýhoda je vyřešena použitím MR kulové brzdy v kombinaci s pneumatickými svaly. U takto koncipovaných joysticků jsou hmotnost i přenášený moment vyšší, při zachování stejných rozměrů. Díky vysokému přenosovému momentu kulové MR brzdy dokážou joysticky skvěle stimulovat pevné srážky. Vzhledem k pasivnímu charakteru kulových MR brzd nemohou přidávat energii do systému, takže nemohou poskytnout vratnou sílu pro simulaci elastické srážky. Proto se používají MR kulové brzdy v kombinaci s pneumatickými svaly. Pneumatické svaly převádějí pneumickou energii na mechanickou podle přenášeného tlaku uvnitř pružného měchýře. Pneumatické svaly jsou schopny dodat sílu do systému, takže můžou dokonale simulovat jak pevné tak elastické srážky. Tyhle joysticky se uplatňují hlavně v aplikacích, jako jsou počítačové hry, vojenské nebo lékařské odborné operace.



Obr. 2.14 Hmatový joystick

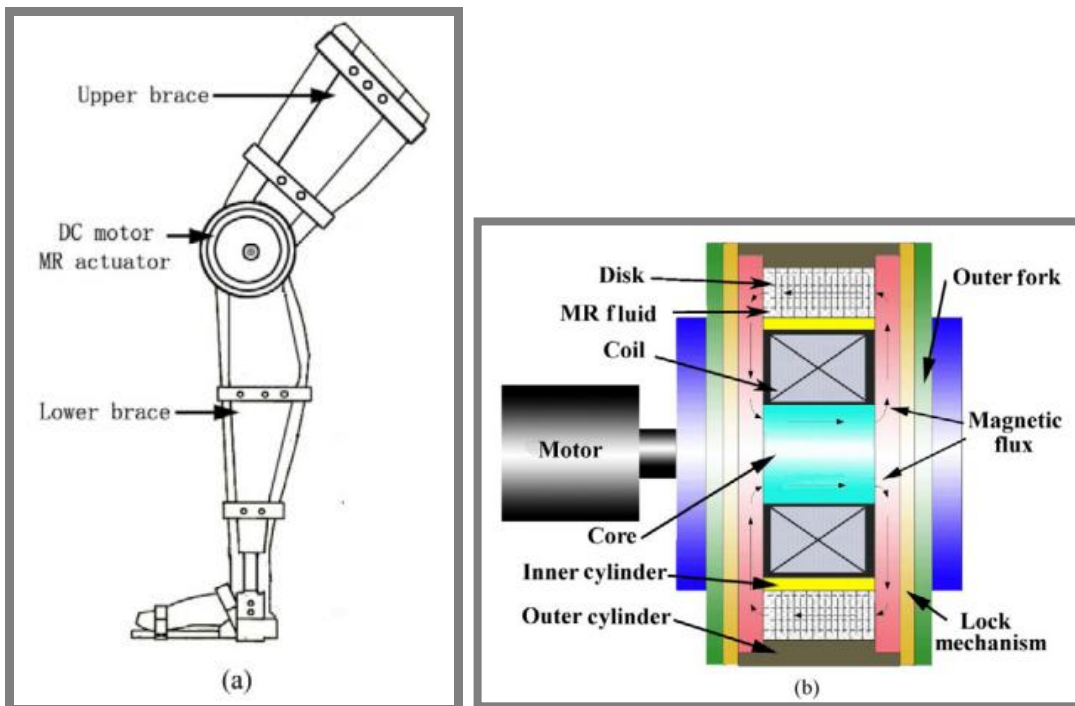


Obr. 2.15 Schéma hmatového joysticku

Magnetorheological knee [14]

Další využití MR technologie jsou kloubní protézy.

Kolenní protéza se skládá ze stejnosměrného motoru, vnějšího válce se satorovými lopatkami, MR kapaliny, vnitřního válce s rotorovými lopatkami, hřídele a cívky. Stejnosměrný motor v případě potřeby poskytuje kroučící moment. Motor je spojen pomocí hřídele s vnitřním válcem. Vnější válec je připojen na horní část končetiny a vnitřní válec s dolní. Cívka je umístěna ve vnitřním válci. MR kapalina, vyplňující prostor mezi rotorovými a satorovými lopatkami přenáší kroučící moment a je zatěžována smykovým módem.



Obr. 2.16 Kolenní kloub a) Schéma končetiny; b) Schéma kloubu

Pracovní cyklus kolenní protězy se skládá ze tří stavů:

- Hřídel je pevně spojena se spodní částí končetiny a spojkou protéká magnetický tok. MR přístroj působí jako brzda, která může kontrolovat brzdný moment.
- Neprotéká magnetický tok. MR přístroj nepracuje a kolenním kloubem se dá volně otáčet.
- Hřídel je odpojena od dolní části končetiny. Zatímco motor pracuje, magnetický tok protéká. Jakmile je hřídel odemčena od dolní části končetiny, může motor otočit s dolní částí nohy. Přístroj se tedy chová jako spojka pro přenos kroutícího momentu.

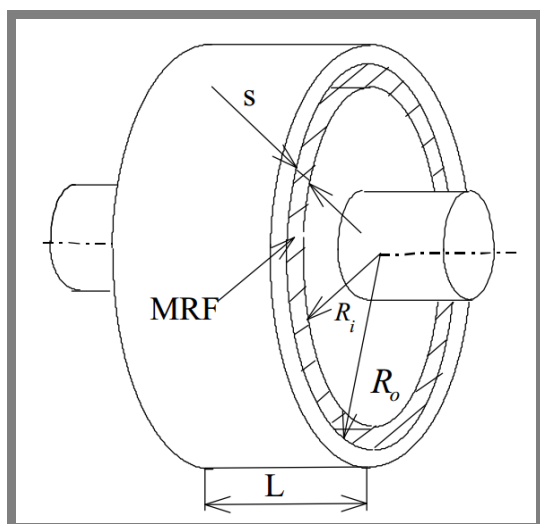
Takto zkonstruovaný kloubní preparát dokáže přenést kroutící moment až 30Nm při proudu 1,8A.

2.5. Koncepce MR spojek

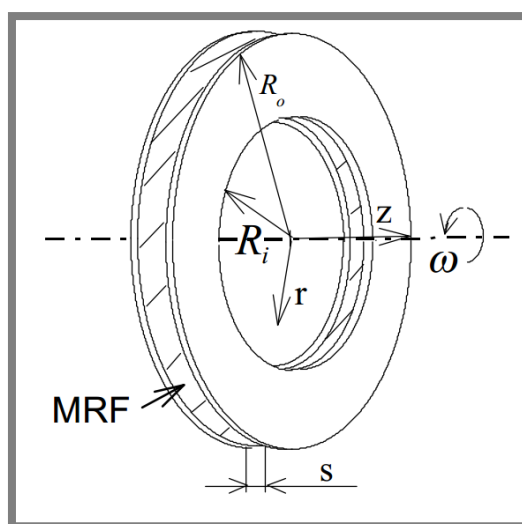
2.5.

MR spojky obecně pracují obdobně jako MR brzdy v tzv. smykovém režimu. Skládají se ze vstupního hřídele osazeného rotorovými lamelami (spojky s axiální mezerou) obr. 2.17 a) nebo rotorovým válcem (spojky s radiální mezerou) obr. 2.17b). Jejich výhodou, stejně jako u MR brzd, je čistě elektrické řízení přenášeného momentu. MR spojky se svými výhodami mohou lehce nahradit:

- Pojistné spojky
- Spojky pro plynulý rozběh
- Spojky pro utahování šroubů s požadovaným utahovacím momentem
- Spojky pro eliminaci rotačních vibrací [15]



Obr. 2.17 a) Schéma spojky s axiální mezerou



b) Schéma spojky s radiální mezerou [16]

2.5.1. Spojky s axiální mezerou

LiuYongova spojka s axiální mezerou[17]

Obr. 2.19

Uložení rotoru:

- Dvojice jednořadých kuličkových ložisek

Těsnění pracovní mezery:

- Utěsněním ložisek

Rozměry:

- $\text{Ø}120 \times 55\text{mm}$

Maximální proud:

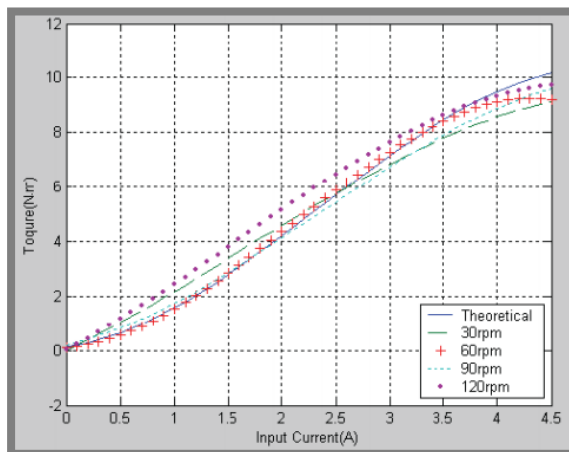
- $I_{\text{max}} = 4\text{A}$

Maximální přenesený krouticí moment:

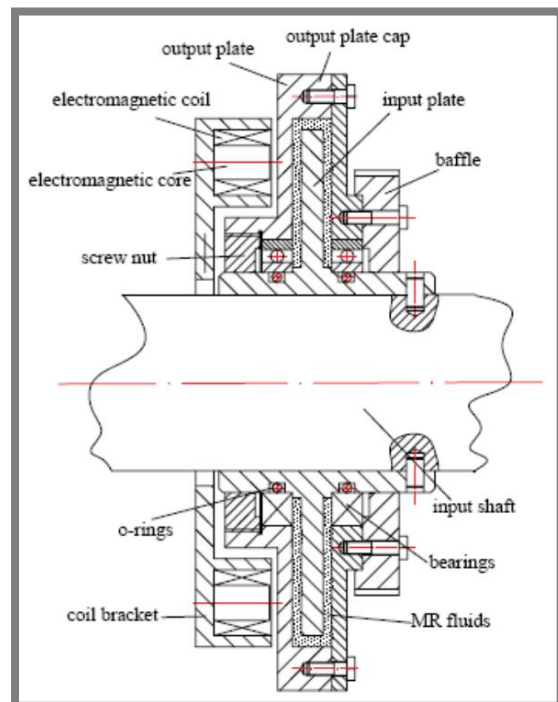
- $M_{k,\text{max}} = 9,9 \text{ N.m}$
- Průběh $M_k - I$obr.2.18

Použitá MR kapalina:

- LORD MRF-132LD



2.19 Závislost M_k na I



Obr. 2.18 LiuYongova spojka s axiální mezerou

Vícemeliová MR spojka [15]

Uložení rotoru:

- Dvojice jednořadých kuličkových ložisek

Těsnění pracovní mezery:

- Dvojice hřídelových těsnících kroužků

Maximální otáčky:

- $n_{\max} = 1000 \text{ min}^{-1}$

Maximální proud a napětí:

- $I_{\max} = 0,7 \text{ A}$
- $U_{\max} = 24 \text{ V}$

Počet pracovních mezer:

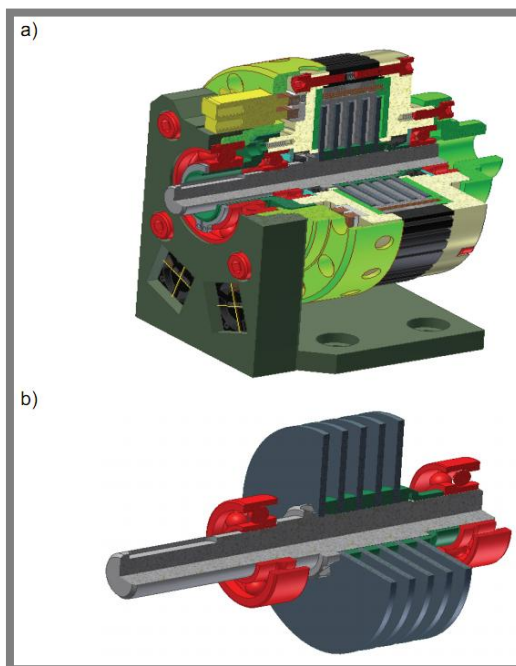
- $n = 10$

Maximální přenesený krouticí moment:

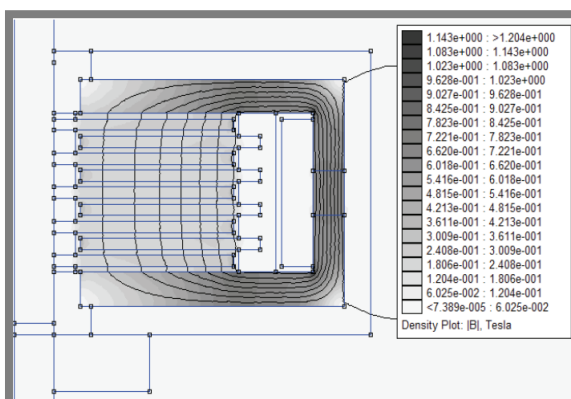
- $M_{k,\max} = 22 \text{ N.m}$

Použitá MR kapalina:

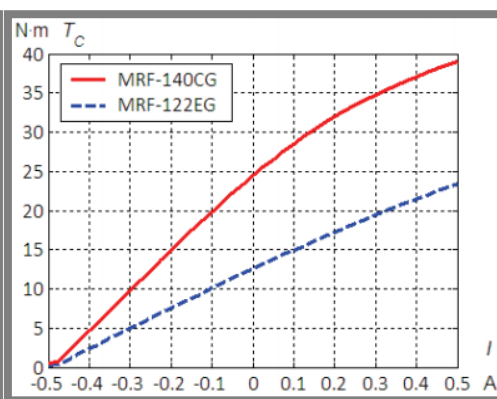
- LORD MRF-140CG
- LORD MRF-122EG



Obr. 2.20 a) Více disková MR spojka b) Rotor s lamelami



Obr. 2.22 Průběh magnetického pole spojky



Obr. 2.21 Závislost M_k na I pro MR kapaliny MRF-140CG a MRF-122EG

Vícemelová MR spojka velmi malou pracovní mezerou [18]

Uložení rotoru:

- Dvojice jednořadých kuličkových ložisek

Těsnění pracovní mezery:

- Dvojice hřídelových těsnících kroužků

Rozměry:

- Velikost $\text{Ø}52 \times 32 \text{ mm}$
- Průměr lamely 40 mm
- Velikost mezery 50 μm
- Váha 237 g

Provozní otáčky:

- $n = 1130 \text{ min}^{-1}$

Maximální proud:

- $I_{\text{max}} = 1 \text{ A}$

Počet závitů cívky:

- $i = 191$

Maximální indukce

$B_{\text{max}} > 0,5 \text{ T}$

Počet pracovních mezer:

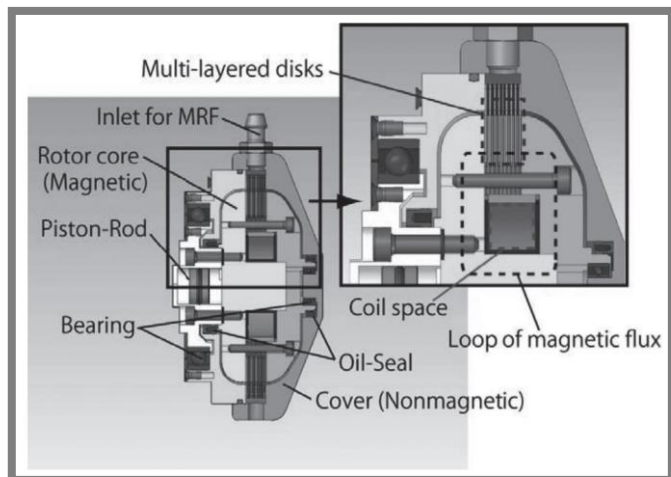
- $n = 18$

Maximální přenesený kroutící moment:

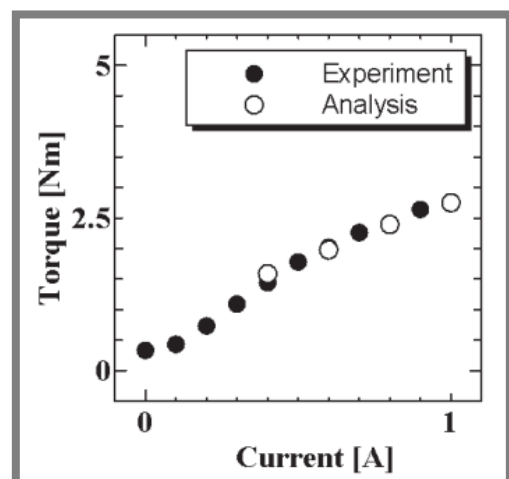
- $M_{k,\text{max}} > 2,7 \text{ N.m}$
- $M_{k,\text{min}} = 0,28 \text{ N.m}$

Použitá MR kapalina:

- LORD MRF-140CG



Obr. 2.23 Vícemelová MR spojka s velmi malou pracovní mezerou



Obr. 2.24 Závislost M_k na I

Kavlicogluova vícelamelová MR spojka [19]

Rozměry:

- Velikost $\text{Ø}152,4 \times 152,4 \text{ mm}$
- Velikost mezery $0,5 \text{ mm}$

Provozní otáčky:

- $n = 1130 \text{ min}^{-1}$

Maximální proud:

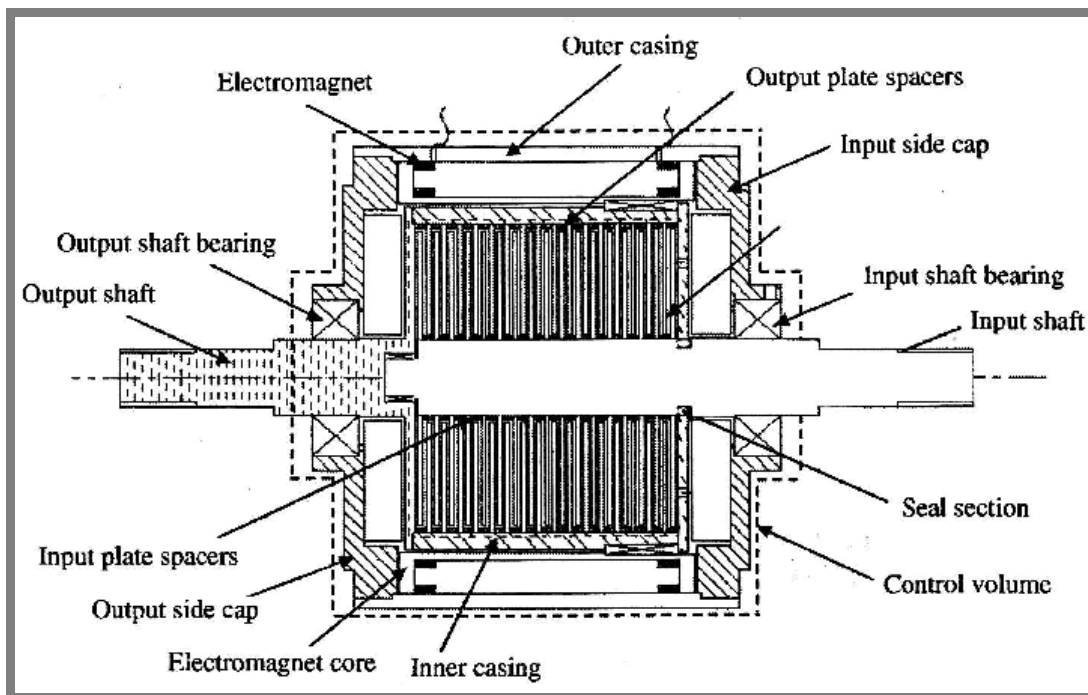
- $I_{\text{max}} = 3 \text{ A}$

Počet pracovních mezer:

- $n = 42$

Maximální přenesený kroučící moment:

- $M_{k,\text{max}} > 244 \text{ N.m}$



Obr. 2.25 Schéma Kavlicogluova vícelamelová MRspojka

Rozpínací MR spojka podle T. Saita a H. Ikedy [20]

Uložení rotoru:

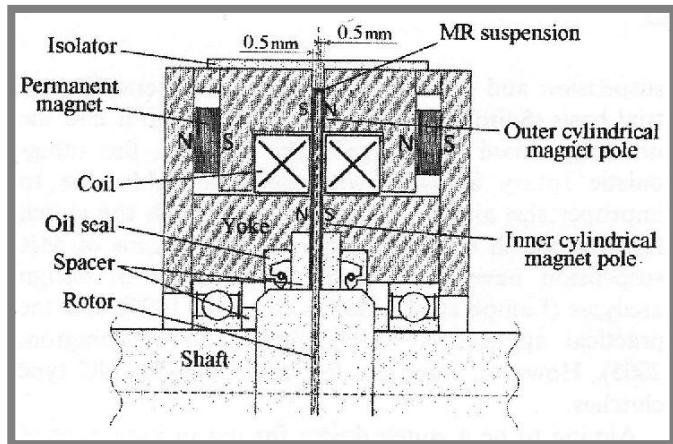
- Dvojice jednořadých kuličkových ložisek

Těsnění pracovní mezery:

- Dvojice hřídelových těsnících kroužků

Velikost mezery:

- 0,5 mm



Obr. 2.26 Schéma rozpínací MR spojky

Rozměry:

- Velikost lamel $\varnothing 158 \times 2 \text{ mm}$

Parametry cívky:

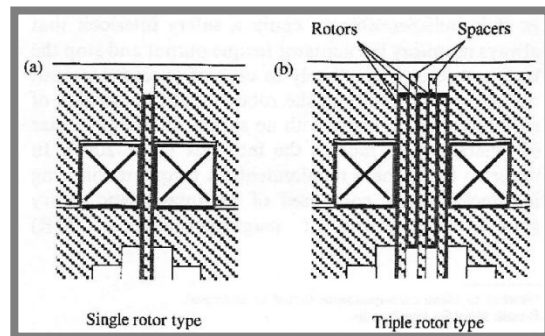
- Materiál drátu cívky – $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
- Průměr drátu cívky – $\varnothing 0,5 \text{ mm}$
- Počet závitů cívky – 600

Počet pracovních mezer:

- $n = 2$ nebo 6

Kroutící moment:

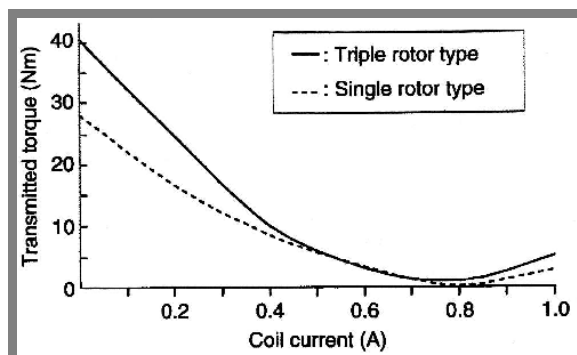
- $M_{k,\text{max}} = 41 \text{ N.m}$ (6 mezer) při 0A
- $M_{k,\text{max}} = 120 \text{ N.m}$ (6 mezer, 1A)
- $M_{k,\text{min}} = 0 \text{ N.m}$ (2 mezery) při 0,8A



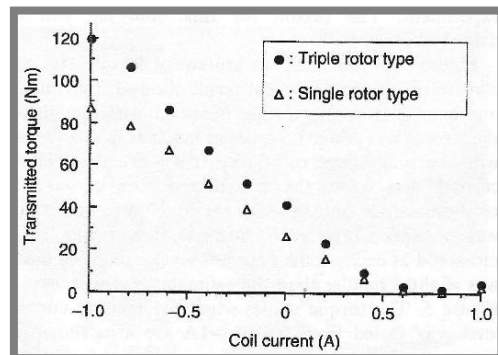
Obr. 2.27 a) 2-mezerová b) 3-mezerová

Použitá MR kapalina:

- LORD MRF-132DG



Obr. 2.29 Průběh $M_k - I$ pro kladný proud



Obr. 2.28 Průběh $M_k - I$ pro záporný proud

Experimentální MR spojka podle Z. Herolda, D. Libla a J Deura [21]

Uložení rotoru:

- Trojice jednořadých kuličkových ložisek

Těsnění pracovní mezery:

- Trojice pryžových hřídelových těsnění

Rozměry:

- Velikost lamely $\varnothing 70,5 \times 32$ mm
- Velikost mezery 2 mm

Maximální otáčky:

- $n = 4000 \text{ min}^{-1}$

Parametry cívky:

- $I_{\max} = 10A$
- $i = 56$
- $B_{\max} = 0,6T$

Počet pracovních mezer:

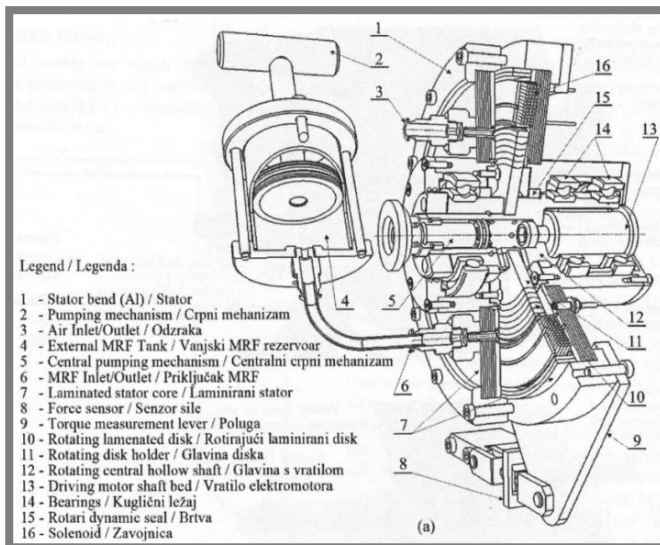
- $n = 2$

Kroutící moment:

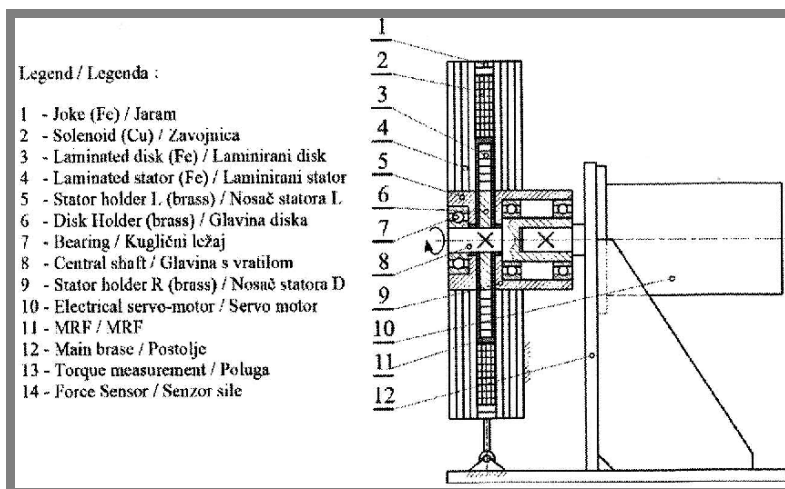
- $M_{k,\max} = 31,4 \text{ N.m}$
- $M_{k,\min} = 0,46 \text{ N.m}$

Použitá MR kapalina:

- LORD MRF-132DG



Obr. 2.30 Experimentální MR spojka podle Z.Herolda a sp.



Obr. 2.31 Řez experimentální MR spojkou podle Z.Herolda a sp.

2.5.2. Spojky s radiální mezerou

Integrovaná MR spojka v elektromotoru [22]

Uložení rotoru:

- Čtveřice jednořadých kuličkových ložisek

Těsnění pracovní mezery:

- Hřídelový těsnicí kroužek

Rozměry:

- Celkové rozměry $\varnothing 150 \times 200$ mm
- Poloměr MR mezery $R = 43$ mm
- Délka MR mezery 40 mm

Maximální otáčky:

- $n = 1200 \text{ min}^{-1}$

Parametry cívky:

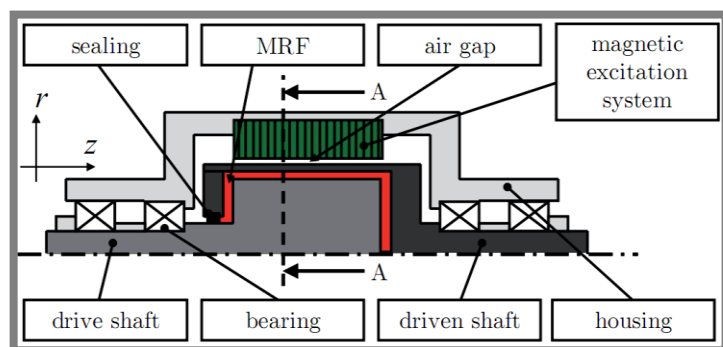
- $I_{\text{max}} = 8 \text{ A}$
- $B_{\text{max}} = 2 \text{ T}$

Počet pracovních mezer:

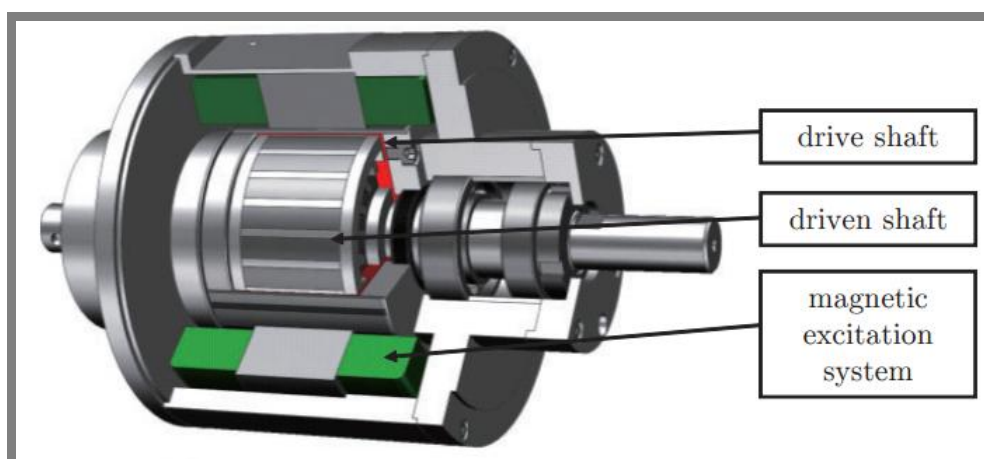
- $n = 1$

Kroutící moment:

- $M_{k,\text{max}} = 17,5 \text{ N.m}$



Obr. 2.32 Schéma integrované MR spojky v elektromotoru

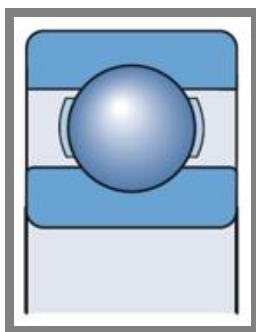


Obr. 2.33 Řez modelem integrované MR spojky v elektromotoru

2.5.3. Shrnutí současného stavu poznání

Kuličková ložiska

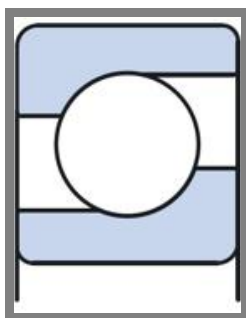
Z výše uvedeného průzkumu vyplývá, že nejčastější řešení uložení rotoru je pomocí kuličkových jednořadých ložisek. Výhody tohoto uložení jsou nízká cena, dobrá dostupnost a přesné uložení hřídele. Pro nás dost podstatnou nevýhodou kuličkových ložisek, je jejich nerozebíratelnost uložení.



Obr. 2.34 Kuličkové ložisko [23]

Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem

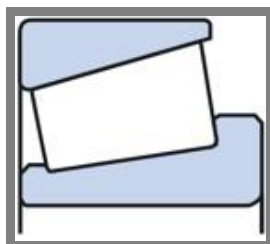
Další možností uložení hřídele rotoru jsou kuličková ložiska s kosoúhlým stykem. Jedná se o velmi přesné uložení, které dokáže přenášet radiální i axiální síly. Uložení je zároveň i rozebíratelné.



Obr. 2.35 Kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem [23]

Kuželíková ložiska

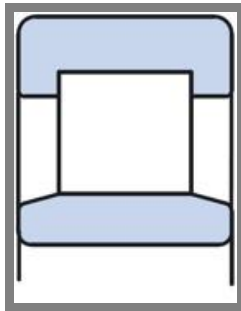
Jedná se o obdobné uložení jako v případě kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem, s tím rozdílem, že kuličky jsou nahrazeny kuželíky. Jedná se o velmi přesné uložení, které dokáže přenášet větší axiální síly než je tomu v předchozím případě. Uložení je také rozebíratelné.



Obr. 2.36 Kuželíkové ložisko [23]

Válečková ložiska

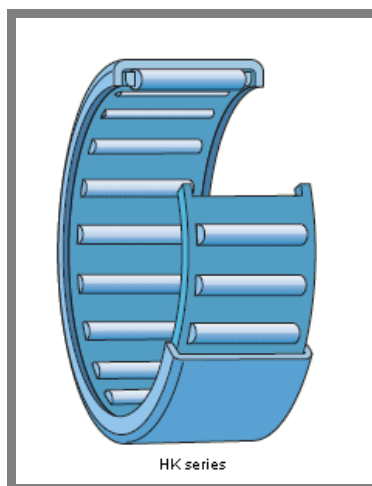
Tento typ uložení dokáže přenášet velká zatížení, ale pouze v radiálním směru. Ložiska jsou rozebíratelná.



Obr. 2.37 Válečkové ložisko [23]

Jehlová ložiska

Jehlová ložiska jsou speciálním typem válečkových ložisek. Valivá tělíska (jehly) mají velmi malý průměr, takže se tyto ložiska používají nejčastěji v uloženích s nedostatkem prostoru.



Obr. 2.38 Jehlové ložisko [23]

Hřídelové těsnící kroužky

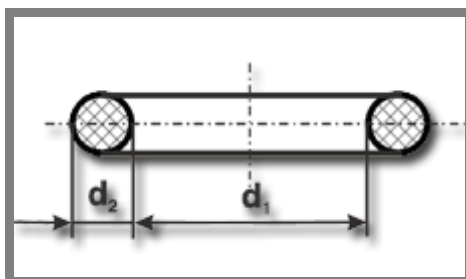
Jedná se o těsnění s dlouhou životností a nízkým třecím odporem. Nevýhodou je nutnost přesného uložení.



Obr. 2.39 Hřídelový těsnící kroužek [23]

O-kroužky

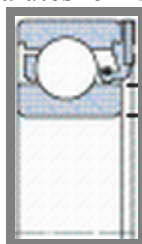
Jsou používány hlavně jako statická těsnění. Nevýhodou je nutnost drážky pro O-kroužek.



Obr. 2.40 O-kroužek [24]

Při použití MR kapalin, které mají jako nosné médium olej, je nutné použít pryžový materiál těsnění, odolný vůči konkrétnímu typu oleje. Oleje mohou pryžové materiály naleptávat.

V případě LiuYongovy spojky jsou pro utěsnění MR mezery využity ložiska. Při tomto konstrukčním řešení se využívá utěsnění samotného ložiska.



Obr. 2.41 Kuličkové ložisko s vlastním utěsněním [23]

Další alternativou je použití magnetického těsnění. Jedná se o permanentní magnet, ke kterému když se dostane MR kapalina tak ztuhne a tím se mezera zatěsňuje.

3. FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU, JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

3.1. Hmotnost

Hmotnost spojky je zbytečně vysoká. Je to zapříčiněno předimenzováním některých dílů spojky. Tato vysoká hmotnost spojky má neblahý vliv na namáhání hřídele rotoru. Při snížení hmotnosti spojky bude možné použít méně jakostní materiál pro hřídel rotoru, případně zmenšit i jeho průměr.

3.2. Plnění MR kapaliny

U původní konstrukční varianty je problém s plněním MR kapaliny do pracovní mezery. Je to způsobeno nevhodnou konstrukcí odvodu vzduchu pracovní mezery při plnění. To má za následek, že MR kapalina začne vytékat z odvodu vzdušného otvoru dříve, než stihne kompletně zatéct do všech mezer.



Obr. 3.1 Špatné naplnění pracovní mezery

3.3. Teplota

Dále nastává problém s teplotou. Protože je spojka provozována v brzděném režimu, všechna energie, kterou by mohla spojka přenést ve spojivém režimu je mařena a přeměňuje se v teplo. Je to zapříčiněno vysokými skluzovými rychlostmi uvnitř pracovní mezery a třením. Nezanedbatelný vliv na teplotu má i ohřev cívky procházejícím proudem. Při provozu dochází k velkému nárůstu teploty těla statoru, které je zapříčiněno nedostatečným odvodem tepla do okolí. Zvyšování teploty snižuje účinnost a přenesený kroutící moment spojky.

3.4. Házení rotoru

U stávající konstrukce docházelo k házení rotorové části spojky. Dokonce nastal i případ, že rotorová lamela kolidovala se statorovou. Je to zapříčiněno nevhodným uložením rotoru, které je nedostatečně tuhé. Uložení u stávající konstrukce je řešeno dvojicí kuličkových ložisek na jedné straně a na druhé straně kluzným pouzdem. Kluzné pouzdro neplní svoji funkci, dle očekávání.

4. VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem téhle bakalářské práce je odstranění těchto konstrukčních problémů:

- Navržení dostatečně přesného a tuhého uložení rotoru
- Navržení lepšího a efektivnějšího způsobu plnění MR kapaliny do pracovní mezery
- Návrh vzduchového a vodního chlazení MR spojky pro brzdový režim
- Snížení hmotnosti odebráním přebytečného materiálu na statorové části
- Ověření provozních parametrů spojky po rekonstrukci a srovnání s původním konstrukčním provedením

5. NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

5.1. Konstrukční

Bude navrženo několik variant řešení problémů u stávající konstrukce MR spojky, z nichž se vybere ta optimální. Jedná se o rekonstrukci, takže veškeré varianty řešení budou omezeny dosavadními parametry MR spojky. Vše bude vizualizováno pomocí 3D CAD systému Autodesk Inventor.

Hmotnost

Ve spolupráci s kolegou Josefem Dluhošem, který simuluje mag. pole MR spojky v MKP softwaru, bude navrženo odlehčení předdimenzovaných částí statoru.

Plnění

Bude navrženo výhodnější plnění MR kapaliny do pracovní mezery s minimálním zásahem do dosavadní konstrukce.

Teplota

Bude zkonstruován teploměr pro přesné měření teploty MR spojky. Dále bude navrženo vzduchové a vodní chlazení pro lepší odvod tepla do prostředí. Vše bude patřičně otestováno a výsledky zhodnoceny.

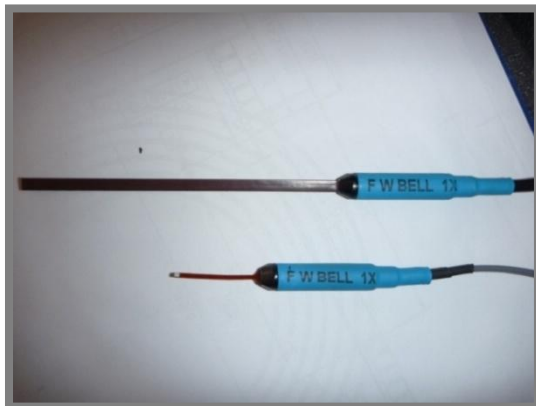
Házení rotoru

Bude navrženo několik konstrukčních variant uložení rotoru, z nichž se vybere ta optimální s ohledem na přesnost, tuhost a cenu.

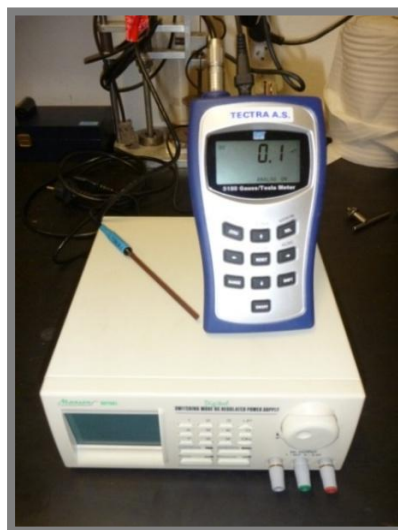
5.2. Experimentální ověření magnetického pole

Magnetické pole bude měřeno přístrojem TESLA METER 5180 za pomoci dvou příčných sond:

- STD18-0404 (Delší nahoře)
- STD61-0402 (Kratší dole)

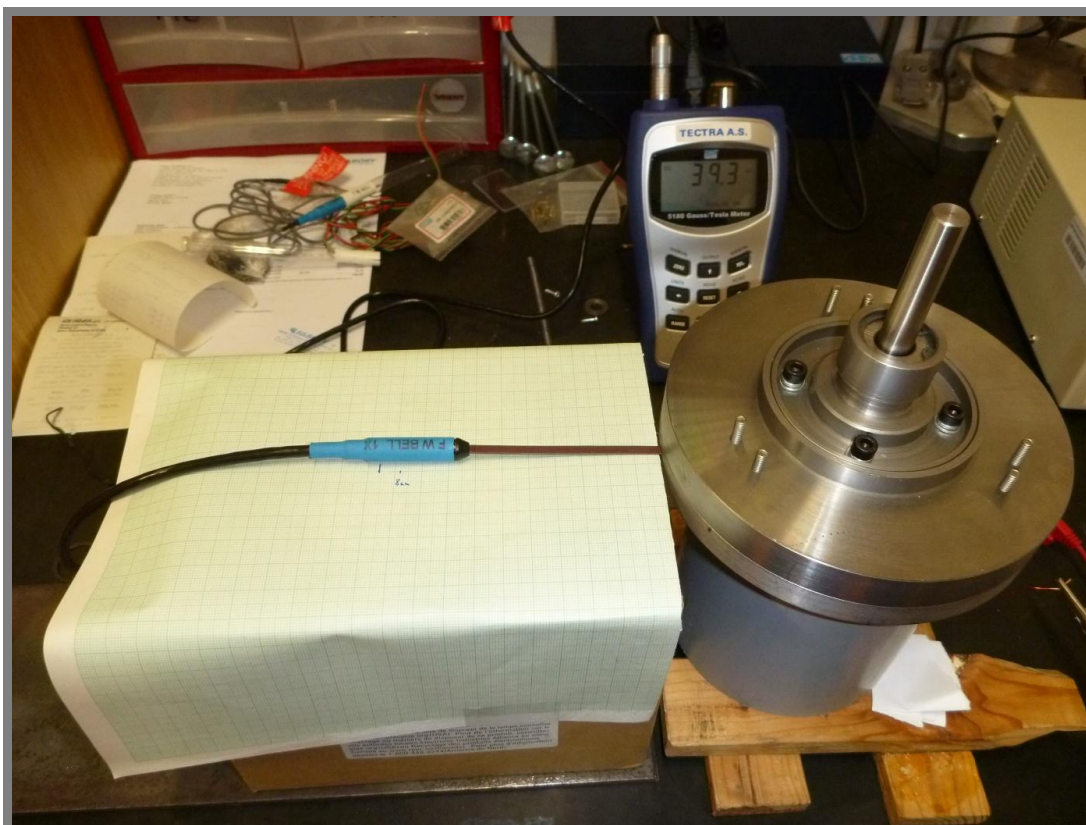


Obr. 5.1 Příčné sondy



Obr. 5.2 Zdroj a TESLA METER 5180

Do cívky je pomocí zdroje (obr. vpravo) přiveden proud. Cívka tedy indukuje magnetické pole. Ve statorové části je vyfrézována drážka, do které se bude zasouvat po 1mm sonda STD18-0404 až k rotorovému hřídeli a budou se odečítat hodnoty magnetického pole. Poloha zasunutí se bude odměřovat pomocí milimetrového papíru. Hustota magnetického pole měřená touto sondou bude ovlivněna drážkou, takže hodnoty budou nižší. Tenčí příčná sonda STD61-0402 bude zasunována do pracovní mezery, takže bude měřit reálně hodnoty magnetického pole. Tato sonda není dost dlouhá pro měření celého rozsahu pracovní mezery. Způsob měření je vyfocen na obr. 5.3. Výsledky budou porovnány s měřením na původní, nerekonstruované MR spojce.



Obr. 5.3 Experimentální měření el. mag. indukce

5.3. Experimentální ověření provozních parametrů

5.3.

Provozní parametry budou ověřeny v dílně UK na soustruhu, kde za pomoci tenzometrického snímače síly a ramene budou měřeny momentové charakteristiky MR spojky v brzděném režimu v závislosti na teplotě MR spojky a otáčkách rotoru.

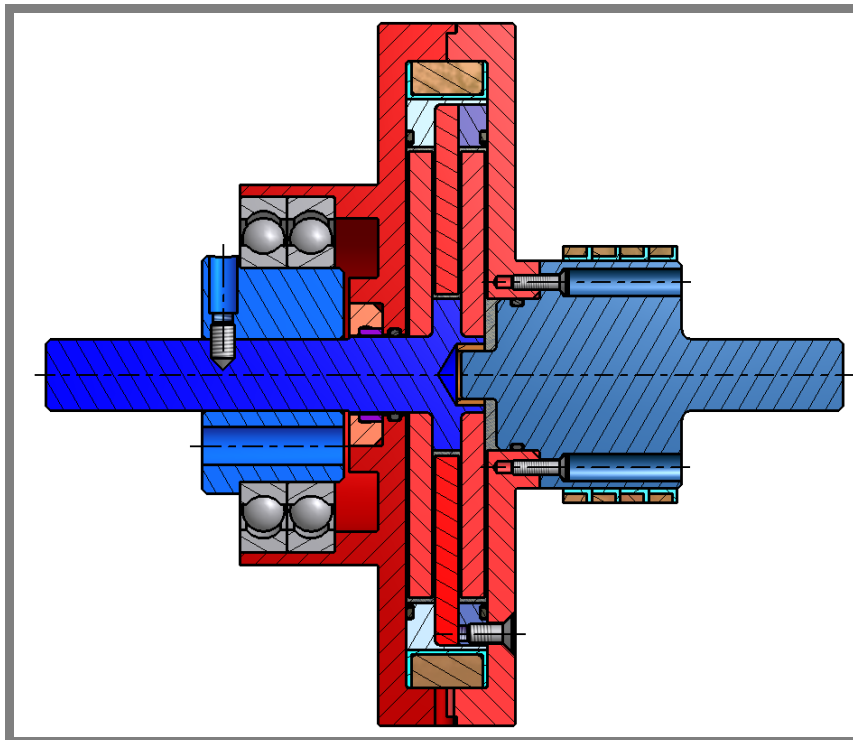
6. NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

6.1. Uložení hřídele v levé části

Pro zvýšení tuhosti a přesnosti uložení rotoru je nutné, aby ložiska uložení rotoru byla co nejdále od sebe. Proto bylo nutné odebrání materiálu v „Levé části“. Jelikož dutina v „Levé části“ má omezené rozměry, musíme výběr ložisek omezit. Použité ložisko musí být co nejmenší, nesmí dovolovat velké nesouososti a uložení musí být volně rozebíratelné. Je ideální použít jehlové ložisko. Jehlová ložiska mohou být použita přímo na hřídeli, nebo s tvrzeným kroužkem. Protože je hřídel vyrobena z nerezové oceli, je poměrně měkká a nelze kalit. Pro použití jehlového ložiska přímo na hřídeli je potřeba hřídel nitridovat, nebo použít tvrzený kroužek pod ložisko. Nevýhoda použití tvrzeného kroužku je, že nám výrazně zmenšuje průměr hřídele rotoru. Byla vybrána varianta s tvrzeným kroužkem. Pro dodržení rozměru pracovní mezery je uložení rotoru doplněno o dvě axiální ložiska na obou koncích, které přesně vymezí polohu rotoru v axiálním směru.

Barevné označování materiálů:

- Hliník
- Slitiny mědi
- Magnetická ocel
- Permanentní magnetická ocel
- Nemagnetická nerezová ocel



Obr. 6.1 Stávající provedení MR spojky

6.1.1. Kombinované jehlové ložisko

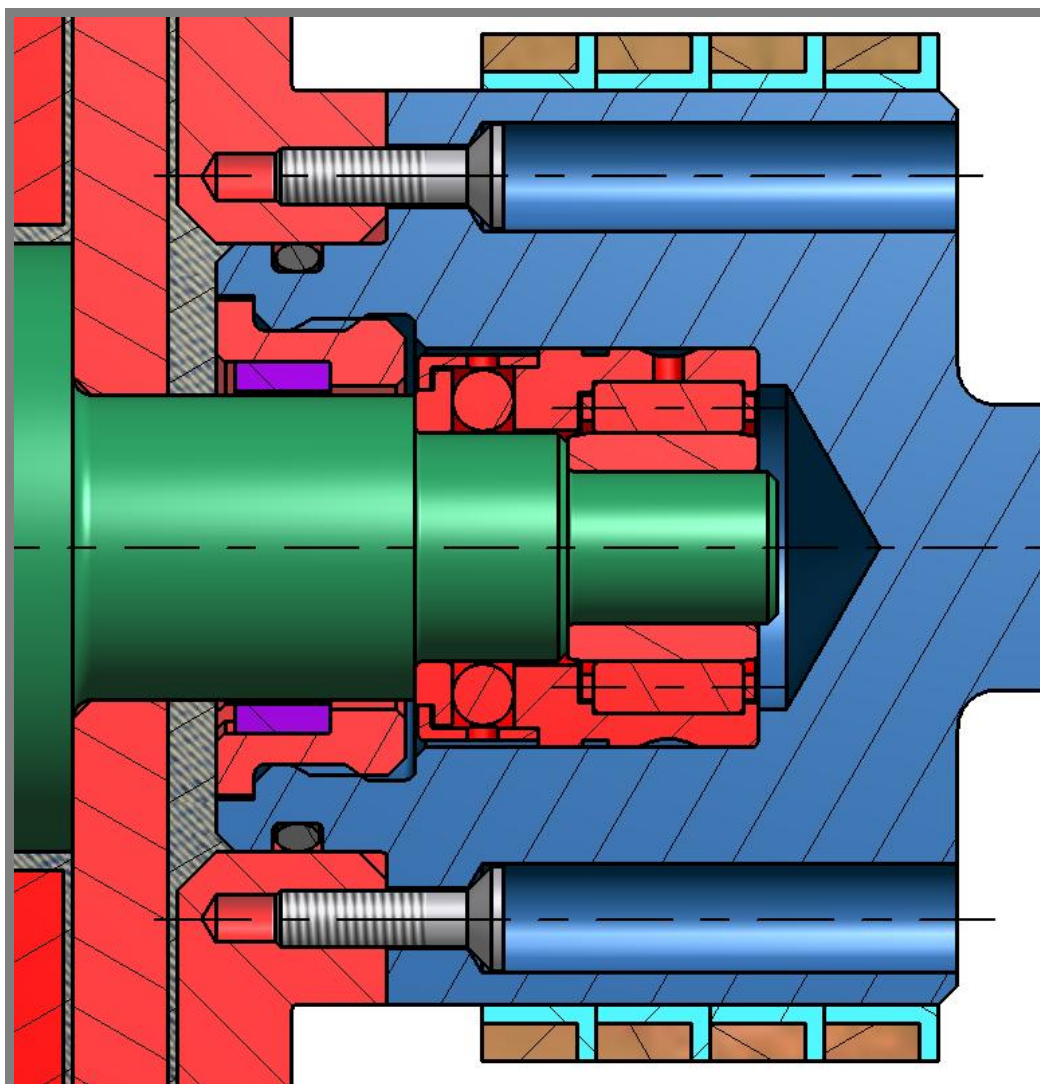
Jako první variantou uložení rotoru v „Levé části“ je použití kombinovaného jehlového ložiska. Tohle ložisko v sobě nese jehlové radiální ložisko a kuličkové axiální ložisko. Ložisko by se nalisovalo do otvoru v „Levé části“, ve kterém už by zůstalo. Hřídel rotoru by šla volně vysouvat. Výhodou je jeho kompaktnost (nerozpadá se na víc částí) a je velmi malé. Nevýhodou je jeho vyšší cena.

Cenová rozvaha:

Ložisko: NX12 – 550Kč

Tvrzený kroužek – 88Kč

Celkem – 638Kč



Obr. 6.2 Uložení rotoru pomocí kombinovaného jehlového ložiska

6.1.2. Kombinace jehlového a axiálního kuličkového ložiska

Další variantou uložení hřídele rotoru byla kombinace jehlového radiálního ložiska a axiálního kuličkového ložiska. V tomto konstrukčním provedení jsou možné dvě varianty:

a) Větší kuličkové axiální ložisko (Obr. 6.3 a))

Tato varianta neumožňuje použití tvrzeného kroužku na hřídeli rotoru z důvodu velkého oslabení hřídele rotoru na konci nebo nemožné rozebíratelnosti. Dále je zde problém s utěsněním ložisek, protože nelze použít závit pro uchycení nosiče těsnících komponent z důvodu velkého vnějšího průměru kuličkového axiálního ložiska a nedostatku materiálu pod O-kroužkem (naznačeno na obrázku).

Cenová rozvaha:

Axiální kuličkové ložisko: 51100 – 55Kč

Jehlové radiální ložisko: HK 1015 – 58Kč

Celkem – 113Kč

b) Menší axiální kuličkové ložisko (Obr. 6.3 b))

Tato varianta umožňuje snadnou rozebíratelnost uložení, použití tvrzeného kroužku pod jehlové radiální ložisko i použití závitu pro uchycení nosiče těsnících komponent. Její jediná nevýhoda je vysoká cena kuličkového axiálního ložiska. Ložisko je v nejmenší rozměrové řadě a jedná se o automobilní ložisko.

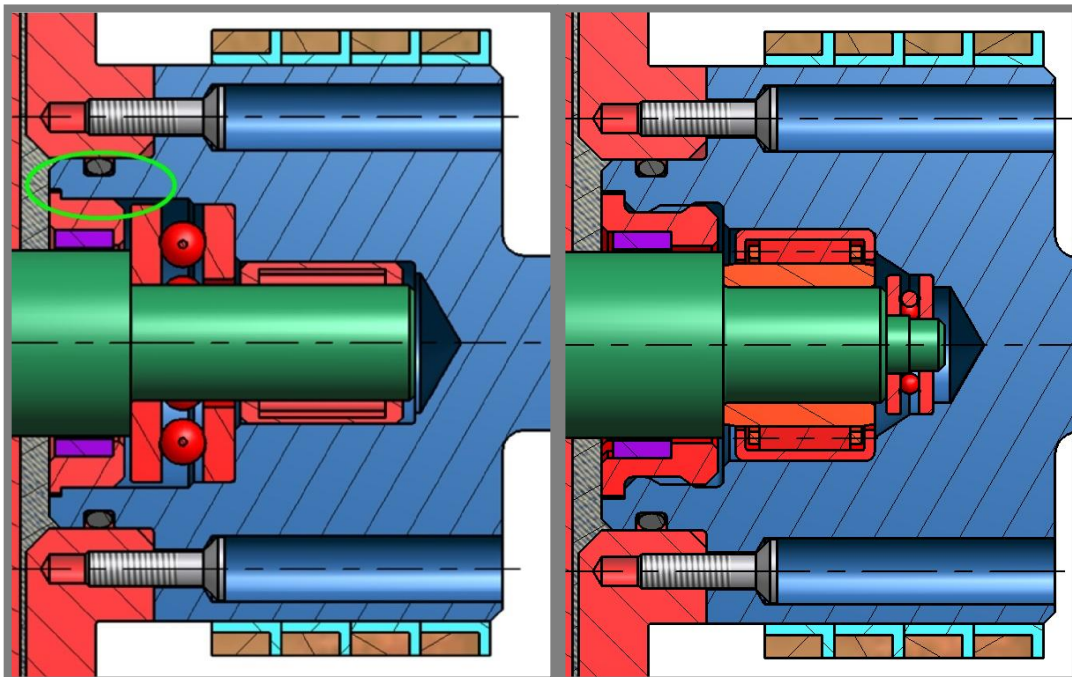
Cenová rozvaha:

Axiální kuličkové ložisko: BA6 – 396Kč

Jehlové radiální ložisko: HK 1512 – 62Kč

Tvrzený kroužek: IR 12x15x12,5 – 84Kč

Celkem – 542Kč



Obr. 6.3 a) Varianta s větším axiálním ložiskem

b) Varianta s menším axiálním ložiskem

6.1.3. Kombinace jehlového a axiálního jehlového ložiska

6.1.3.

Další variantou uložení hřídele rotoru byla kombinace jehlového radiálního ložiska a axiálního jehlového ložiska. Toto konstrukční provedení je naprosto stejné jako provedení výše s použitím automobilního ložiska, jen s tím rozdílem, že drahé automobilní ložisko je nahrazeno levným axiálním jehlovým ložiskem.

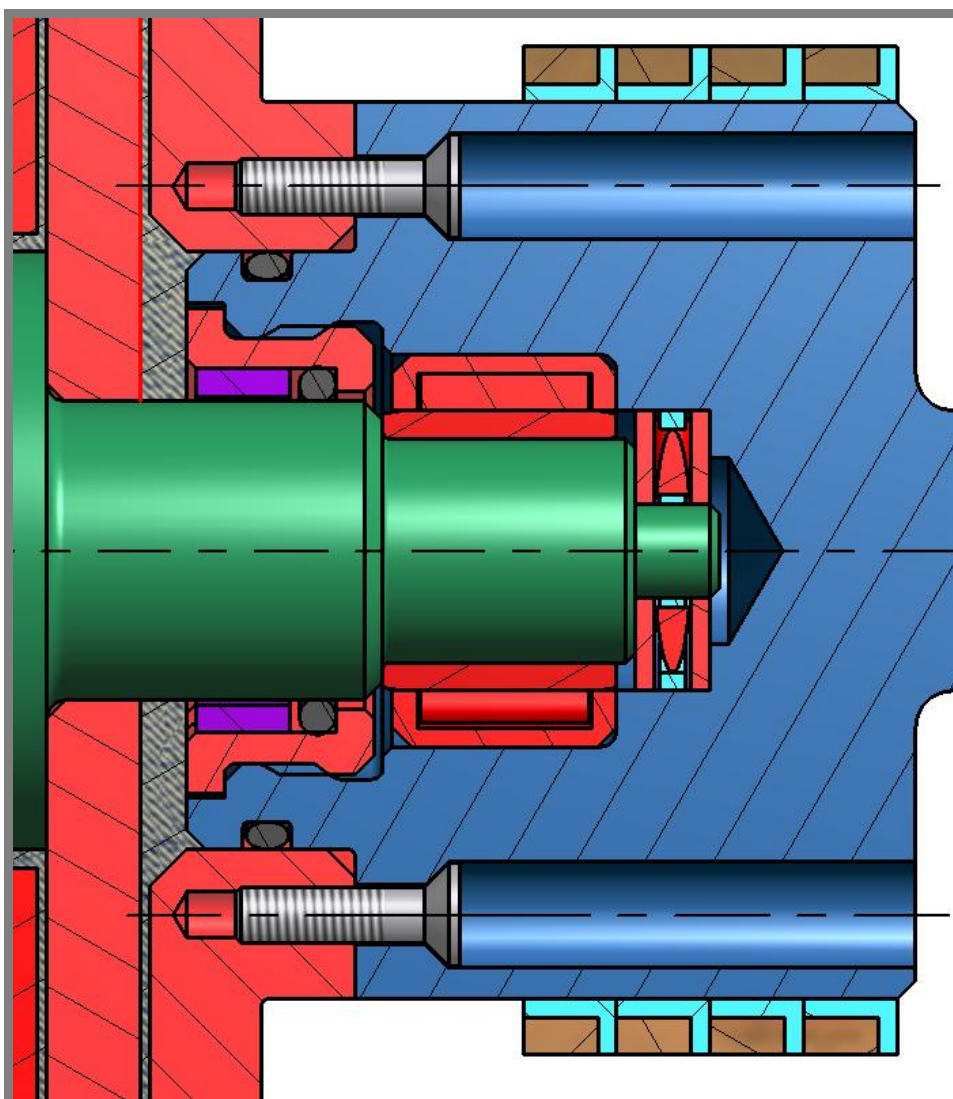
Cenová rozvaha:

Axiální jehlové ložisko: AXK 0619TN – 80Kč

Jehlové radiální ložisko: HK 1512 – 62Kč

Tvrzený kroužek: IR 12x15x12,5 – 84Kč

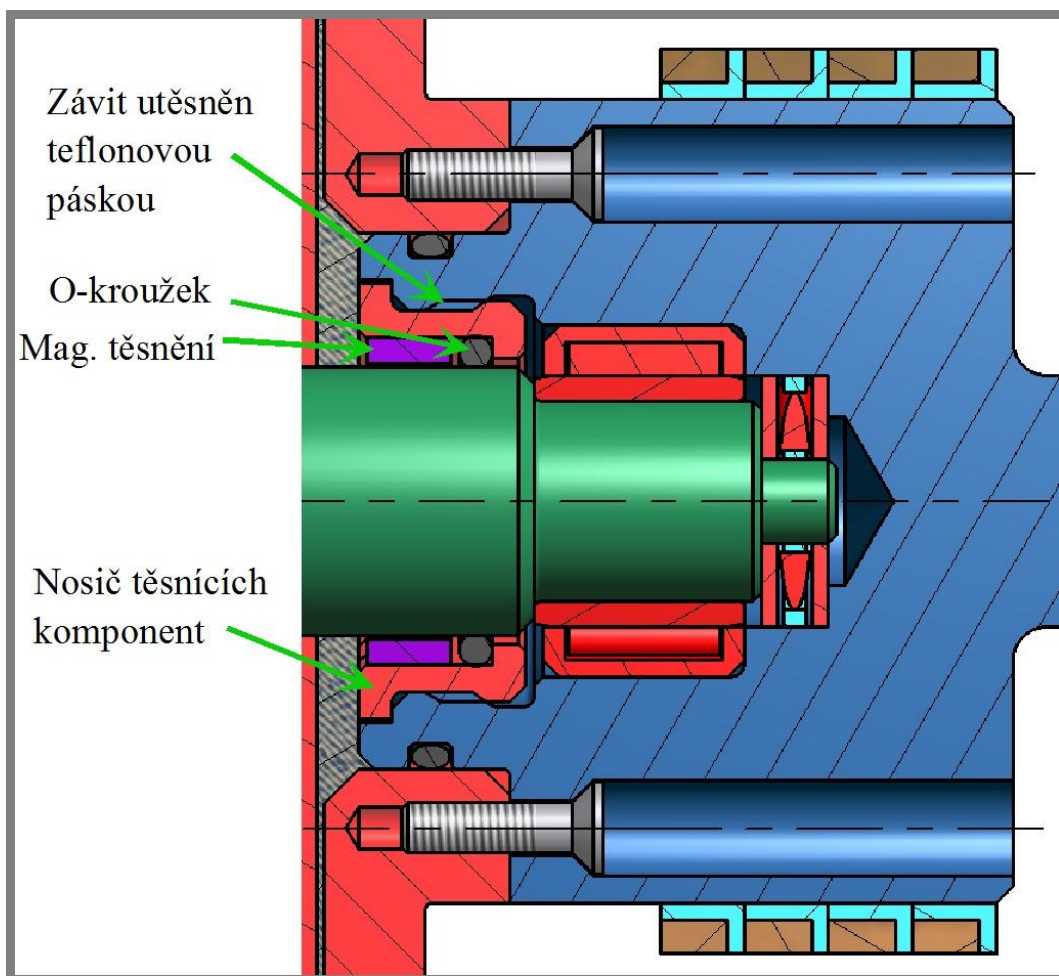
2x Tvrzený axiální kroužek: AS0619 – 7,50Kč

Celkem – 226Kč

Obr. 6.4 Kombinace jehlového a axiálního jehlového ložiska

6.1.4. Volba těsnění

Pro zaručení rozebíratelnosti a možného sestavení jednotlivých dílců je utěsnění ložisek v levé části řešeno pomocí nosiče těsnících komponent, který je uchycen závitem M24x1 do levé části. Tento nosič je vyroben z konstrukční uhlíkové oceli a nese magnetické těsnění a O-kroužek. Tím, že je vyroben z magnetického materiálu, posiluje účinek magnetického těsnění. Případné proniknutí MR kapaliny do ložisek by mohlo mít za následek jejich zničení. Z tohoto důvodu je tam pro jistotu ještě O-kroužek. Magnetické těsnění nemusí být do nosiče nijak lepeno nebo lisováno, díky magnetickému poli je do nosiče vtaženo a dobře v něm drží. O-kroužek je přitlačován magnetickým těsněním k osazení v nosiči.



Obr. 6.5 Utěsnění levé části

6.2. Uložení rotoru v pravé části

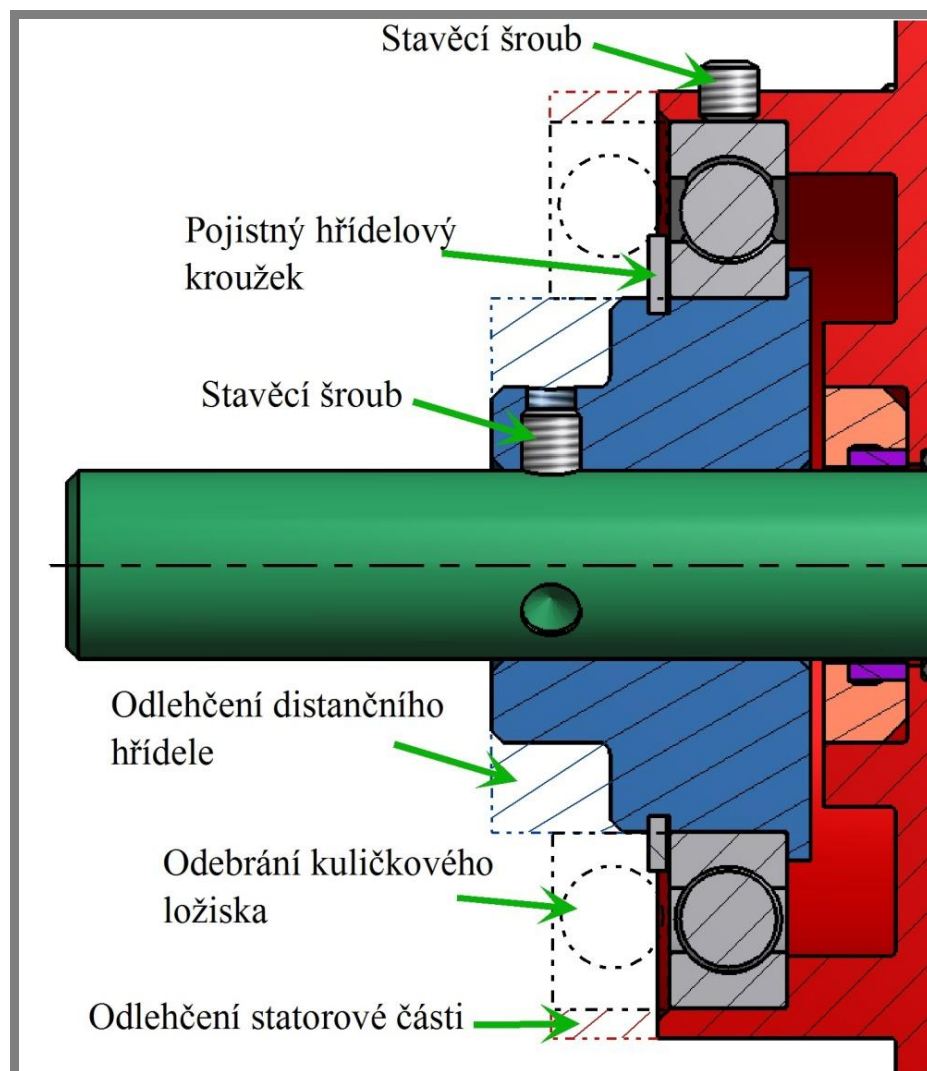
U současné konstrukce není nijak zabráněno pohybu ložisek v pravé části. Ložiska jsou nalisována na distanční hřídel, který je pomocí stavěcího šroubu aretován s hřídelí rotoru. Ložiska ve statoru drží pouze silou v uložení po nalisování. Stejně je to i u distančního hřídele, na kterém ložiska také drží jen silou v uložení po

nalísování. V situaci, že by došlo k axiálnímu pohybu rotorového hřídele, dojde ke kolizi mezi lopatkami rotoru a statoru.

6.2.1. Úprava stávající koncepce

6.2.1.

Tento návrh se snaží upravit stávající konstrukci tak, aby se zabránilo jakémukoliv axiálnímu pohybu rotorového hřídele. Návrh už počítá s kvalitnějším uložením na protější straně, proto bylo možné odebrat jedno kuličkové ložisko a zkrátit distanční hřídel pro snížení hmotnosti. Vysunutí kuličkového ložiska ze statoru je zamezeno pomocí stavěcího šroubu. Aby nedošlo k vyjetí distančního hřídele z vnitřního kroužku ložiska, je uložení pojištěno pojistným hřídelovým kroužkem.



Obr. 6.6 Úprava stávající koncepce

6.2.2. Kombinace jehlového a axiálního kuličkového ložiska v přírubě

Tento konstrukční návrh se snaží o maximální snížení hmotnosti při zachování co nejvyšší tuhosti a přesnosti uložení rotoru. Jde o zcela podobnou koncepci jako je na protější straně rotorového hřídele. Jedná se o přírubu, která je přesně středěna přírubovým mezikružím. Použité uložení pro vnitřní i vnější průměr příruby je H7/g6. Průměr hřídele musel být snížen z 16mm na 12mm kvůli tvrzenému kroužku pod jehlové ložisko. O čelo tohoto tvrzeného kroužku se opírá rotující kroužek axiálního kuličkového ložiska. Z důvodu větších rozměrů axiálního kuličkového ložiska se muselo přistoupit k takové konstrukci, že se axiální ložisko nasouvá z druhé strany. Výhodou tohoto provedení je, že se příruba smontuje a už se nemusí více rozkládat. Při montáži je mezi čely statoru a ložiskové příruby vůle, která slouží pro vymezení vůle mezi axiálními ložisky, mezi kterými se tak vytvoří předpětí.

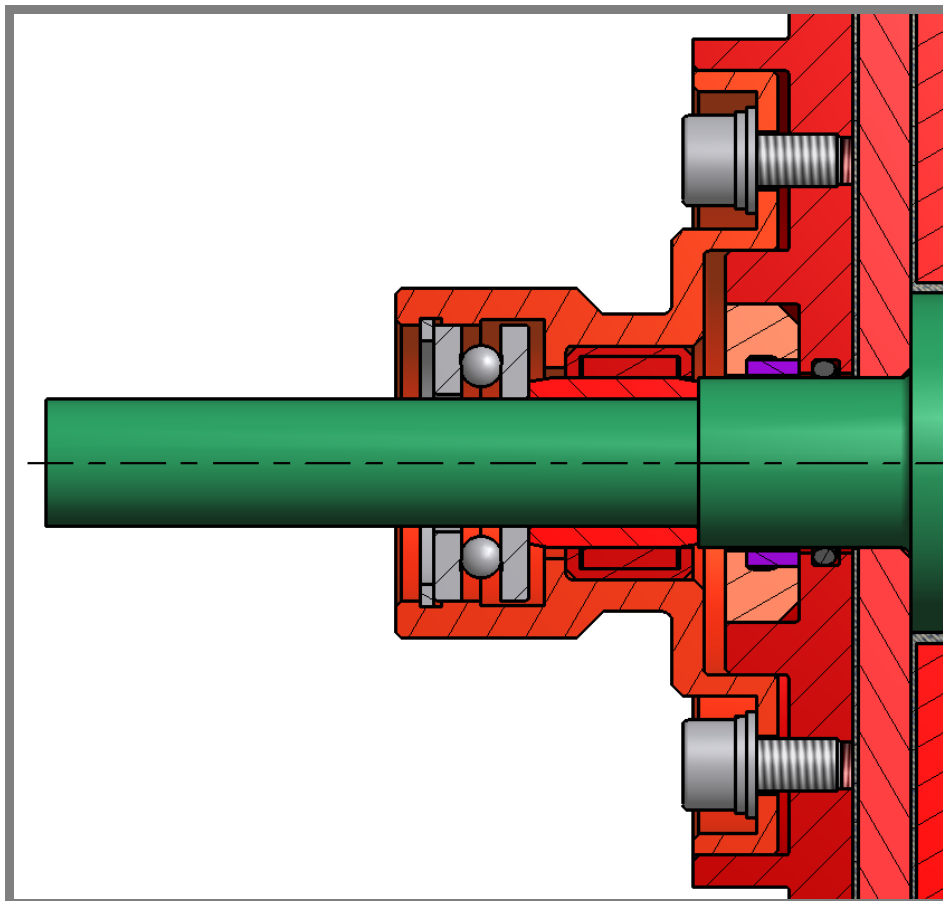
Cenová rozvaha:

Axiální kuličkové ložisko: 51101 – 48,20Kč

Jehlové radiální ložisko: HK 1612 – 66,50Kč

Tvrzený kroužek: IR 12x16x20 – 105,30Kč

Celkem – 220Kč

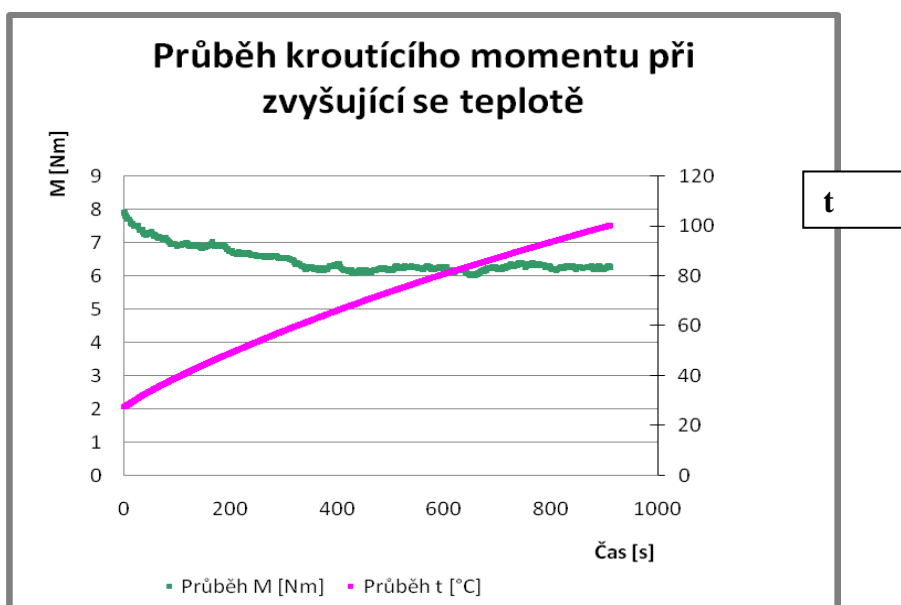


Obr. 6.7 Kombinace jehlového a axiálního kuličkového ložiska v přírubě

6.3. Chlazení

6.3.

Spojka se při testovacím brzděném režimu výrazně zahřívá. Její teplota po chvíli snadno přesáhne hodnotu 100°C. Má-li být spojka použita v budoucnu pro testování MR kapalin, musí se její maximální teplota výrazně snížit a spojka se musí stíhat chladit. Zvyšování teploty MR spojky má neblahý vliv na přenesený krouticí moment, tedy s rostoucí teplotou klesá účinnost spojky.

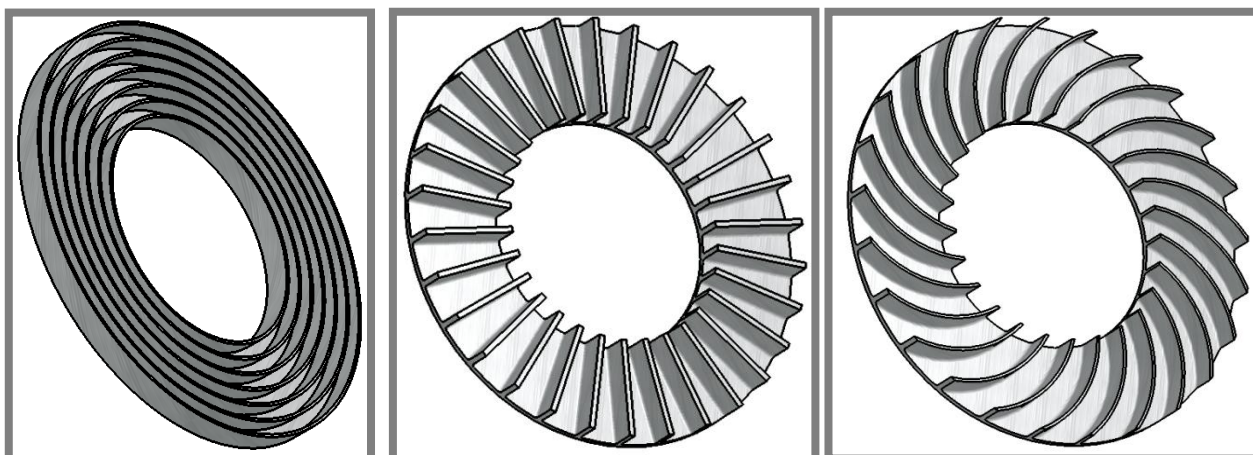


Obr. 6.8 Graf průběhu krouticího momentu při zvyšující se teplotě

6.3.1. Chlazení vzduchem

6.3.1.

Byla snaha navrhnout vzduchové chlazení, které by výrazně snížilo maximální teplotu MR spojky. Vzduchové chlazení by mělo být vyrobeno z materiálu s dobrou tepelnou vodivostí, např. hliník, měď. Dalším důležitým parametrem vzduchového chlazení je tvar žebrování, které může být axiální, radiální nebo skloněné.



Obr. 6.9 Možné varianty tvaru žebrování vzduchového chlazení

6.3.2. Chlazení kapalinou

Při nedostatečném chladícím účinku vzduchového chlazení by se muselo přejít na intenzivnější způsob odvodu tepla, vodní chlazení. Byl pokus, navrhnout koncept tohoto chlazení.

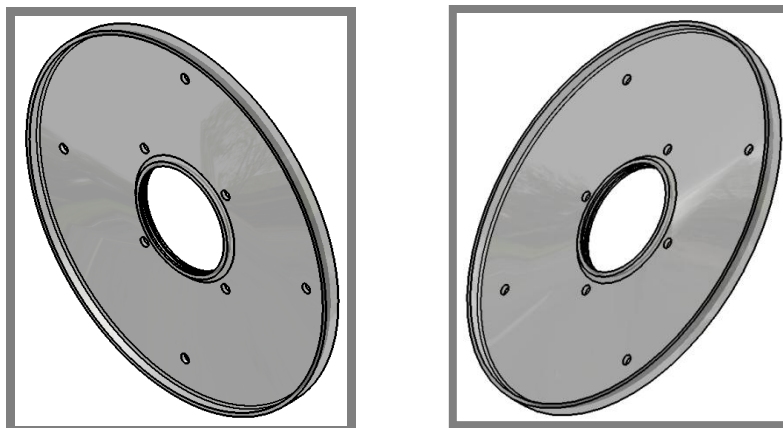
Okolo celé nejvíce ohřívané části se namontuje utěsněné tělo vodního chlazení. Toto tělo sestává ze tří hlavních částí. Dvě čelní části a část obvodová.

Obvodová část by byla vyrobena z PVC trubky Ø160x3,2. Trubka by se jen lehce upravila – zkosení na obou čelech pro těsnící O-kroužek O.K. 160x2 NBR70 a navařili by se šroubení pro přívod vody viz. obr. 6.10.



Obr. 6.10 Obvodová část vodního chlazení

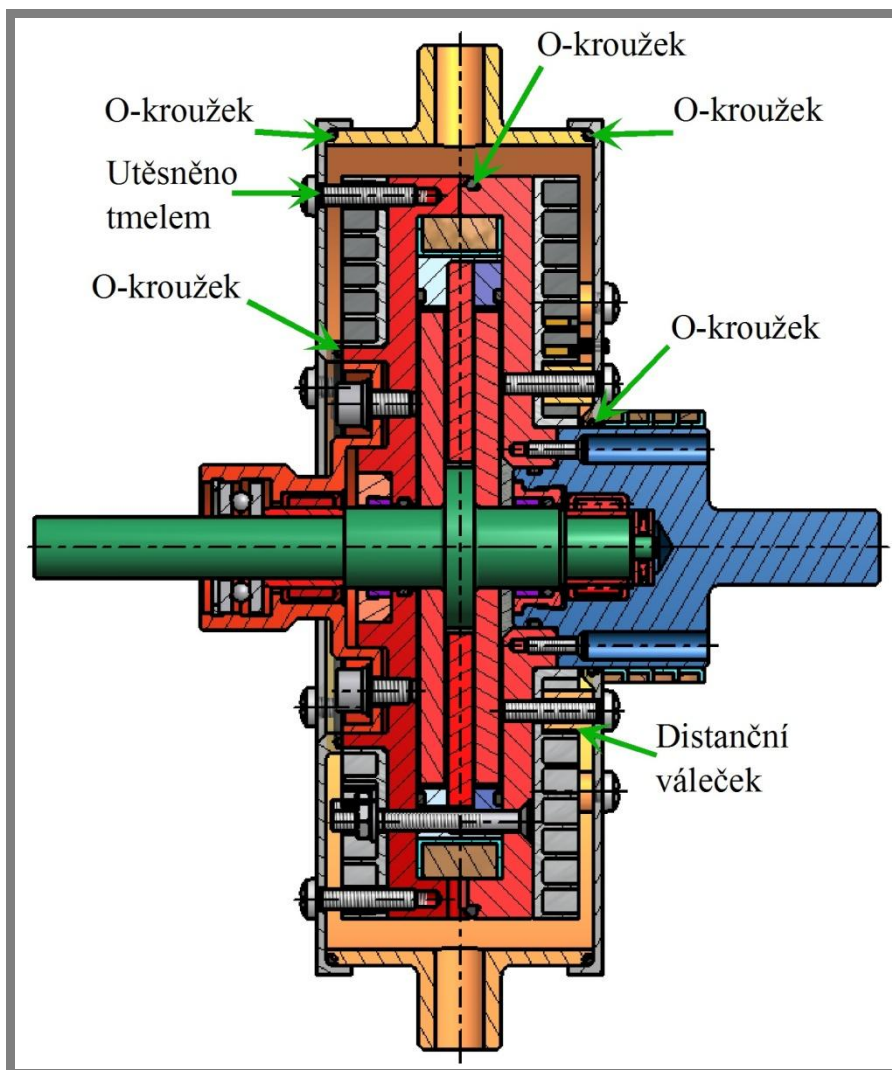
Obě čelní části by byly vyrobeny z MAKROLONU. Jedná se o velmi pevné plexisklo, které by se nemělo tolik prohýbat při obrábění.



Obr. 6.11 Čelní části vodního chlazení

„Levá část vodního chlazení“ (na obrázku zobrazena vpravo) je sešroubována osmi šrouby s tělem statoru přes distanční válečky vyrobené z PVC. Do vnějšího osazení s O-kroužkem je nasunuta obvodová část vodního chlazení. Ta je stažena přes „Pravou část vodního chlazení“ (na obrázku zobrazena vlevo) pomocí osmi šroubů vstupujících do statoru. Pro zabránění průniku chladícího média do spojky by byla v dělicí rovině statoru vysoustružena drážka pro O-kroužek a závity by se utěsnili teflonovou páskou. Pro zabránění úniku chladící kapaliny ven, by se otvory

pro šrouby utěsnili například tmelem nebo vystříženými gumovými těsnícími podložkami. Kabel buzení cívky by procházel přes tmelem utěsněný otvor v obvodové části vodního chlazení.



Obr. 6.12 Sestava s vodním chlazením

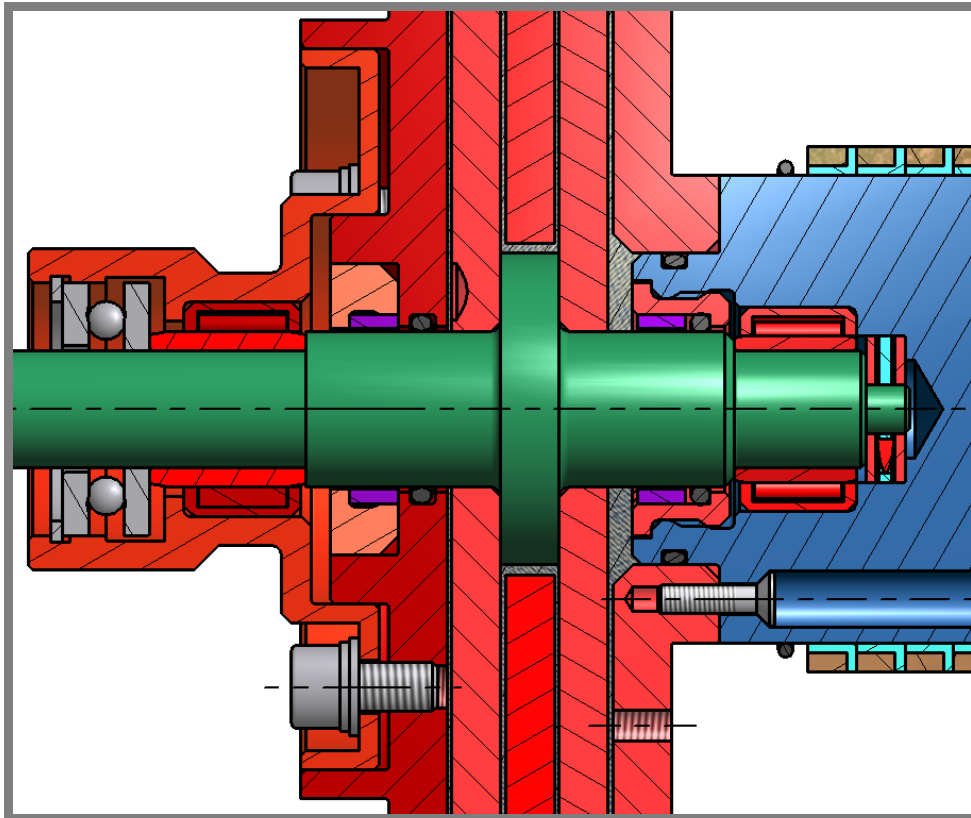
6.4. Výběr optimální varianty

6.4.

Pro uložení hřídele rotoru v „Levé části“ byla vybrána varianta kombinace jehlového radiálního ložiska s tvrzeným kroužkem a axiálního jehlového ložiska. Tato varianta byla zvolena z důvodu dobrého prostorového rozložení a přijatelné ceny.

Jako uložení hřídele rotoru v „Pravé části“ byla zvolena varianta kombinace jehlového radiálního ložiska s tvrzeným kroužkem a kuličkového axiálního ložiska v přírubě. Bylo tak zvoleno z důvodu nízké hmotnosti, dobré tuhosti uložení a přijatelné ceny.

Pro utěsnění pracovní mezery bylo zvoleno použití kombinace magnetického těsnění s O-kroužkem.



Obr. 6.13 Výsledné uložení rotoru

Pro vzduchové chlazení byla vybrána první varianta, axiální tvar žebrování a to z důvodu snadné výroby, a jelikož se spojka v testovacím režimu nebude otáčet, nemá cenu používat ostatní dvě varianty, které jsou uzpůsobeny spíše pro použití za rotace.

7. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

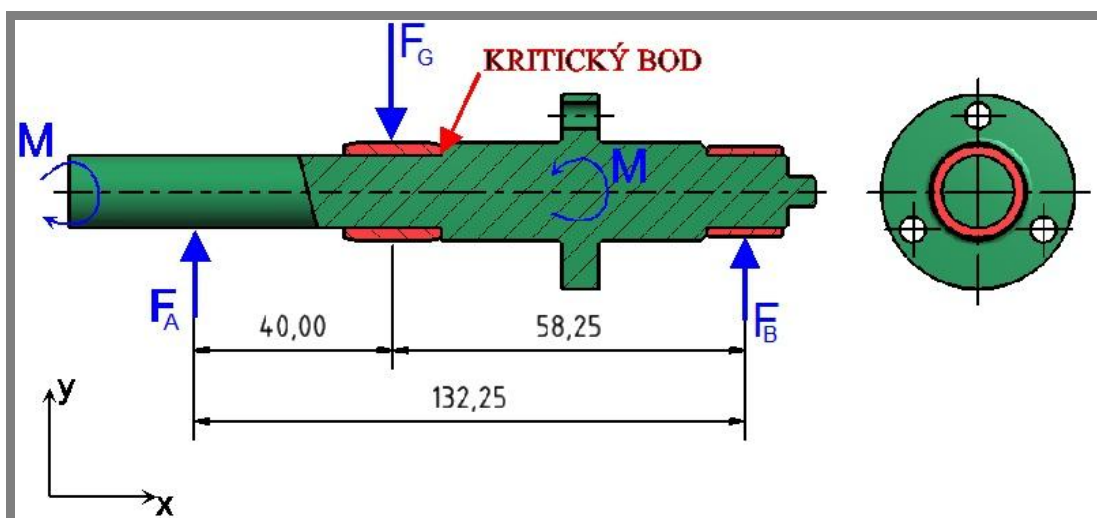
7

7.1. Hřídel

7.1.

Při rekonstrukci MR spojky došlo k zásadním změnám na hřídeli rotoru. Hřídel rotoru musí být z nemagnetického materiálu, aby magnetický tok procházel přes pracovní mezeru a ne hřídelem. Materiál pro hřídel byla použita automatová austenitická nerezová ocel s označením DIN 1.4305. Tato nerezová ocel se vyznačuje dobrou obrobiteľností, pevností v tahu $R_m=500-700\text{MPa}$, je nemagnetická, její dobrá obrobiteľnost je podmíněna horší odolností proti korozi a je nekalitelná.

Protože bude hřídel osazena dvojicí jehlových ložisek, je nutné, aby povrch pod nimi byl vytvrzený. Jelikož se tato ocel nedá kalit a nitridace z ekonomického hlediska nepřipadla v úvahu, musely být použity tvrzené vnitřní kroužky pod ložiska. Při výrobě hřídele byl kladen důraz na soustřednost obou ložiskových průměrů a na házení čelních ploch pro uchycení rotorových lamel.



Obr. 7.1 Hřídel s nalisovanými vnitřními kroužky kroužky

Hřídel je nejvíce namáhanou součástí sestavy. Kvůli použití tvrzených kroužků pod jehlová ložiska došlo ke zmenšení průměrů hřídele rotoru, proto je potřeba jej pevnostně zkontrolovat. Hřídel je namáhan krutem a ohybem za rotace, a proto je nutná jeho pevnostní kontrola:

Pevnostní parametry nerezové oceli 1.4305:

- $R_m = 500\text{MPa}$
- $\sigma_k = 190\text{MPa}$
- $\sigma_C = 160\text{MPa}$
- $\sigma_{CO} = 200\text{MPa}$

Pevnostní výpočet:

Předpokládáme hmotnost spojky i s vodním chlazením $5\text{kg} \rightarrow F_G = 50\text{N}$

$$M_k = 10\text{Nm}$$

Napětí v krutu τ_k [MPa]:

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_k}{\frac{\pi d^3}{16}} = \frac{10000\text{Nmm}}{\frac{\pi \cdot (12\text{mm})^3}{16}} = 29,47\text{MPa} \quad (2)$$

Momentová podmínka k bodu A:

$$\sum M_A = 0: -F_G \cdot 40\text{mm} + F_B \cdot 132,25\text{mm} = 0 \quad (3)$$

$$F_B = \frac{F_G \cdot 40\text{mm}}{132,25\text{mm}} = \frac{50\text{N} \cdot 40\text{mm}}{132,25\text{mm}} = 15,12\text{N} \quad (4)$$

Silová podmínka v ose Y:

$$\sum F_y = 0: F_A - F_G + F_B = 0 \quad (5)$$

$$F_A = F_G - F_B = 50\text{N} - 15,12\text{N} = 34,88\text{N} \quad (6)$$

Maximální ohybový moment M_{Omax} [Nmm]:

$$M_{Omax} = F_A \cdot 40\text{mm} = 34,88\text{N} \cdot 40\text{mm} = 1395,2\text{Nmm} \quad (7)$$

Napětí v ohybu σ_o [MPa]:

$$\sigma_o = \frac{M_{Omax}}{W_o} = \frac{M_{Omax}}{\frac{\pi d^3}{32}} = \frac{1395,2\text{Nmm}}{\frac{\pi (12\text{mm})^3}{32}} = 8,22\text{MPa} \quad (8)$$

Nominální redukované napětí σ_{RED} [MPa] podle podmínky HMM:

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\sigma_o^2 + 4 \cdot \tau_k^2} = \sqrt{(8,22\text{MPa})^2 + 3 \cdot (29,47\text{MPa})^2} = 51,7\text{MPa} \quad (9)$$

Zahrnutí vrubového součinitele:

$$\alpha_k = 2,2 \quad \alpha_o = 2,4$$

$$\sigma_{oex} = \alpha_o \cdot \sigma_o = 2,4 \cdot 8,22\text{MPa} = 19,73\text{MPa} \quad (10)$$

$$\tau_{kex} = \alpha_k \cdot \tau_k = 2,2 \cdot 29,47\text{MPa} = 64,83\text{MPa} \quad (11)$$

Výsledné redukované napětí σ_{VRED} [MPa]

$$\sigma_{VRED} = \sqrt{\sigma_{oex}^2 + 4 \cdot \tau_{kesx}^2} = \sqrt{(19,73)^2 + 3 \cdot (64,83)^2} = 114,01 \text{MPa} \quad (12)$$

Výsledná bezpečnost k_k [-]:

$$k_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{VRED}} = \frac{190 \text{MPa}}{114,01 \text{MPa}} = 1,67 \quad (13)$$

Výpočet na únavu:

$$\sigma_a = 8,22 \text{MPa}$$

$$k = \frac{250}{\sigma_{pt}} = \frac{250}{500} = 0,5 \quad (14)$$

$$v_1 = 1 - \sqrt{k \cdot \log \frac{h}{h_1}} = 1 - \sqrt{0,5 \cdot \log \frac{12 \text{mm}}{7,5 \text{mm}}} = 0,68 \quad (15)$$

$$v_2 = 1 + \left(\frac{\sigma_{co}}{\sigma_c} - 1 \right) \sqrt{\frac{h_1}{h}} = 1 + \left(\frac{200 \text{MPa}}{160 \text{MPa}} - 1 \right) \sqrt{\frac{7,5 \text{mm}}{12 \text{mm}}} = 1,156 \quad (16)$$

$$v = v_1 \cdot v_2 = 0,68 \cdot 1,156 = 0,786 \quad (17)$$

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0,85 \cdot 1 = 0,85 \quad (18)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 + \frac{\alpha - 1}{\alpha} \cdot \frac{k}{\sqrt{r}}} = \frac{2,4}{1 + \frac{2,4 - 1}{2,4} \cdot \frac{0,5}{\sqrt{0,3 \text{mm}}}} = 1,57 \quad (19)$$

Mez únavy skutečné součásti σ_c^* [MPa]

$$\sigma_c^* = \frac{\vartheta \cdot \eta}{\beta} \cdot \sigma_{co} = \frac{0,786 \cdot 0,85}{1,57} \cdot 200 \text{MPa} = 85,11 \text{MPa} \quad (20)$$

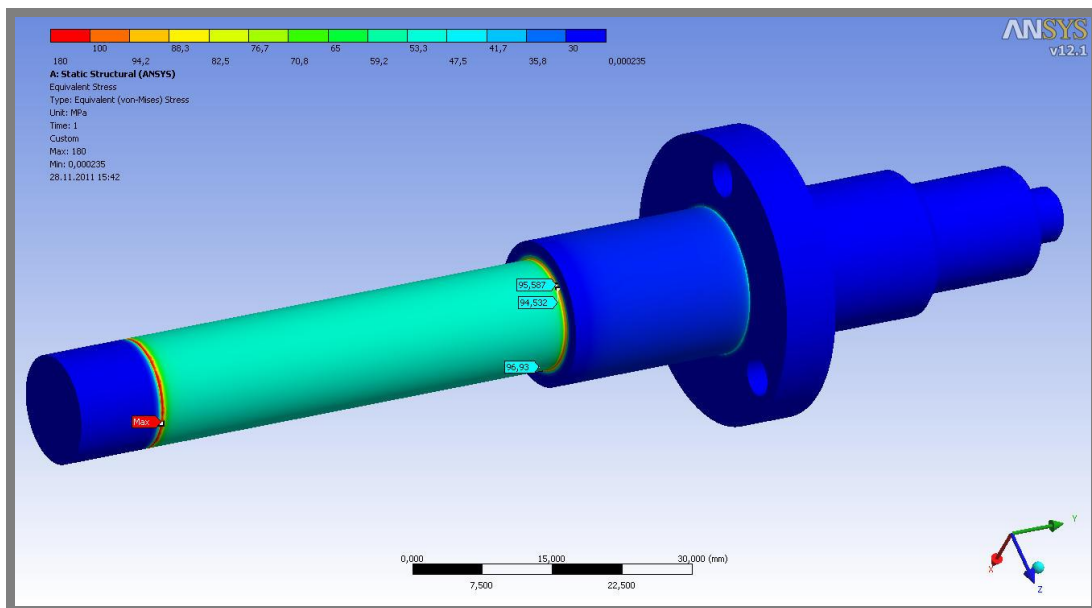
Výsledná bezpečnost na únavu k_c [-]:

$$k_c = \frac{\sigma_c^*}{\sigma_a} = \frac{85,11 \text{MPa}}{8,22 \text{MPa}} = 10,35 \quad (21)$$

Pevnostní výpočet hřídele rotoru v programu ANSYS

Při výpočtu v programu ANSYS metodou konečných prvků vyšlo maximální napětí ve vrubu 96MPa. Toto napětí by mělo vycházet přibližně stejně, rozdíl může

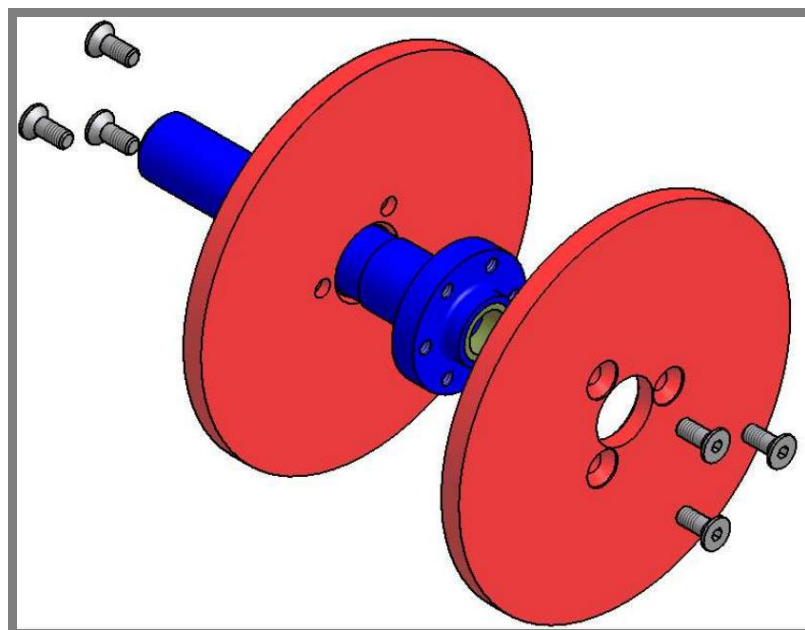
být v rozdílném volení vrubového součinitele. Maximální napětí 180MPa na konci hřídele je z důvodu zadání cylindrické vazby, ve skutečnosti bude výrazně nižší.



Obr. 7.2 Pevnostní výpočet hřídele rotoru v systému ANSYS

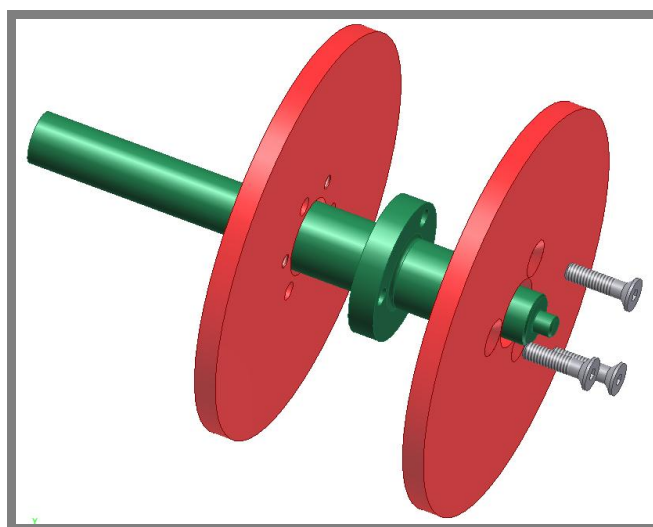
7.2. Uchycení lamel rotoru

U původního konstrukčního řešení bylo uchycení rotorových lamel ke hřídeli řešeno tak, že každá lamela byla zvlášť přišroubována k čelu hřídele pomocí tří zápusťných šroubů s kuželovou hlavou M4x10. Bylo to z toho důvodu, že šrouby byly z magnetického materiálu.



Obr. 7.3 Původní uchycení rotorových lamel [25]

Po úpravě byly použity šrouby z nemagnetických materiálů (austenitická nerezová ocel a mosaz). Toto řešení dovoluje upevnit obě rotorové lamely k hřídeli pomocí tří zápusných šroubů s kuželovou hlavou a to tak, že v jedné rotorové lamele bude původní otvor s vůlí pro dřík šroubu a zapuštění pro hlavu šroubu. V hřídeli bude průchozí otvor s vůlí pro dřík šroubu. A ve druhé lamele bude průchozí závitová díra. Tohle řešení má minimální zásah do současného provedení. Hřídel byla vyrobena nová z nerezové oceli s průchozími dírami na čele pro uchycení lamel. Jedna lamela byla ponechána v původním stavu a ve druhé lamele byly vyřezány závitové díry M4, pootočené vůči původním díram o 60°. Bylo tak učiněno proto, aby bylo v záběru více závitů šroubů.



Obr. 7.4 Současné uchycená rotorových lamel

Pevnostní výpočet šroubů:

Pevnostní charakteristiky mosazi:

- $R_m = 440 \text{ MPa}$
- $\sigma_k = 340 \text{ MPa}$

$$M_k = 10 \text{ Nm}$$

Zatěžující kroutící moment

$$r_k = 12,5 \text{ mm}$$

Poloměr roztečné kružnice šroubů

$$i = 3$$

Počet šroubů

$$s = 2$$

Počet třecích ploch

$$x = 5 \text{ mm}$$

Tloušťka rotorové lamely

$$P = 0,7 \text{ mm}$$

Rozteč závitu

$$d = 4 \text{ mm}$$

Velký průměr závitu

$$d_2 = 3,545 \text{ mm}$$

Střední průměr závitu

$$d_3 = 3,141 \text{ mm}$$

Malý průměr závitu

$$\alpha = 60^\circ$$

Úhel boků závitu

| | |
|------------------------|---|
| $f_{Ocel/Ocel} = 0,1$ | Součinitel tření mezi ocelí a nerezovou ocelí |
| $f_{Ocel/mosaz} = 0,5$ | Součinitel tření mezi ocelí a mosazí |
| $k_n = 1,5$ | Návrhový součinitel |

Momentová podmínka

$$M_t > M_k \quad (22)$$

$$F_N \cdot f_{Ocel/Ocel} \cdot r_k \cdot i \cdot s = M_k \cdot k_n \Rightarrow \quad (23)$$

$$\Rightarrow F_N = \frac{M_k \cdot k_n}{f_{Ocel/Ocel} \cdot r_k \cdot i \cdot s} = \frac{10000Nmm \cdot 1,5}{0,1 \cdot 12,5mm \cdot 3 \cdot 2} = 2000N \quad (24)$$

Napětí v tahu šroubu σ_t [MPa]

$$\sigma_t = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi d_3^2}{4}} = \frac{2000N}{\frac{\pi \cdot (3,141mm)^2}{4}} = 258,11MPa \quad (25)$$

Bezpečnost v tahu šroubu k_t [-]

$$k_t = \frac{\sigma_k}{\sigma_t} = \frac{340MPa}{258,11MPa} = 1,32 \quad (26)$$

Kontrola tlaku v závitech šroubu:

Počet činných závitů n [-]

$$n = \frac{x}{P} = \frac{5mm}{0,7mm} = 7,14 \quad (27)$$

Tlak v závitech p [MPa]

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_3^2) \cdot n} = \frac{2000N}{\frac{\pi}{4} (4^2mm^2 - 3,141^2mm^2) \cdot 7,14} = 58,12MPa \quad (28)$$

Bezpečnost v tlaku v závitech k_p [-]

$$k_p = \frac{\sigma_k}{p} = \frac{340MPa}{58,12MPa} = 5,85 \quad (29)$$

Výpočet utahovacího momentu:

Efektivní součinitel tření

$$f' = \frac{f_{ocel/mosaz}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{0,05}{\cos\left(\frac{60^\circ}{2}\right)} = 0,0577 \quad (30)$$

Třecí úhel

$$\nu_f = \arctg(f') = \arctg(0,0577) = 3,3^\circ \quad (31)$$

Úhel stoupání závitu

$$\beta_z = \arctg\left(\frac{P}{\pi \cdot d}\right) = \arctg\left(\frac{0,7mm}{\pi \cdot 4mm}\right) = 3,19^\circ \quad (32)$$

Utahovací moment

$$\begin{aligned} M_u &= F_n \cdot \left[f_{ocel/mosaz} \cdot \frac{d}{2} + \operatorname{tg}(\vartheta + \beta) \cdot \frac{d_2}{2} \right] \\ &= 2000N \cdot \left[0,05 \cdot \frac{4mm}{2} + \operatorname{tg}(3,3^\circ + 3,19^\circ) \cdot \frac{3,545mm}{2} \right] \\ &= 603,44Nmm \end{aligned} \quad (33)$$

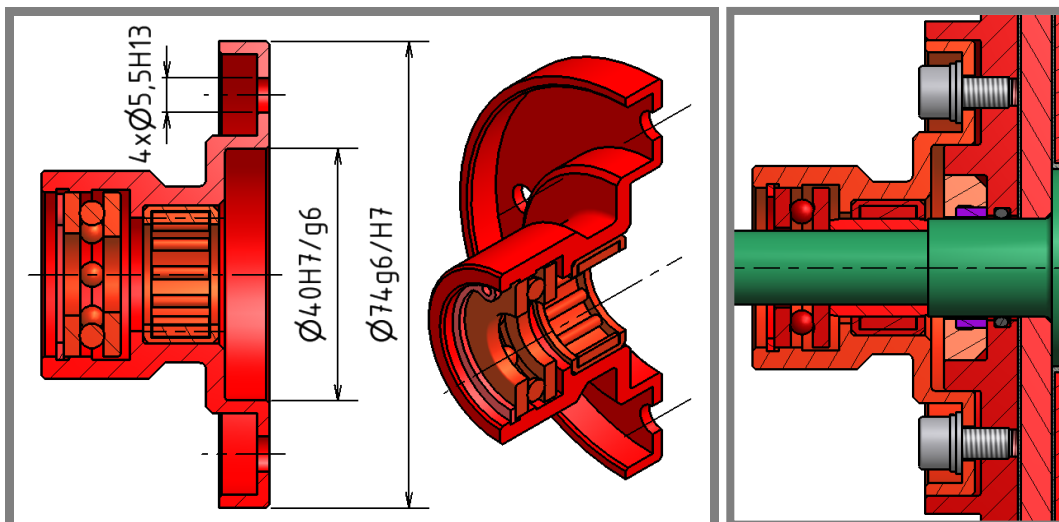
7.3. Příruba ložisek

7.3.

Tato příruba slouží, jak bylo uvedeno výše, jako nosič dvojice ložisek uložení rotorového hřídele.

- Axiální kuličkové ložisko 51101
- Jehlové radiální ložisko HK 1612
- Pojistný kroužek do díry Ø26x1,2

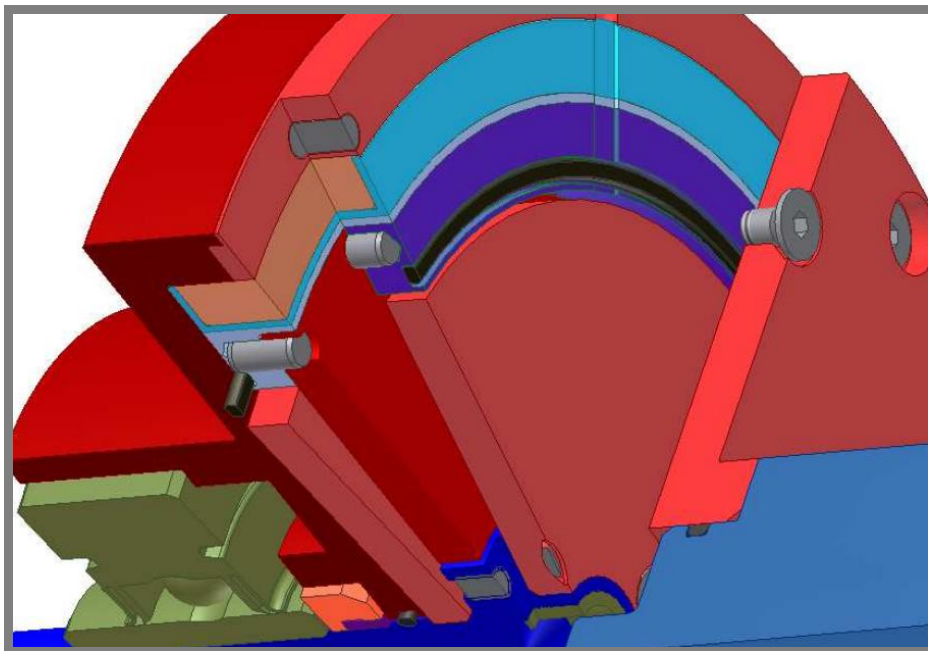
Dále slouží k vytvoření předpětí mezi axiálními ložisky rotorového hřídele. Toto předpětí je realizováno pomocí čtyř šroubů M5x0,5. Je vyrobena z konstrukční uhlíkové oceli 11 523. Při její konstrukci byl kladen důraz na co nejnižší váhu. Příruba ložisek, osazena ložisky se nasune do vybrání v těle statoru, kde je přesně středěna na vnitřním průměru 40mm pomocí uložení H7/g6 a na vnějším průměru 74mm pomocí uložení g6/H7, jak je uvedeno na obr.7.5.



Obr. 7.5 Příruba ložisek

7.4. Modernizace uchycení částí statoru

U původního provedení byla montáž a demontáž zbytečně složitá. Obě hlavní statorové části byly sešroubovány pomocí čtyř šroubů M4 po obvodu statoru. Vnitřní části statoru (příložky a statorová lamela) byly do sebe usazeny pomocí kolíků. Bylo to z důvodu izolace magnetického toku přes pracovní mezeru.

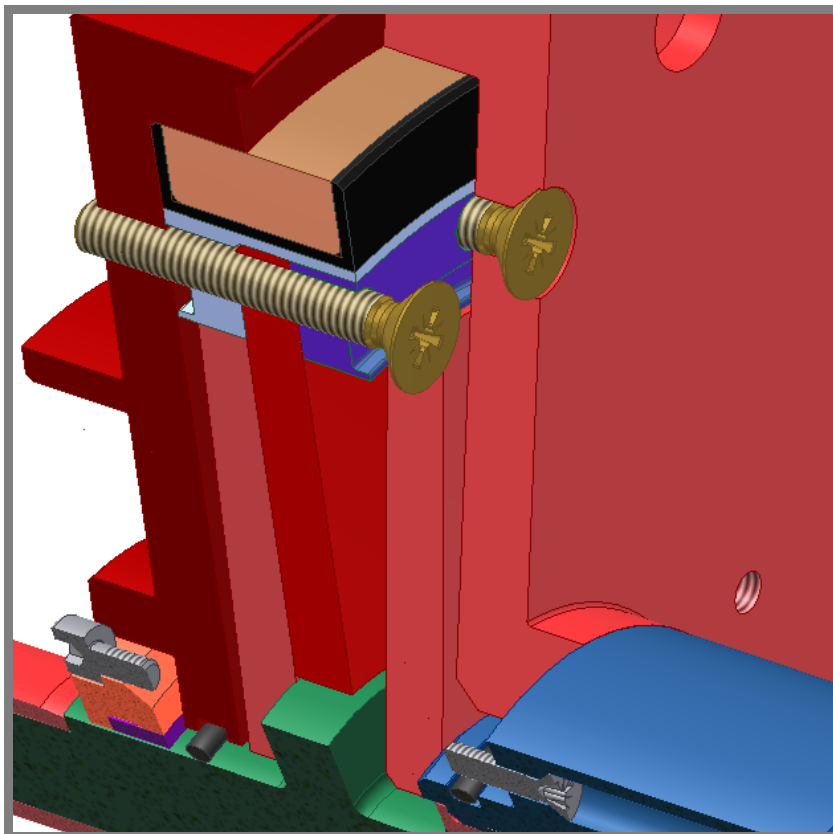


Obr. 7.6 Původní způsob sestavení statoru MR spojky [26]

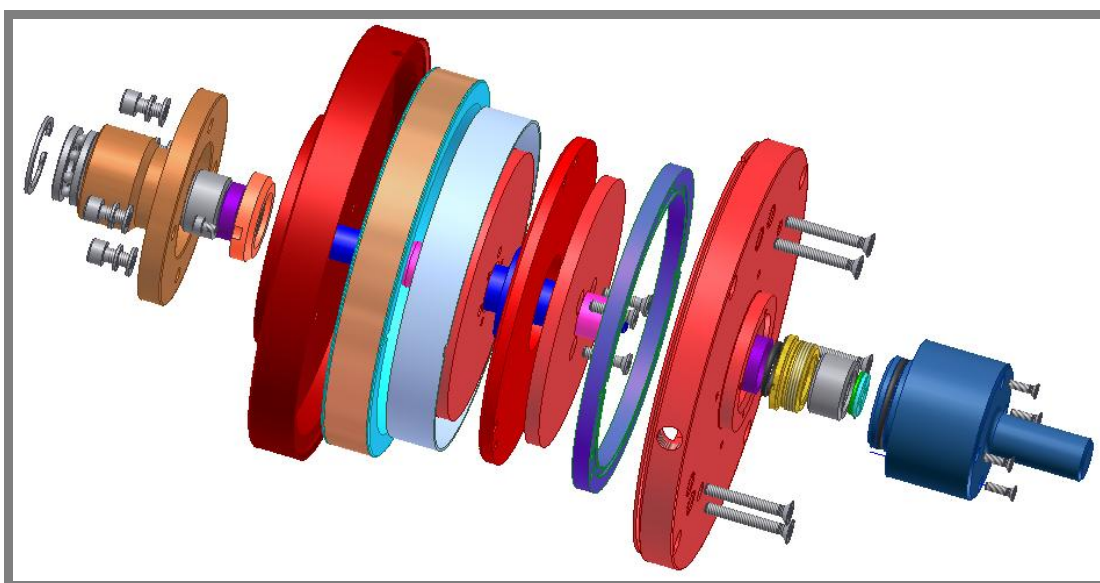
Při použití šroubů z nemagnetického materiálu (mosaz, nerezová ocel) může být celý stator sešroubován průchozími šrouby. Po úpravě se celý stator stáhne šesti mosaznými (nerezovými) šrouby, které jsou umístěny nad utěsněnou pracovní mezerou. Pro tyto šrouby byly využity otvory pro kolíky ve statorové lamela a u

obou příložek, které byly na totožné roztečné kružnici jako tři šrouby přitahující „Vnější příložku“ ke statoru. Do statoru byly vyvrtány další tři otvory, vnitřní části byly vhodně vůči sobě pootočený a do protější strany statoru byly vyvrtány závitové díry.

Výhodou je jednodušší smontovatelnost.



Obr. 7.7 Současný způsob sestavení statoru MR spojky

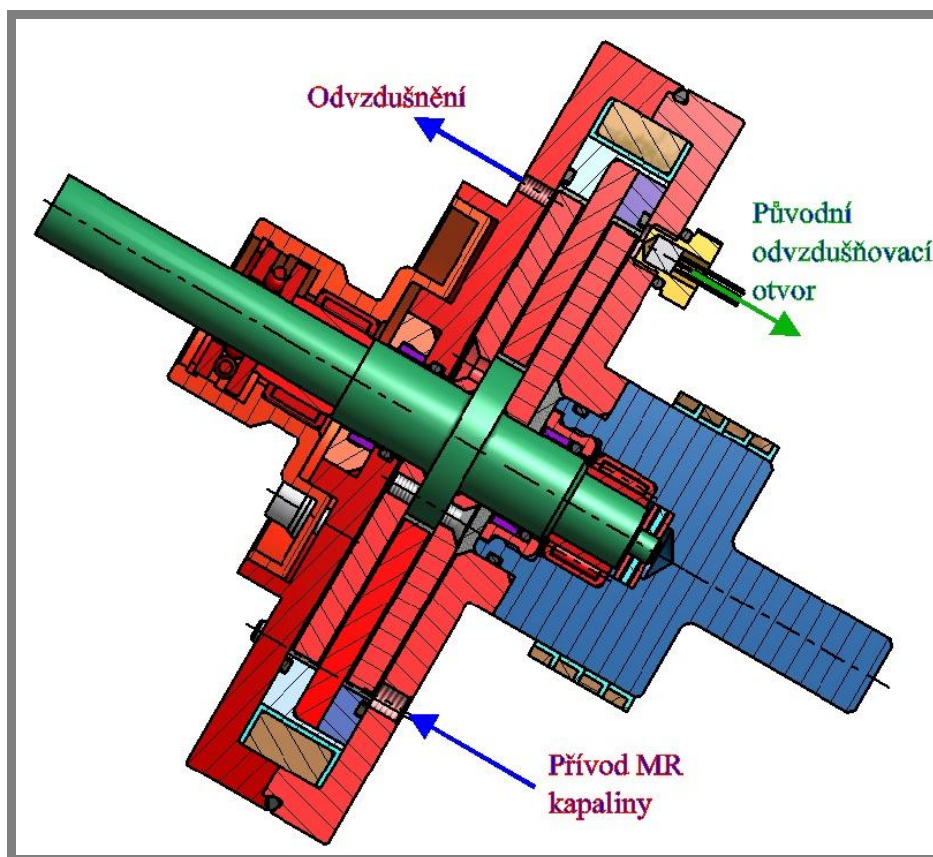


Obr. 7.8 Rozložený pohled

7.5. Plnění pracovní mezery

Původně se MR kapalina plnila pomocí stejného otvoru jako nyní, ale pro odvzdušnění sloužil otvor pro teploměr. Úprava spočívala ve vyvrtání nového otvoru ve vhodném místě, tedy v nejvyšším možném místě pracovní mezery. MR spojka při plnění bude v šikmé poloze, jak je uvedeno na obr. 6.9, tak aby odešlo co nejvíce vzduchu pryč z pracovní mezery a zcela ji zaplnila MR kapalina. Po naplnění se otvory zašroubují stavěcími šrouby utěsněny teflonovou páskou.

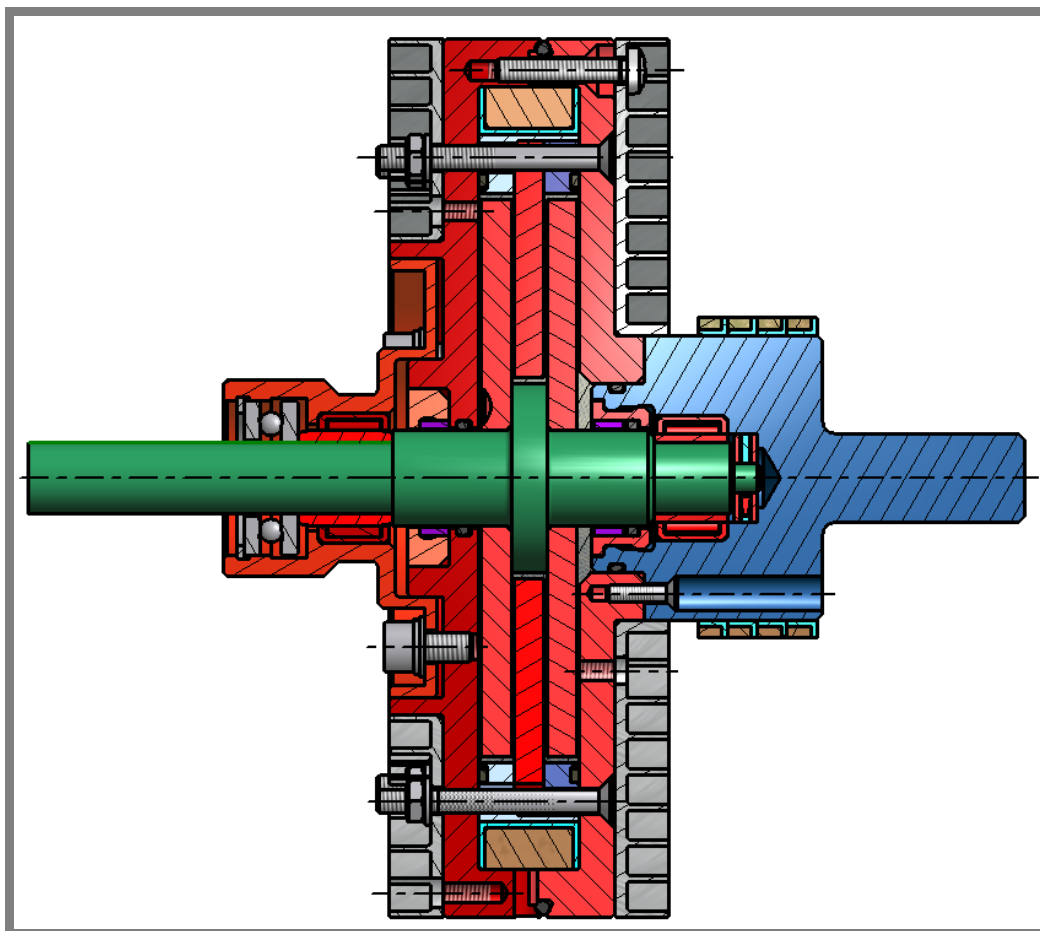
Pracovní mezeru by mělo zaplnit přibližně 18 ml MR kapaliny. U původního způsobu plnění se dalo do pracovní mezery napustit přibližně 12 ml MR kapaliny. Po úpravě plnění se do pracovní mezery dá napustit 17 ml MR kapaliny.



Obr. 7.9 Úprava plnění pracovní mezery

7.6. Konstrukce vzduchového chlazení

Jako materiál byl zvolen hliník s označením AW 2017, který byl pro nás dobře dostupný. Při výrobě byl kladen důraz na strukturu povrchu stykové plochy vzduchového chlazení se statorem, pro maximální odvod tepla. Uchycení ke statoru spojky je realizováno na jedné straně pomocí čtyř šroubů M4 a na druhé straně je chlazení staženo ke statoru pomocí šesti matic našroubovaných na delší mosazné šrouby spojující sestavu statoru.



Obr. 7.10 Uchycení vzduchového chlazení

7.7. Montáž

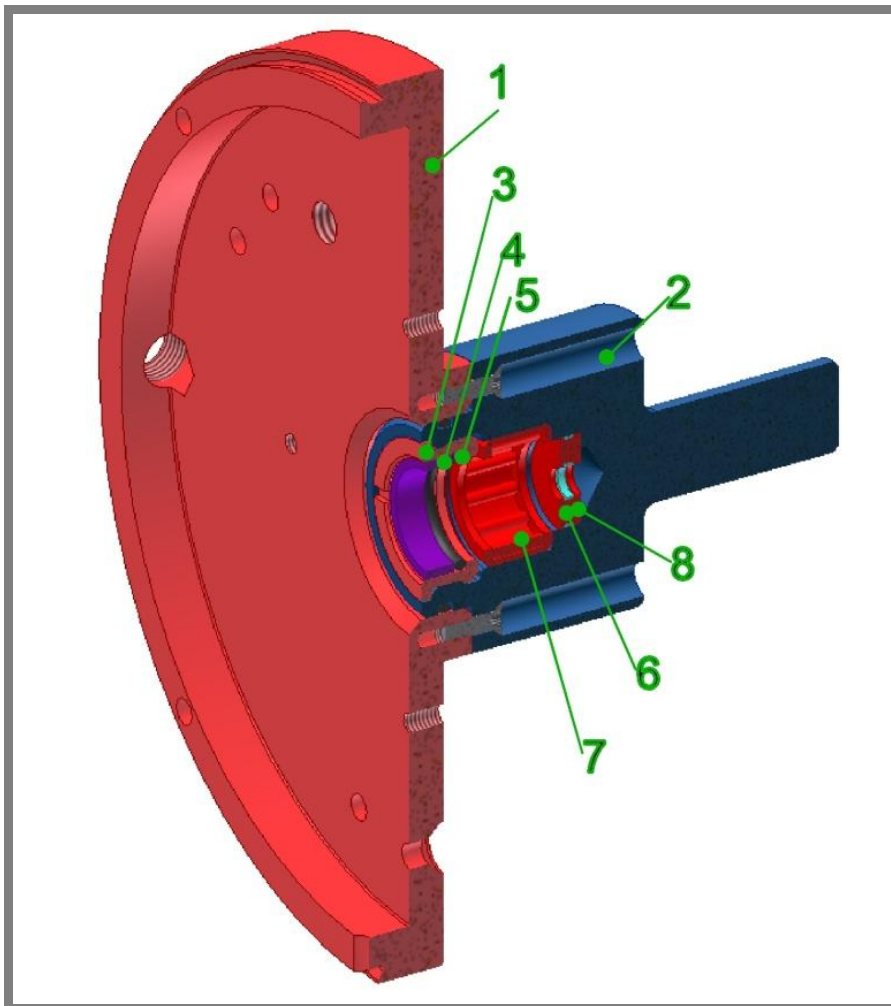
Montáž sestavy MR spojky sestává ze sestavení několika dílčích podsestav, které se už dále nerozebírají:

- Podsestava příruby ložisek (uvedeno výše) obr.7.5
- Podsestava „Levé části“ obr. 7.15
- Podsestava vnitřních komponent obr.7.16
- Podsestava pravé části statoru obr. 7.17

Podsestava „Levé části“

Podsestava „Levé části“ sestává z těchto dílů:

- 1) Levá část statoru
- 2) Levá část
- 3) Nosič těsnících komponent
- 4) Magnetické těsnění
- 5) O.K. 16x1,8
- 6) Ložisko AXK 0619TN
- 7) Ložisko HK 1512
- 8) Axiální tvrzený kroužek AS 0619

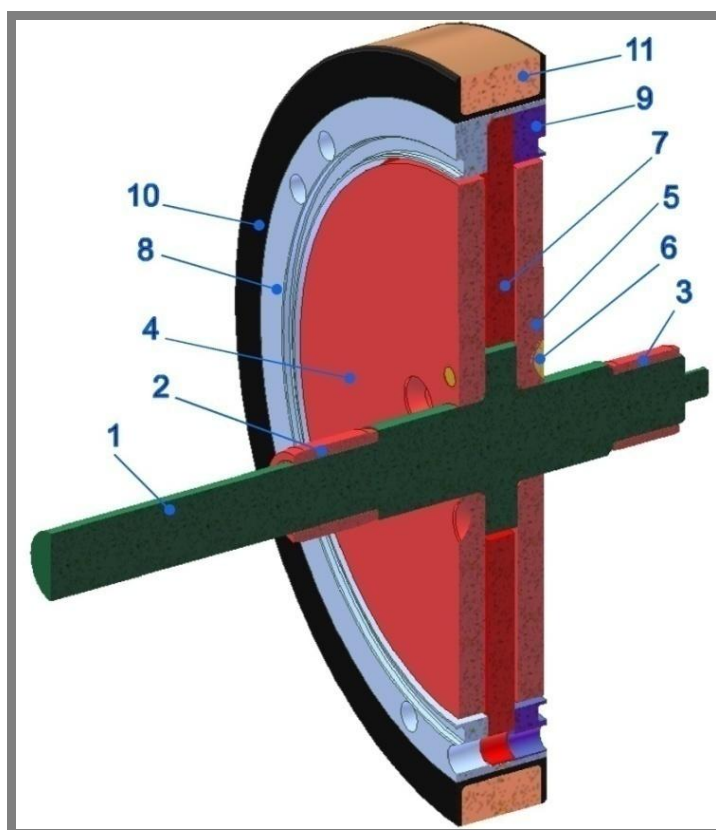


Obr. 7.11 Podsestava „Levé části“

Podstava vnitřních komponent

Podstava vnitřních komponent sestává z těchto dílů:

- 1) Hřídel rotoru
- 2) Tvrzený kroužek IR 12x16x20
- 3) Tvrzený kroužek IR 12x15x12,5
- 4) Rotorová lamela – závit
- 5) Rotorová lamela
- 6) Šrouby se zápustnou hlavou 3 x M5x16
- 7) Statorová lamela
- 8) Vnější rámeček
- 9) Vnější příložka
- 10) Obal cívky
- 11) Cívka

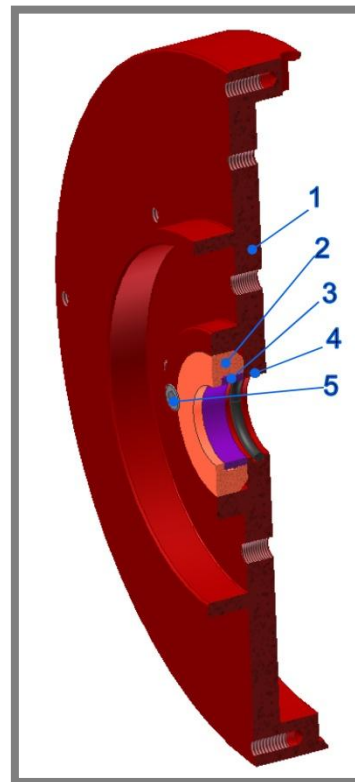


Obr. 7.12 Podstava vnitřních komponent

Podsestava pravé části statoru

Podsestava pravé části statoru sestává z těchto dílů:

- 1) Pravá část statoru
- 2) Pouzdro magnetu
- 3) Magnetické těsnění
- 4) O.K. 16x2
- 5) Zápustné šrouby s válcovou hlavou, iambus 2 x M3x5



Obr. 7.13 Podsestava pravé části statoru

Tyto jednotlivé podsestavy se utěsní patřičnými o-kroužky a smontují dohromady pomocí šestice mosazných (nerezových) šroubů M4x30. K nim se přimontuje příruba ložisek a sestava spojky je kompletní. Pokud je potřeba sestavu doplnit ještě o vzduchové chlazení, vymění se mosazné šrouby M4x30 za delší mosazné šrouby M4x40. Na obě čela se nasune žebrování a stáhne ke statoru viz kap. 7.6.

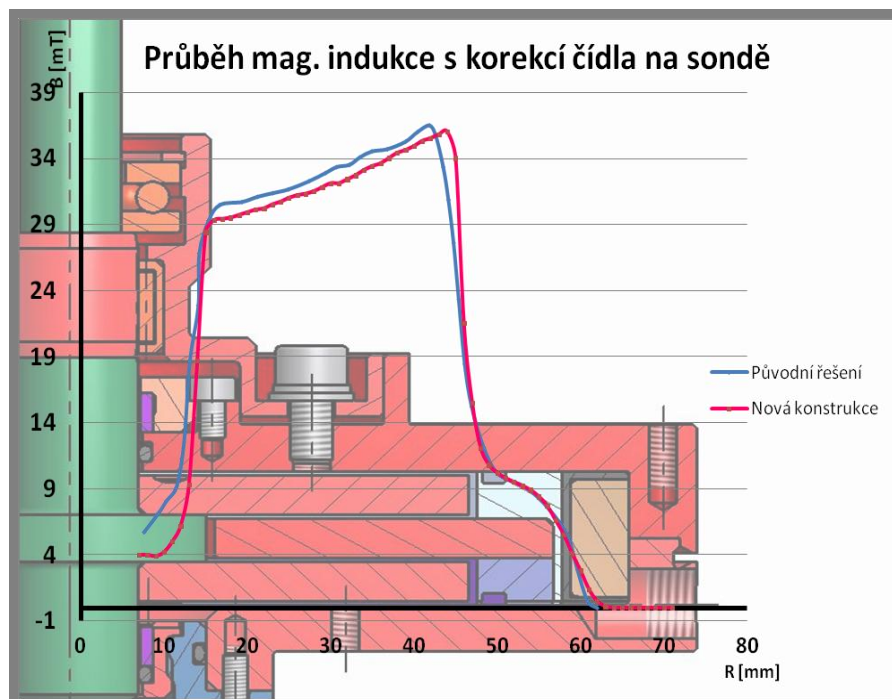
7.8. Experimentální ověření provozních parametrů

V tomto bodě budou porovnány provozní parametry MR spojky po rekonstrukci s původní variantou.

7.8.1. Experimentální měření magnetického pole

Bylo provedeno experimentální měření magnetického pole podle výše uvedeného postupu. Zjistilo se, že autor předcházející konstrukce neměřil přesně polohu Hallovy sondy při zasouvání do měřicí drážky a neudělal korekci polohy čidla na sondě.

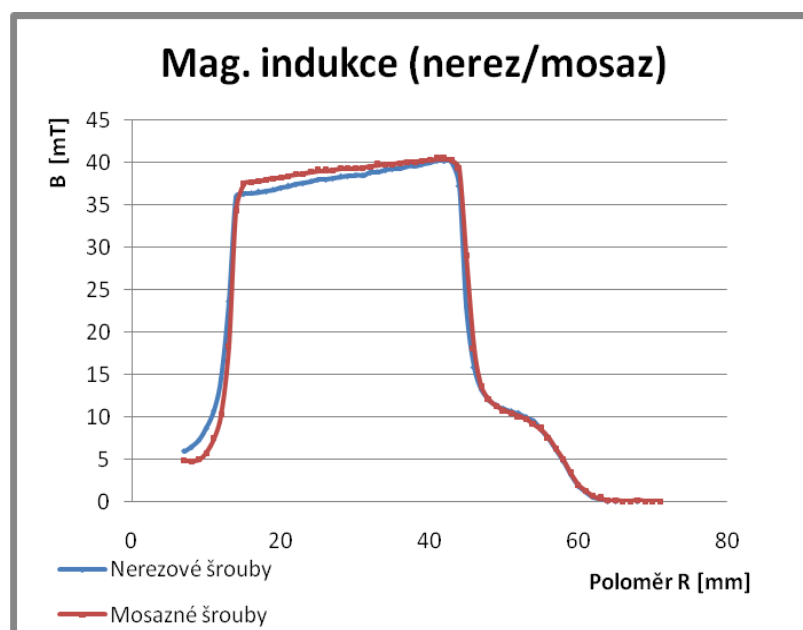
Na následujícím grafu je znázorněn skutečný průběh mag. indukce, který počítá s korekcí polohy čidla na sondě. Měření bylo provedeno při konstantním proudu v cívce $I=1,5A$. Původní i nové měření byly prováděny v odmagnetovaném stavu. Při novém měření byly použity mosazné šrouby.



Obr. 7.14 Průběh mag. indukce s korekcí polohy čidla na sondě

Průběh mag. indukce u nového měření se nepatrně liší oproti původnímu. A to proto, že nové měření bylo provedeno s korekcí polohy čidla na sondě. Proto jsou průběhy od sebe nepatrně posunuté. Z grafu lze vyčíst, že po rekonstrukci MR spojky se žádným způsobem nenarušili její dosavadní mag. vlastnosti.

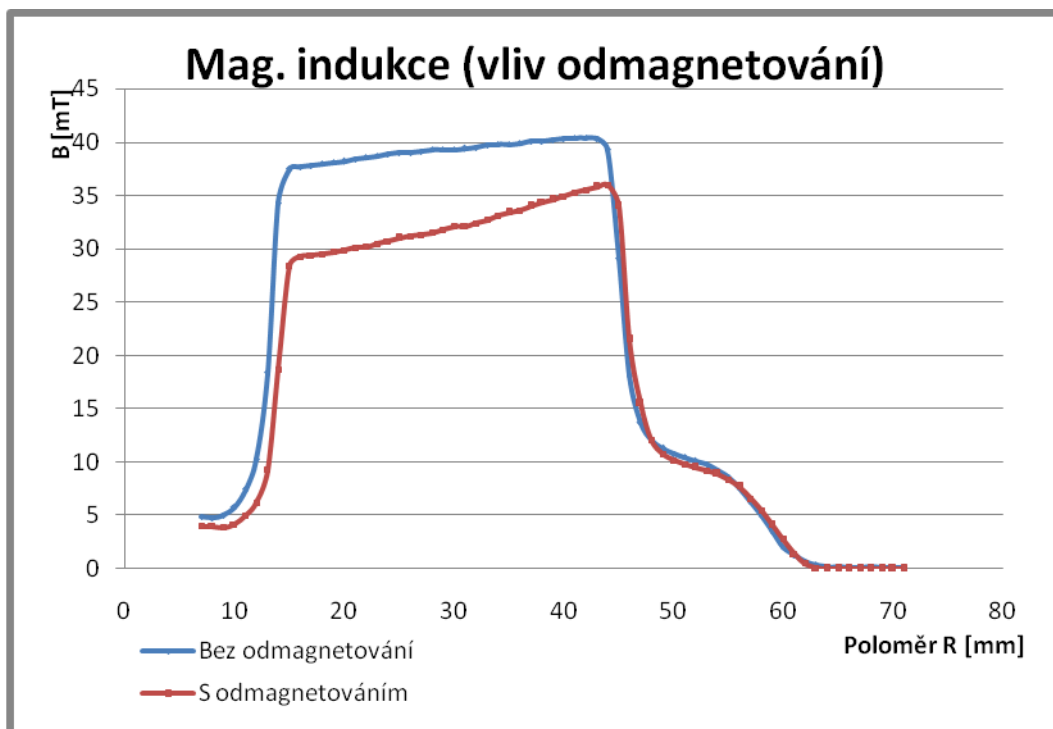
Dále bylo provedeno experimentální měření mag. indukce sondou STD 18-0404 pro šrouby s nerezové oceli a pro šrouby z mosazi. Výsledky jsou porovnány v následujícím grafu.



Obr. 7.15 Porovnání mag. indukce pro mosazné a nerezové šrouby

Z grafu vyplývá, že při montáži s mosaznými šrouby je mag. indukce vyšší. Je to díky nižší permeabilitě mosazi. Přestože by nerezové šrouby neměly být magnetické, při přiložení silného neodymového magnetu, byly lehce přitahovány. Nerezové šrouby jsou tedy lehce magnetické, proto je mag. indukce při jejich montáži nižší. Z grafu je patrné, že rozdíl je téměř zanedbatelný.

Dále bylo provedeno měření vlivu odmagnetování na mag. indukci MR spojky. Výsledky měření byly vyneseny do následujícího grafu.



Obr. 7.16 Vliv odmagnetování na výslednou mag. indukci

Neodmagnetovaný stav byl měřen následujícím způsobem:

- Zmagnetováno proudem $I = 3,4\text{A}$
- Sníženo na $1,5\text{A}$
- Provedeno měření Hallovou sondou STD 18-0404

Odmagnetovaný stav byl měřen následujícím způsobem:

- Odmagnetováno (postupným snižováním proudu při současném přepólování cívky)
- Nastaven proud $I = 1,5\text{A}$
- Provedeno měření Hallovou sondou STD 18-0404

Z grafu vyplývá, že odmagnetování po každém použití MR spojky má výrazný vliv na mag. indukci, tedy i na přenášený kroutící moment.

7.8.2. Experimentální měření kroutícího momentu

Funkčnost MR spojky a její provozní parametry byly experimentálně ověřeny na soustruhu v dílnách ÚK. Spojka byla testována v brzděném režimu. Rotor byl upnut do sklíčidla a výstupní konec hřídele do kluzného pouzdra v pinole koníku. Na vnější část statoru byla přišroubována závitová tyč, jejíž konec byl opřen o tenzometrický snímač síly.



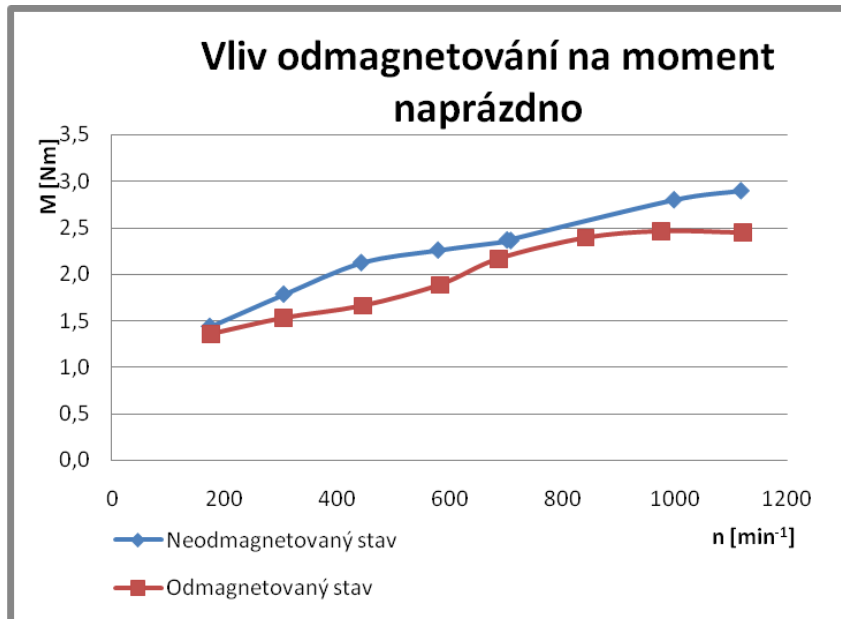
Obr. 7.17 Experimentální měření kroutícího momentu

Kolega, který spojku konstruoval, vycházel z teoretických hodnot otáček, uvedených na potenciometru soustruhu. Všechny jeho grafy jsou tedy zkreslené oproti realitě. Při vypracování těchto měření byly měřeny reálné otáčky rotoru a byly vyneseny do grafů. Zde je uvedena tabulka s přepočtem otáček.

Tab. 7.1 Přepočet otáček vřetene soustruhu

| Teoretická hodnota RPM | Skutečná hodnota RPM |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 56 | 188 |
| 400 | 308 |
| 800 | 447 |
| 1200 | 582 |
| 1600 | 712 |

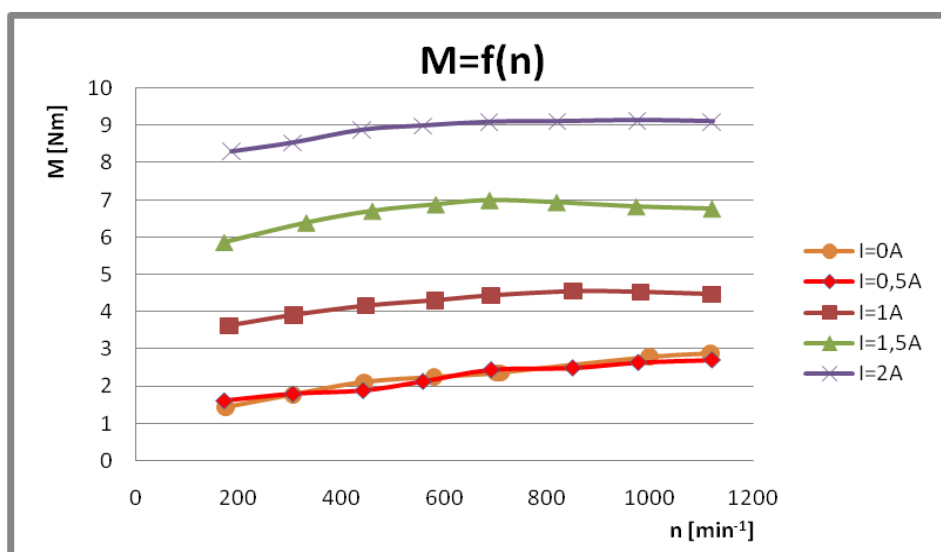
Bylo provedeno měření porovnávající momenty naprázdno u zmagetované a odmagetované naplněné MR spojky. Výsledky byly vyneseny do následujícího grafu.



Obr. 7.18 Vliv odmagetování na moment naprázdno

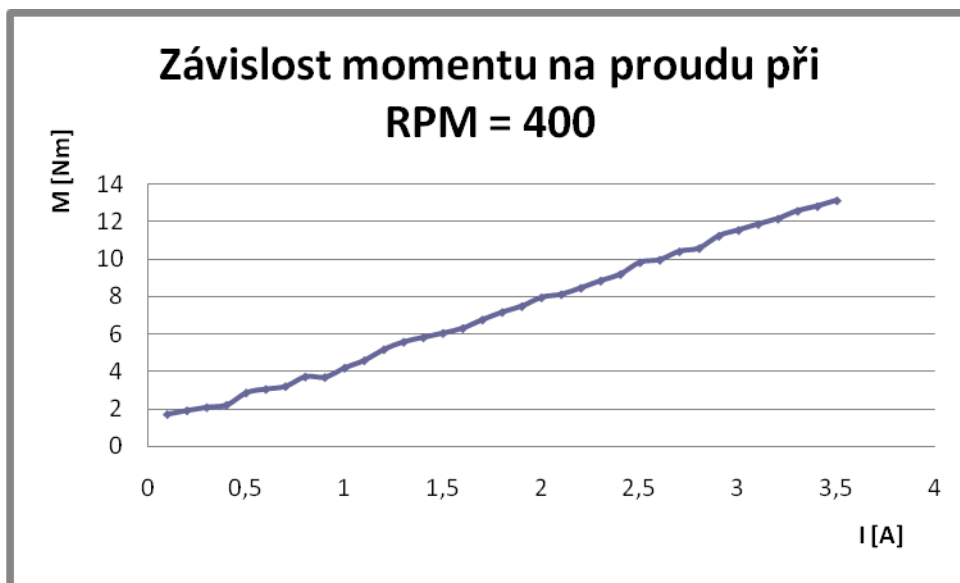
Rozdíl průběhů momentů je způsoben zbytkovým zmagetováním částí MR spojky.

Dále bylo provedeno měření momentových charakteristik v závislosti na budícím proudu cívky. Měření byla prováděna ještě před úpravou plnění, takže současné dosahované momenty budou značně vyšší viz. kap. 7.5. Měření bylo prováděno v neodmagetovaném stavu, který odpovídá zmagetování při budícím proudu cívky $I = 3,5\text{A}$.



Obr. 7.19 Momentové charakteristiky

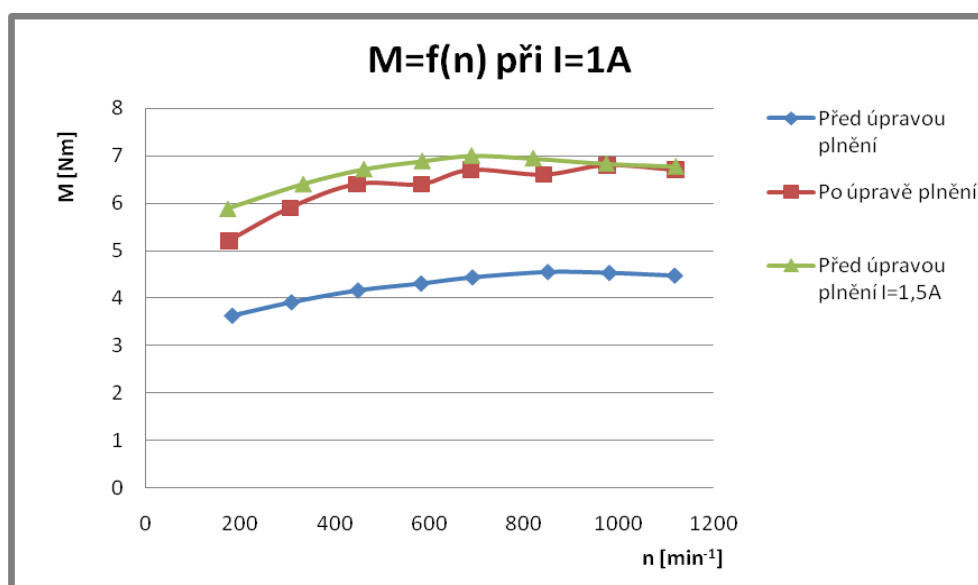
Dále bylo provedeno měření průběhu kroutícího momentu v závislosti na budícím proudu cívky. Měření bylo prováděno při konstantních otáčkách hřídele rotoru $RPM = 400$.



Obr. 7.20 Závislost momentu na budícím proudu při RPM = 400

Z grafu je patrné, že průběh je téměř lineární.

Bylo provedeno srovnávací měření momentových charakteristik před a po úpravě plnění pracovní mezery. Měření bylo provedeno za stejných podmínek: při otáčkách rotoru 400RPM a při budícím proudu cívky $I = 1A$. Výsledky byly vykresleny do grafu.



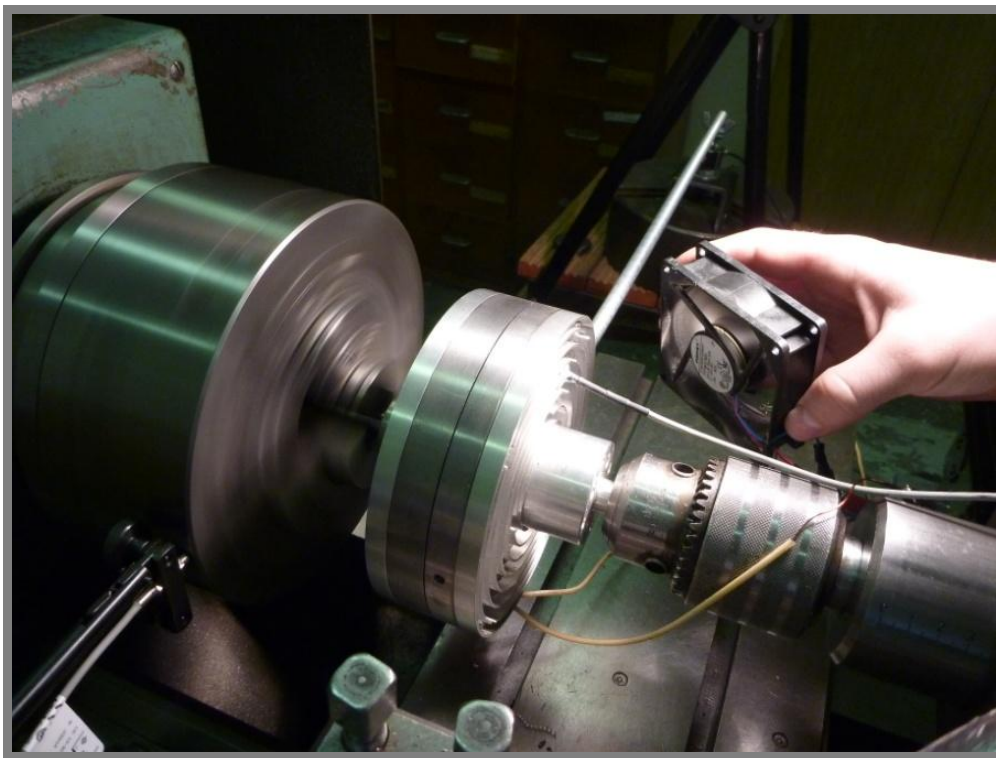
Obr. 7.21 Vliv úpravy plnění na momentovou charakteristiku

Pro porovnání byl vynesena i průběh momentové charakteristiky před úpravou plnění při budícím proudu cívky $I = 1,5A$. Z grafu vyplývá, že po úpravě plnění

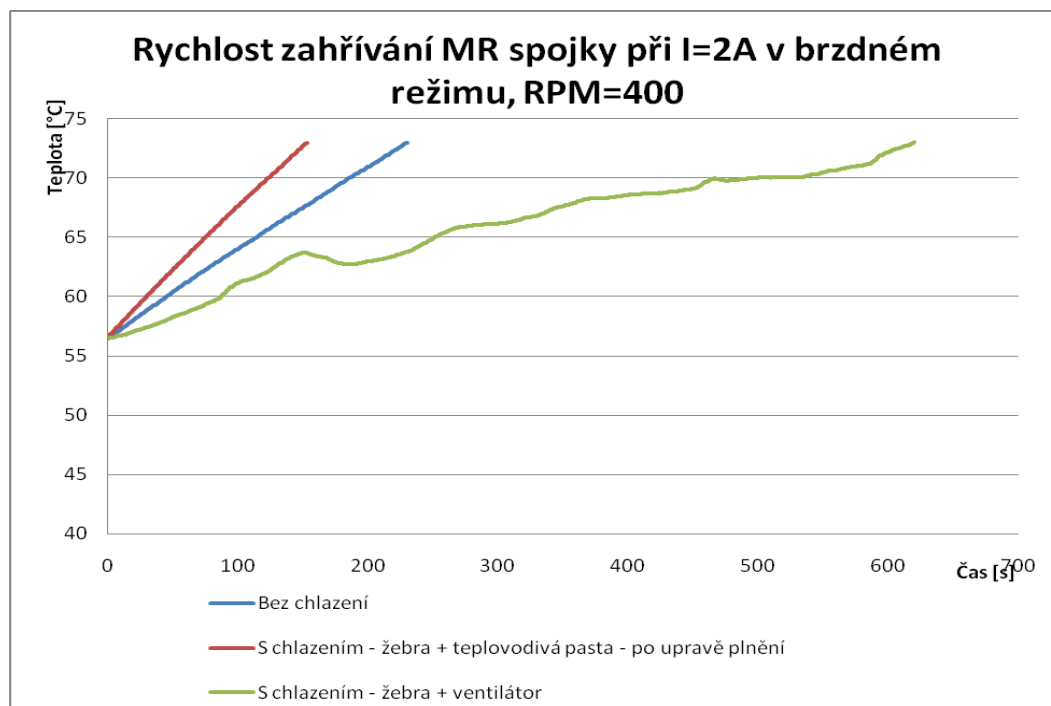
moment při budícím proudu $I = 1\text{A}$ dosahuje přibližně stejných hodnot jako před úpravou při proudu $I = 1,5\text{A}$. Když porovnáme nárůst kroutícího momentu při stejném budícím proudu cívky, je přibližně o 30% vyšší.

7.8.3. Experimentální měření teploty

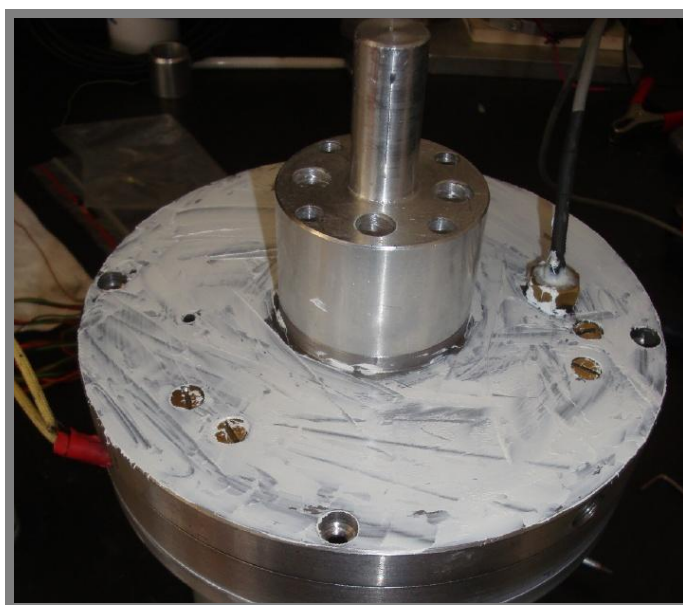
Navržené vzduchové chlazení bylo vyrobeno a otestováno za provozu. Měření bylo prováděno při konstantním proudu v cívce $I=2\text{A}$ a konstantních otáčkách $\text{RPM}=400$. Za pomoci námi sestaveného teploměru LM35 (viz Příloha I) jsme nejprve změřili průběh nárůstu teploty těla spojky bez chlazení. Poté jsme počkali, až se spojka ochladí, a měření opakovali se vzduchovým chlazením. Měření jsme opakovali ještě jednou za použití ventilátoru z procesoru o průměru 60mm, který jsme přidržovali v těsné blízkosti. Naměřené hodnoty jsme vynesli do grafu.



Obr. 7.22 Zjišťování průběhu teploty se vzduchovým chlazením a ventilátorem

Obr. 7.23 Rychlost zahřívání MR spojky při $I = 2A$

Uvedené charakteristiky jsou měřeny v různých režimech. Měření průběhu teploty bez chlazení bylo prováděno ještě před úpravou plnění pracovní mezery, takže pracovní mezera nebyla zcela zaplněna MR kapalinou. Měření s žebrovaným chlazením, doplněné ventilátorem bylo také prováděno před úpravou plnění pracovní mezery. Při tomto chlazení se spojka stíhala uchládit při teplotě okolo $80^{\circ}C$. Průběh teploty MR spojky s žebrovaným chlazením a teplovodivou pastou byl měřen po úpravě plnění pracovní mezery, kdy byla zcela zaplněna MR kapalinou. Nárůst teploty je tedy podstatně vyšší a to díky většímu přenášenému momentu a větším odporům v pracovní mezeře. Nemůžeme tyto průběhy vůči sobě porovnávat.



Obr. 7.24 Nanesení teplovodivé pasty pod vzduchové chlazení

7.9. Hmotnostní rozvaha

Uvedená hmotnostní rozvaha je brána bez vodního chlazení.

Tab. 7.2 Hmotnostní rozvaha

| Název součásti | Ks | Hmotnost [kg] |
|--------------------------------|----|---------------|
| Levá část statoru | 1 | 0,981 |
| Pravá část statoru | 1 | 1,102 |
| Statorový hřídel | 1 | 0,147 |
| Rotorový hřídel | 1 | 0,167 |
| Statorová lamela | 1 | 0,360 |
| Rotorová lamela | 1 | 0,262 |
| Rotorová lamela - závit | 1 | 0,260 |
| Rámeček vnější | 1 | 0,060 |
| Příložka vnější | 1 | 0,043 |
| Obal cívky | 1 | 0,032 |
| Cívka | 1 | 0,369 |
| Pouzdro magnetu | 1 | 0,022 |
| Permanentní magnet | 2 | 0,006 |
| MR kapalina | 1 | 0,145 |
| Nosič těsnících komponent | 1 | 0,013 |
| Tvrzený kroužek IR 12x15x12,5 | 1 | 0,006 |
| Ložisko HK 1512 | 1 | 0,010 |
| Ložisko AXK 0619TN | 1 | 0,003 |
| Tvrzený kroužek IR 12x16x20 | 1 | 0,011 |
| Ložisko 51101 | 1 | 0,019 |
| Ložisko HK 1612 | 1 | 0,011 |
| Vzduchové chlazení levé části | 1 | 0,136 |
| Vzduchové chlazení pravé části | 1 | 0,109 |
| Spojovací a těsnící materiál | | 0,262 |
| Celkem | | 4,274 |

Celková váha původní varianty byla 3,781 kg. Po rekonstrukci je váha MR spojky bez chlazení 4,03Kg. Je tedy o 0,249kg těžší. Toto váhové navýšení má za následek změna materiálu hřídele rotoru z hliníku na nerezovou ocel.

Ve spolupráci s kolegou Josefem Dluhošem, který celou sestavu a její funkci modeluje v systému MKP, bylo zjištěno, že odlehčení na čelech statoru je nepřípustné z důvodu správné funkce magnetického toku MR spojkou. Vhodná místa pro odlehčení MR spojky jsou po obvodu statoru a celkové zúžení vnitřních komponent spojky. Síla lamel nemá žádný účinek na přenášený kroutící moment. Celá spojka tedy může být odlehčena jejím zúžením.

7.10. Ekonomická rozvaha

Veškeré úpravy byly prováděny v dílnách ÚK, takže ekonomická rozvaha zahrnuje ceny položek jako je hutní materiál a normalizované díly.

Tab. 7.3 Ekonomická rozvaha

| Materiál | Cena [Kč] |
|---|------------------|
| Materiál pro hřídel rotoru DIN 1.4305 - 300mm | 265,00 |
| Axiální jehlové ložisko: AXK 0619TN | 80,00 |
| Jehlové radiální ložisko: HK 1512 | 62,00 |
| Tvrzený kroužek: IR 12x15x12,5 | 84,00 |
| 2x Tvrzený axiální kroužek: AS0619 | 15,00 |
| Axiální kuličkové ložisko: 51101 | 48,20 |
| Jehlové radiální ložisko: HK 1612 | 66,50 |
| Tvrzený kroužek: IR 12x16x20 | 105,30 |
| Pojistný kroužek do díry Ø26 | 2,00 |
| 3 x Mosazné šrouby DIN963 M4x16 | 5,84 |
| 6 x Mosazné šrouby DIN963 M4x30 | 15,00 |
| 3 x Nerezové šrouby DIN 965 A2 M4x16 | 1,00 |
| 6 x Nerezové šrouby DIN 965 A2 M4x30 | 3,60 |
| Celkem | 753,44 |

8. ZÁVĚR

Byla provedena rekonstrukce MR spojky určené pro testy trvanlivosti MR kapalin. Celá rekonstrukce byla realizována s ohledem na snadné sestavení a rozebrání MR spojky, přesnosti uložení jednotlivých komponent a cenovou dostupnost jednotlivých normalizovaných dílů. Celá rekonstrukce byla prováděna na základě stávajících komponent, tak aby se vyrábělo co nejméně nových dílů.

Byla provedena experimentální měření, které potvrzují, že dosažené provozní parametry po rekonstrukci jsou lepší než u původní varianty.

8.1. Splnění cílů

Při řešení rekonstrukce MR spojky byly splněny tyto cíle:

- Bylo navrženo a realizováno přesnější a tužší uložení rotoru
- Bylo dosaženo správné velikosti pracovní mezery
- Byla navržena a realizována úprava plnění pracovní mezery MR kapalinou
- Bylo navrženo vzduchové a vodní chlazení

Všechny splněné cíle byly řádně prověřeny a experimentálně otestovány.

Při řešení rekonstrukce MR spojky nebyly splněny tyto cíle:

- Snížení hmotnosti

Tento cíl nebyl splněn proto, že byl použit materiál hřídele rotoru o vyšší měrné hustotě než původní materiál. Na statorové části nebylo možné odebrat materiál z důvodu magnetického sycení viz. Bakalářská práce Josefa Dluhoše 2012.

8.2. Doporučení pro další vývoj

Jelikož téměř všechny počáteční cíle byly splněny, zbývá vylepšit jen jedno, hmotnost. Ta může být snížena odebráním materiálu po obvodu statoru nebo celkovým zúžením vnitřních částí MR spojky, jako jsou rotorové a statorové lamely, s tím související příložky pro dodržení požadované velikosti pracovní mezery. Další možností snížení hmotnosti je změna materiálu hřídele. Dnešní slitiny hliníku (dural, super dural) dosahují daleko lepších mechanických vlastností než je tomu u austenitických nerezových ocelí.

Spojka se nyní nachází ve smontovaném stavu, plně naplněna MR kapalinou a osazena vzduchovým chlazením, připravena k použití.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BURSON, K., *LORD MR Damping Solutions for Automotive Applications*, Vehicle Dynamic Expo Presentation, May 2006.
 - [2] LAZAR, Jaroslav. *Magnetoreologický tlumič kmitání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 15 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
 - [3] SALZMAN, Sivan. *Characterizing Metal Oxide Coated Carbonyl Iron (CI) Particles using Microscopic Techniques*. [online]. University of Rochester, Spring 2009 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.optics.rochester.edu/workgroups/cml/opt307/spr09/sivan/Index.htm>>
 - [4] LAMPE, D., THESS, A., DOTZAUER, C., *MRF - Clutch - Design considerations and performance*, Dresden University of Technology, 1998, Dresden Germany
 - [5] MORSI, Salah Ahmed. *Smart Materials: Magnetorheological fluids : MRF*. [online]. [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://smartstructures.wikispaces.com/Smart+Mateiel+by+Salah+Ahmed+Morsi>>
 - [6] NAM, Tran Hai a Kyoung Kwan AHN. *A new structure of a magnetorheological brake with the waveform boundary of a rotary disk*. *Smart Materials and Structures*. 2009, č. 18, s. 1-14. DOI: 10.1088/0964-1726/18/11/115029.
 - [7] Active structures laboratory: *Working modes of magnetorheological fluid*. [online]. [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <http://scmero.ulb.ac.be/project.php?id=9&page=MR_modes.html>
 - [8] ROZENBERG, Jaromír. *Autopriemysel.sk: Magnetoreologický tlumič – novinka v dopravních systémech* [online]. [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <http://www.autopriemysel.sk/index.php?option=com_content&task=view&id=5919&Itemid=118>
 - [9] SAHIN, I., T. ENGIN a S. CESMECI. *Comparison of some existing parametric models for magnetorheological fluid dampers*. *Smart Materials and Structures*. 2010, č. 19, s. 1-11. DOI: 10.1088/0964-1726/19/3/035012.
 - [10] POYNOR, James. *Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers* [online]. [cit. 2012-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.writing.engr.psu.edu/me5984/poynor.pdf>>
-

-
- [11] CHEN, Chao a Wei-Hsin LIAO. *A self-sensing magnetorheological damper with power generation*. Smart Materials and Structures. 2012, č. 21, s. 405-416. DOI: 10.1088/0964-1726/21/025014.
- [12] PARK, Edward J., Dilian STOIKOV, Luis Falcao da LUZ a Afzal SULEMAN. *A performance evaluation of an automotive magnetorheological brake design with a sliding mode controller*. Science Direct: Mechatronics. 2006, č. 16, s. 405-416. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2006.03.004.
- [13] SENKAL, Doruk a Hakan GUROCAK. *Haptic joystick with hybrid actuator using air muscles and spherical MR-brake*. Mechatronics. 2011, č. 21, s. 951-960. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2011.03.001.
- [14] CHEN, J. Z. a W. H. LIAO. *Design, testing and control of a magnetorheological actuator for assistive knee braces*. Smart Materials and Structures. 2010, č. 19, s. 1-10. DOI: 10.1088/0964-1726/19/3/035029.
- [15] KIELAN, Pawel, Pawel KOWOL a Zbigniew PILCH. *Conception of the electronic controlled magnetorheological clutch*. Przegląd Elektrotechniczny. 2011, č. 3, s. 93-95. ISSN 0033-2097.
- [16] LAMPE, D., THESS, A., DOTZAUER, C., *MRF - Clutch - Design considerations and performance*, Dresden University of Technology, 1998, Dresden Germany.
- [17] ZHANGSAIFEI a LIUYONG. *International Conference on Computer Application and System Modeling: Disc Shaped High-Torque-MRF-Clutch Design*. 2010, s. 374-377.
- [18] KIKUCHI, Takehito, Kikuko OTSUKI, Junji FURUSHO, Hiroya ABE, Junichi NOMA a Makio NAITO. *Design and Development of Compact Magnetorheological Fluid Clutch (CMRFC) with Multi-layered Disks and Micro-sized Gaps*. Nihon Reoroji Gakkaishi. 2010, č. 1, s. 17-22.
- [19] KAVLICOGLU, B. M., et al. *A multi-plate magneto-rheological fluid limited slip diferenciál clutch*. Smart structures and materials. 2003, 5054, s. 341-349.
- [20] SAITO, Tsuyoshi a Hiroyasu IKEDA. *Development of Normally Closed type of Magnetorheological Clutch and its Application to Safe Torque Control System of Human-Collaborative Robot*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2007, č. 18, s. 1181-1185. DOI: 10.1177/1045389X07084755.
- [21] HEROLD, Zvonko, Domagor LIBL a Joško DEUR. *Design and Testing of an Experimental Magnetorheological Fluid Clutch*. Strojarstvo. 2010, č. 52, s. 601-614. ISSN 0562-1887.
-

- [22] GÜTH, Dirk, Dennis CORDING a Jürgen MAAS. *MRF based Clutch with Integrated Electrical Drive*. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2011, č. 7, s. 493-498.
- [23] SKF [online], Dostupné z WWW: <http://www.skf.com/portal/skf_cz/home> [cit. 10.4.2012].
- [24] LOŽISKA-GUFERA [online], Dostupné z WWW: <<http://loziska-gufera.cz/>> [cit. 10.4.2012].
- [25] NOVÁČEK, Vladislav. *Konstrukce MR spojky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Roupec.
- [26] NOVÁČEK, Vladislav. *Konstrukce MR spojky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 66 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Roupec.
-



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Seznam použitých zkratek

| | |
|------|---|
| MR | -magnetoreologický |
| MRF | - magnetorheological fluid (magnetoreologická kapalina) |
| ÚK | - Ústav konstruování |
| MKP | - metoda konečných prvků |
| RPM | - revolutions per minute (otáčky za minutu) |
| O.K. | - O-kroužek |
| BP | - bakalářská práce |

Seznam použitých symbolů a veličin

| | | |
|-----------------|--------------------|---|
| τ | [MPa] | - smykové napětí |
| τ_0 | [MPa] | - mez kluzu |
| η | [Pa.s] | - dynamická viskozita |
| $\dot{\gamma}$ | [s ⁻¹] | - smykový spád |
| M_k | [N.m] | - krouticí moment |
| I | [A] | - elektrický proud |
| U | [V] | - elektrické napětí |
| B | [T] | - magnetická indukce |
| R_m | [MPa] | - mez pevnosti v tahu |
| σ_k | [MPa] | - mez kluzu v tahu |
| σ_C | [MPa] | - mez únavy v tahu |
| σ_{CO} | [MPa] | - mez únavy v ohybu |
| τ_k | [MPa] | - napětí v krutu |
| σ_{CO} | [MPa] | - mez únavy v ohybu |
| M_{Omax} | [MPa] | - maximální ohybový moment |
| σ_O | [MPa] | - napětí v ohybu |
| W_k | [mm ³] | - modul průřezu v krutu |
| W_O | [mm ³] | - modul průřezu v ohybu |
| σ_{RED} | [MPa] | - redukované napětí |
| a_k | [-] | - součinitel tvaru v krutu |
| a_o | [-] | - součinitel tvaru v ohybu |
| σ_{oex} | [MPa] | - extrémní napětí v ohybu |
| τ_{kex} | [MPa] | - extrémní napětí v krutu |
| σ_{VRED} | [MPa] | - výsledné redukované napětí |
| k_k | [-] | - bezpečnost k mezi kluzu |
| σ_a | [MPa] | - amplituda napětí |
| k | [-] | - součinitel opracování |
| v | [-] | - součinitel velikosti |
| v_1 | [-] | - součinitel zahrnující možné vady |
| v_2 | [-] | - součinitel zahrnující hledisko gradientu napětí |
| h | [mm] | - charakteristický rozměr součásti |
| h_1 | [mm] | - charakteristický rozměr vzorku |
| η | [-] | - součinitel vlivu opracování a zpracování |
| η_1 | [-] | - součinitel vlivu opracování a vliv prostředí |
| η_2 | [-] | - součinitel vlivu technologického zpracování |

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

| | | |
|------------------|-------|---|
| β | [-] | - součinitel vrubu |
| r | [mm] | - poloměr rádiusu vrubu |
| σ_C^* | [MPa] | - mez únavy skutečné součásti |
| k_c | [-] | - bezpečnost na únavu |
| r_k | [mm] | - poloměr roztečné kružnice šroubů |
| d | [mm] | - velký průměr závitu |
| d_2 | [mm] | - střední průměr závitu |
| d_3 | [mm] | - malý průměr závitu |
| α | [°] | - úhel boků závitu |
| $f_{Ocel/Ocel}$ | [-] | - součinitel tření mezi ocelí a nerezovou ocelí |
| $f_{Ocel/mosaz}$ | [-] | - součinitel tření mezi ocelí a mosazí |
| k_n | [-] | - návrhový součinitel |
| M_t | [N.m] | - třecí moment |
| F_N | [N] | - normálová síla |
| σ_t | [MPa] | - napětí v tahu |
| k_t | [-] | - bezpečnost v tahu |
| p | [MPa] | - tlak |
| k_p | [-] | - bezpečnost v tlaku |
| \tilde{f} | [-] | - efektivní součinitel tření |
| ν_f | [°] | - třecí úhel |
| β_z | [°] | - úhel stoupání závitu |
| M_u | [N.m] | - utahovací moment |

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 1.1 Původní konstrukční provedení MR spojky | 13 |
| Obr. 2.1 Mikroskopický snímek MR kapaliny [3] | 14 |
| Obr. 2.2 Chování MR částic v magnetickém poli [5]..... | 15 |
| Obr. 2.3 Ventilový mód..... | 16 |
| Obr. 2.4 Smykový mód..... | 16 |
| Obr. 2.5 a) Bez mag. pole, b) S mag. polem BZ, c) S mag. polem se zatížením..... | 16 |
| Obr. 2.6 Tahově-tlakový mód.[7] | 17 |
| Obr. 2.7 Přímý MR tlumič..... | 18 |
| Obr. 2.8 MR tlumič z Audi TT [8] | 18 |
| Obr. 2.9 Oboustranný tlumič [10] | 19 |
| Obr. 2.10 Tlumič s generátorem napětí [11]..... | 20 |
| Obr. 2.11 a) Jednolamelová brzda, b) Vícelamelová brzda [6]..... | 21 |
| Obr. 2.12 Schéma MR brzdy | 22 |
| Obr. 2.13 Průběh magnetického toku | 22 |
| Obr. 2.14 Hmatový joystick | 23 |
| Obr. 2.15 Schéma hmatového joysticku | 24 |
| Obr. 2.16 Kolenní kloub a) Schéma končetiny, b) Schéma kloubu | 24 |
| Obr. 2.17 a) Schéma spojky s ax. mez, b) Schéma spojky s rad. mez. [16] | 25 |
| Obr. 2.18 Závislost M_k na I | 26 |
| Obr. 2.19 LiuYongova spojka s axiální mezerou | 26 |
| Obr. 2.20 a) Více disková MR spojka, b) Rotor s lamelami | 27 |
| Obr. 2.21. a) Vícedisková MR spojka, b) Rotor s lamelami..... | 27 |
| Obr. 2.22 Průběh magnetického pole spojkou..... | 27 |
| Obr. 2.23 Závislost M_k na I pro MR kapaliny MRF-140CG a MRF-122EG | 27 |
| Obr. 2.24 Vícelamelová MR spojka s velmi malou pracovní mezerou..... | 28 |
| Obr. 2.25 Závislost M_k na I | 28 |
| Obr. 2.26 Schéma Kavlicogluova vícelamelová MRspojka..... | 29 |
| Obr. 2.27 Schéma rozpínací spojky..... | 30 |
| Obr. 2.28 a) 2-mezerová, b) - mezerová | 30 |
| Obr. 2.29 Průběh $M_k - I$ pro záporný proud..... | 30 |
| Obr. 2.30 Průběh $M_k - I$ pro kladný proud..... | 30 |
| Obr. 2.31 Experimentální MR spojka podle Z.Herolda a sp. | 31 |
| Obr. 2.32 Řez experimentální MR spojkou podle Z.Herolda a sp. | 31 |
| Obr. 2.33 Schéma integrované MR spojky v elektromotoru | 32 |
| Obr. 2.34 Řez modelem integrované MR spojky v elektromotoru..... | 32 |
| Obr. 2.35 Kuličkové ložisko [23] | 33 |
| Obr. 2.36 Kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem [23] | 33 |
| Obr. 2.37 Kuželíkové ložisko [23] | 33 |
| Obr. 2.38 Válečkové ložisko [23]..... | 34 |
| Obr. 2.39 Jehlové ložisko [23]..... | 34 |
| Obr. 2.40 Hřídelový těsnící kroužek [23]..... | 34 |
| Obr. 2.41 O-kroužek [24] | 35 |
| Obr. 2.42 Kuličkové ložisko s vlastním utěsněním [23] | 35 |
| Obr. 3.1 Špatné naplnění pracovní mezery..... | 36 |
| Obr. 5.1 Příčné sondy..... | 38 |
| Obr. 5.2 Zdroj a TESLA METER 5180..... | 38 |

| | |
|---|----|
| Obr. 5.3 Experimentální měření el. mag. indukce | 39 |
| Obr. 6.1 Stávající provedení MR spojky | 40 |
| Obr. 6.2 Uložení rotoru pomocí kombinovaného jehlového ložiska | 41 |
| Obr. 6.3 a) Varianta s větším ax. ložiskem, b) Varianta s menším ax. ložiskem | 42 |
| Obr. 6.4 Kombinace jehlového a axiálního jehlového ložiska | 43 |
| Obr. 6.5 Utěsnění levé části | 44 |
| Obr. 6.6 Úprava stávající koncepce | 45 |
| Obr. 6.7 Kombinace jehlového a axiálního kuličkového ložiska v přírubě..... | 46 |
| Obr. 6.8 Graf průběhu kroutícího momentu při zvyšující se teplotě | 47 |
| Obr. 6.9 Možné varianty tvaru žebrování vzduchového chlazení | 47 |
| Obr. 6.10 Obvodová část volního chlazení | 48 |
| Obr. 6.11 Čelní části vodního chlazení | 48 |
| Obr. 6.12 Sestava s vodním chlazením | 49 |
| Obr. 6.13 Výsledné uložení rotoru | 50 |
| Obr. 7.1 Hřídel s nalisovanými vnitřními kroužky kroužky | 51 |
| Obr. 7.2 Pevnostní výpočet hřídele rotoru v systému ANSYS | 54 |
| Obr. 7.3 Původní uchycení rotorových lamel [25] | 54 |
| Obr. 7.4 Současné uchycení rotorových lamel | 55 |
| Obr. 7.5 Příruba ložisek | 58 |
| Obr. 7.6 Původní způsob sestavení statoru MR spojky [26]..... | 58 |
| Obr. 7.7 Současný způsob sestavení statoru MR spojky | 59 |
| Obr. 7.8 Rozložený pohled | 59 |
| Obr. 7.9 Úprava plnění pracovní mezery | 60 |
| Obr. 7.10 Uchycení vzduchového chlazení | 61 |
| Obr. 7.11 Podsestava „Levé části“ | 62 |
| Obr. 7.12 Podsestava vnitřních komponent | 63 |
| Obr. 7.13 Podsestava pravé části statoru | 64 |
| Obr. 7.14 Průběh mag. indukce s korekcí polohy čidla na sondě | 65 |
| Obr. 7.15 Porovnání mag. indukce pro mosazné a nerezové šrouby | 65 |
| Obr. 7.16 Vliv odmagnetování na výslednou mag. indukci | 66 |
| Obr. 7.17 Experimentální měření kroutícího momentu | 67 |
| Obr. 7.18 Vliv odmagnetování na moment naprázdno | 68 |
| Obr. 7.19 Momentové charakteristiky | 68 |
| Obr. 7.20 Závislost momentu na budícím proudu při RPM = 400 | 69 |
| Obr. 7.21 Vliv úpravy plnění na momentovou charakteristiku | 69 |
| Obr. 7.22 Zjišťování průběhu teploty se vzduchovým chlazením a ventilátorem ... | 70 |
| Obr. 7.23 Rychlost zahřívání MR spojky při $I = 2A$ | 71 |
| Obr. 7.24 Nanesení teplovodivé pasty pod vzduchové chlazení | 71 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tab. 7.1 Přepoččet otáčček vřetene soustruhu..... | 67 |
| Tab. 7.2 Hmotnostní rozvaha..... | 72 |
| Tab. 7.3 Ekonomická rozvaha | 73 |



SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I - Teploměr

Příloha II – Kontrola správného sestavení MR spojky



SAMOSTATNÉ PŘÍLOHY

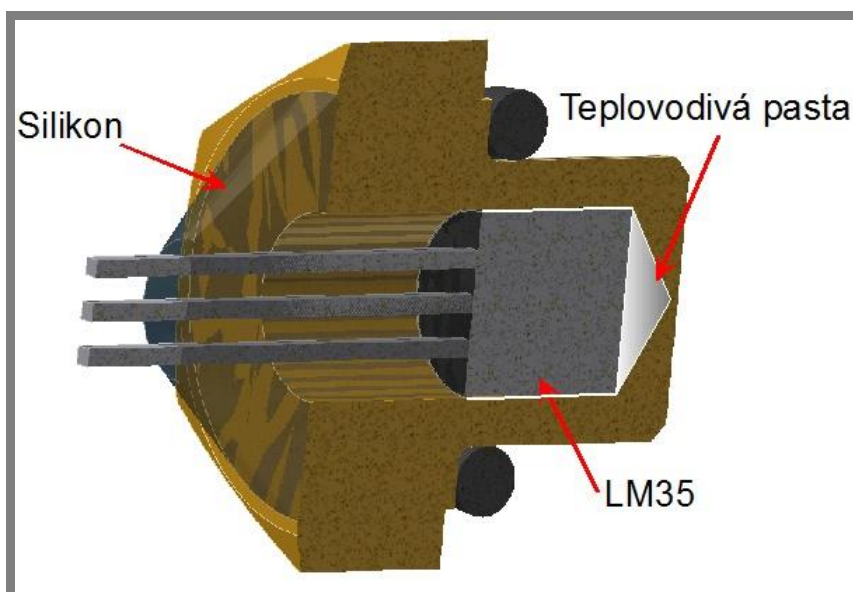
Příloha I Teploměr

I

Provedení teploměru

Pro přesné digitální měření teploty MR spojky jsme sestrojili teploměr skládající se z těchto částí:

- Čidlo teploty LM35
- Upravený mosazný šroub M8x7
- Měřicí soustavu DEWE-50-USB2-8



Obr. I.1 Model teploměru



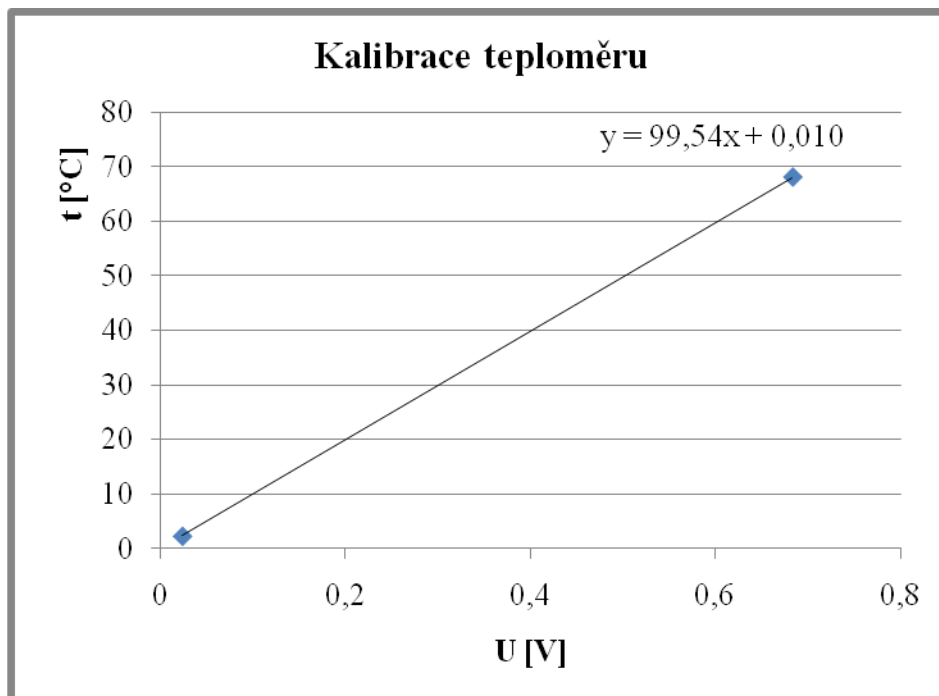
Obr. I.2 Dílčí složky teploměru

Kalibrace teploměru:

Kalibrovaný teploměr jsme spolu s již zkalibrovaným teploměrem Pt100 vložili do ledové vody (Obr. I.6). Počkali jsme, než se teploty ustálí. Pomocí teploměru Pt100 jsme přesně určili teplotu vody a sledovali jsme výstupní napětí našeho teploměru. Totéž jsme opakovali pro horkou vodu (Obr. I.7). Jelikož víme, že chování teploměru je lineární, můžeme teda aproximovat těmito dvěma body přímkou. Dostaneme charakteristiku našeho teploměru.

Tab. I.1 Kalibrační hodnoty

| | | |
|---------------|--------------|--------------|
| U [V] | 0,023 | 0,683 |
| t [°C] | 2,3 | 68 |



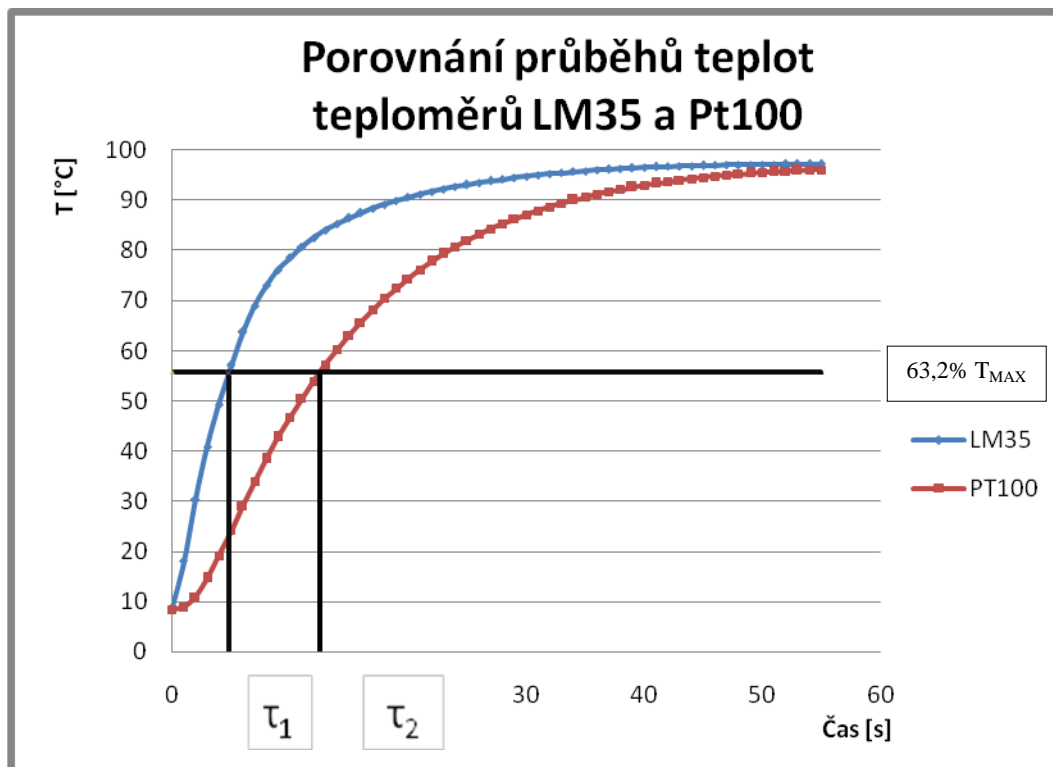
Obr. I.3 Graf kalibrace teploměru

Byl proveden porovnávací test rychlosti odezvy teploměru na náhlou změnu teploty mezi teploměry Pt100 a LM35. Oba teploměry se nejprve vložili do chladné vody a nechaly ustálit na danou teplotu. Po té se oba teploměry vyjmuli z chladné vody a vložili do vody vařící. Pomocí měřicí soustavy DEWE-50-USB2-8 jsme sledovali průběhy nárůstu teplot u obou teploměrů a vynesli je do grafů.

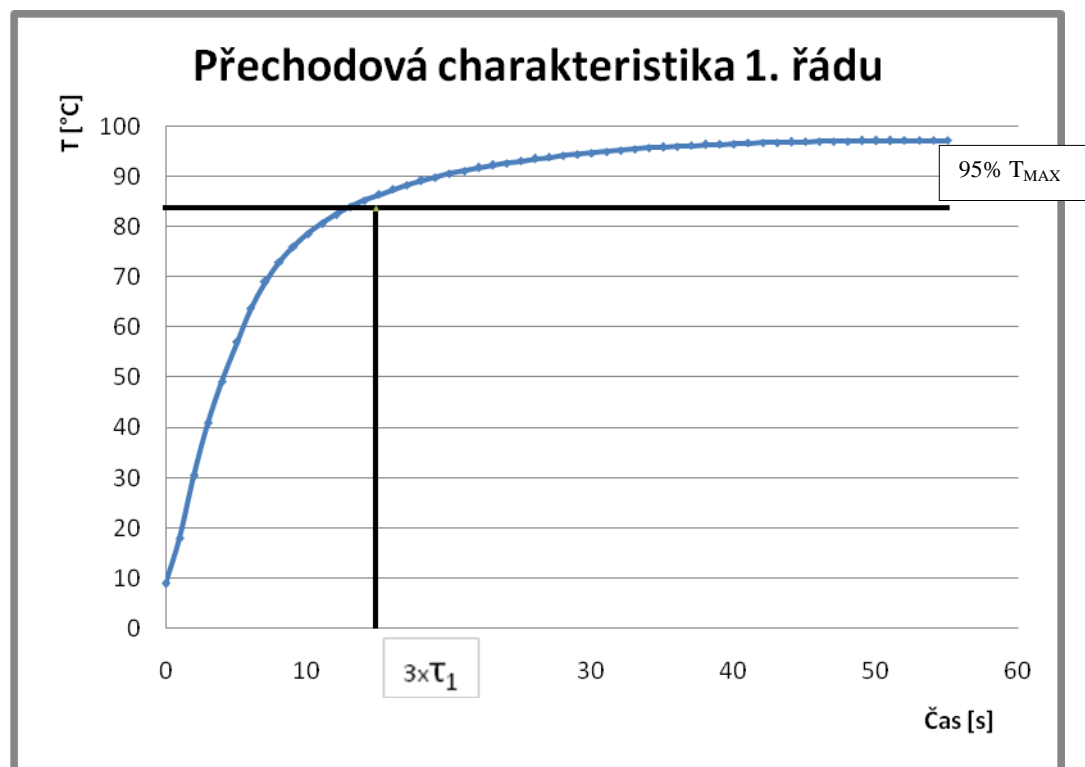
Z grafů jsme odečetli časové konstanty obou teploměrů:

- $\tau_1 = 4,8s$
- $\tau_2 = 12,5s$

Z výše uvedeného vyplývá, že náš teploměr LM35 je o 38,4% rychlejší než průmyslový teploměr Pt100. Je tomu tak díky mosaznému tělu teploměru, které vede teplo mnohem lépe než nerezové tělo teploměru Pt100.



Obr. I.4 Porovnání průběhů teplot teploměrů LM35 a Pt100



Obr. I.5. Přechodová charakteristika 1. řádu



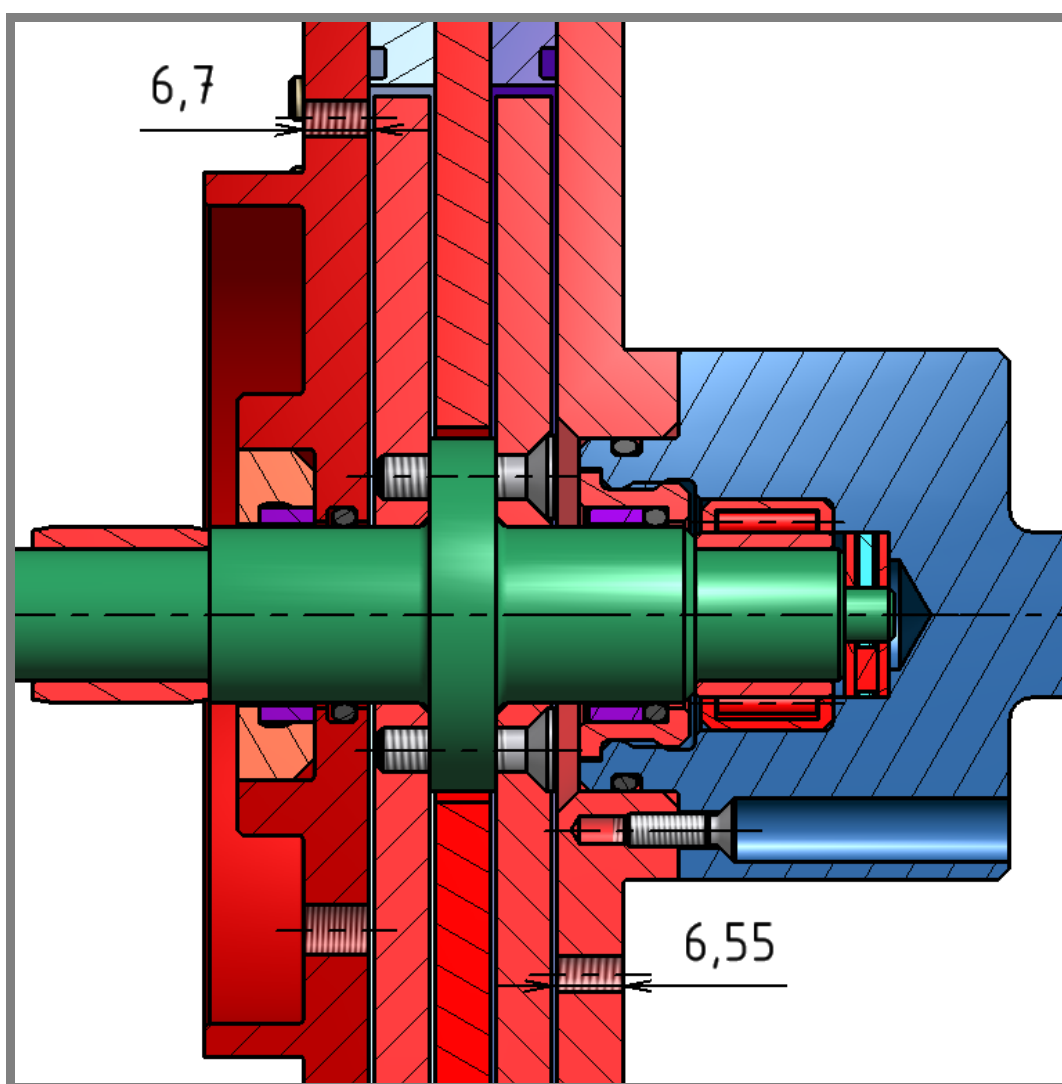
Obr. I.6 Kalibrace v ledové vodě



Obr. I.7 Kalibrace ve vařící vodě

Kontrola správného sestavení MR spojky

Po každém smontování je důležité zkontrolovat správnost polohy rotoru vůči statoru, tedy správnost velikosti pracovní mezery. Skutečné rozměry statoru se mohou nepatrně lišit od rozměrů teoretických. Po odměření skutečných rozměrů statoru a vypočtení rozměrového obvodu sestavy spojky byly definovány tyto kontrolní rozměry (viz. Obr. I.1), které zaručují správné usazení všech komponent spojky. Tyto rozměry se měří při rotoru přitlačeném do axiálního ložiska v „Levé části“. Po této kontrole může být spojka doplněna o „Ložiskovou přírubu“ osazenou ložisky a kompletně smontována.



Obr. I.1 Kontrola správného sestavení MR spojky