



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**NÁVRH HYDRODYNAMICKÉ UCPÁVKY AXIÁLNÍHO  
ČERPADLA S PRSTENCOVÝM MOTOREM**

DESIGN OF A HYDRODYNAMIC SEAL OF AN AXIAL PUMP WITH AN ANNULAR MOTOR

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Kryštof Jančík**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. František Pochylý, CSc.**

**BRNO 2018**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Kryštof Jančík**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Fluidní inženýrství  
Vedoucí práce: **prof. Ing. František Pochylý, CSc.**  
Akademický rok: 2017/18

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

## **Návrh hydrodynamické ucpávky axiálního čerpadla s prstencovým motorem**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Ucpávka bude navržena na principu feromagnetické a magnetoreologické kapaliny. Budou vypracovány konstrukční varianty ucpávky a jejich funkce ověřena výpočtovým modelováním. Matematický model bude založen na vlastnostech Nenevtonovské, Birnhamovské kapaliny. Prototyp ucpávky bude ověřen v laboratorních podmínkách.

### **Cíle diplomové práce:**

Návrh principu hydrodynamické ucpávky s feromagnetickou a magnetoreologickou kapalinou.  
Ideový návrh ucpávky pro axiální čerpadlo s prstencovým motorem.  
Výpočtové modelování v zadané geometrii.  
Konstrukční návrh ucpávky.  
Měření vlastností ucpávky v laboratorních podmínkách.

### **Seznam doporučené literatury:**

BLUMS, Elmars., Andrejs CEBERS a Mikael MAIOROV. Magnetic fluids. New York: Walter de Gruyter, 1997. ISBN 3110143909.

ODENBACH, Stefan. Magnetoviscous Effects in Ferrofluids. Berlin: Springer, c2002. Lecture Notes in Physics, m71. ISBN 3540430687.

ODENBACH, Stefan. Ferrofluids: Magnetically Controllable Fluids and Their Applications. New York: Springer, c2002. ISBN 3540439781.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem hydrodynamické ucpávky axiálního čerpadla s prstencovým motorem, a to ve třech hlavních rovinách: rešeršní, simulační a experimentální. Rešeršní část přináší široké poznatky o problematice těsnění na principu magnetické kapaliny (ferrohydrodynamické (FHD) ucpávky), aktuálním vývoji na poli simulací vnitřních dějů v magnetické kapalině i výzkumu aplikovatelnosti FHD technologie při těsnění kapalin. Zasazuje též práci do širšího kontextu potenciálního využití pro zařízení na podporu krevního oběhu, který měl výrazný vliv na představený vlastní koncept axiální FHD ucpávky. Jeho návrhem a experimentálním testováním se zabývají zbývající dvě tematické roviny.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Magnetická kapalina, ucpávka, ferrohydrodynamické těsnění, prstencový motor, axiální čerpadlo, krevní pumpa

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the design of a hydrodynamic seal of an axial pump with an annular motor, and it does so in three main thematic planes: research of current knowledge, simulation and experimental. The research section provides an overview of a broad problem of magnetic fluid seals (ferrohydrodynamic (FHD) seals), current developments in the field of simulation of internal flow in magnetic fluid and in the field of application of FHD technology in sealing liquids. It also covers a wider context of potential use for mechanical circulatory support systems that have had a significant impact on the proposed concept of a novel axial FHD seal. The remaining two thematic planes deal with his design and experimental testing.

## **KEY WORDS**

Magnetic fluid, seal, ferrohydrodynamic seal, annular motor, axial pump, blood pump

---



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

---

JANČÍK, K. *Návrh hydrodynamické ucpávky axiálního čerpadla s prstencovým motorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 104 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. František Pochylý, CSc..

---





## PODĚKOVÁNÍ

---

Chtěl bych především poděkovat panu profesoru Františku Pochylému za celé vedení této práce, jeho cenné rady a podněty, ale též za projevenou důvěru, se kterou mi ponechal velký prostor pro práci svým vlastním tempem. Děkuji doktoru Rostislavu Huzlíkovi za četné konzultace kolem simulací magnetického pole, docentce Simoně Fialové za pomoc v počátcích realizace experimentu, pracovníkům společnosti Ferrotec za poskytnutí vzorků ferokapalin, a také pracovníkům Odboru technické diagnostiky Ústavu konstruování za poskytnutou pomoc a MR kapalinu. V neposlední řadě bych rád poděkoval panům Bronislavu Kusému, Karlu Večeřovi a inženýru Martinu Hudci za obrovskou pomoc a trpělivost při realizaci výroby a testování prototypu.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

---

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma *Návrh hydrodynamické ucpávky axiálního čerpadla s prstencovým motorem* zpracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Františka Pochylého, CSc. a v seznamu zdrojů uvedl všechny zdroje, z nichž jsem čerpal.

V Brně dne .....

.....

Kryštof Jančík

---



## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Zařízení na podporu krevního oběhu	14
2.1.1	An insight into short- and long-term mechanical circulatory support systems ( <i>Ferrari, Kruzliak, Spiliopoulos, 2015</i> )	14
2.1.2	Současné požadavky a přetrvávající problémy	16
2.1.3	Problematika pohonu a těsnění	17
2.1.4	Prstencový motor	18
2.2	Magnetické kapaliny	19
2.2.1	Základní charakteristika, vlastnosti, složení a výroba	20
2.2.2	Matematický popis – model magnetické kapaliny	23
2.2.3	Magnetické pole a magnetoviskózní jev	24
2.2.4	Veličiny a vztahy pro popis magnetických kapalin v magnetostatickém poli	26
2.2.5	Reologický model – binghamská kapalina	30
2.2.6	Výrobci a aplikace magnetických kapalin	33
2.3	Hřídlové ucpávky s magnetickou kapalinou	34
2.3.1	Úvod – konvenční hřídlové ucpávky	35
2.3.2	Ucpávky s magnetickou kapalinou – princip a základní uspořádání	36
2.3.3	Hlubší analýza jedno- a vícestupňové FHD ucpávky – optimální parametry	39
2.3.4	Klasické aplikace a různé konstrukční varianty FHD ucpávek	42
2.3.5	Využití numerických simulací při řešení problematiky FHD ucpávek	45
2.3.6	Těsnění kapalných látek	52
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>Koncepční návrh</b>	<b>59</b>
4.1	Výchozí situace	59
4.2	Vývoj vlastního konceptu	60
4.2.1	Axiální ucpávka s radiální polarizací magnetu	61
4.2.2	Axiální ucpávka s axiální polarizací magnetu	62
4.3	Finální varianta	63
4.3.1	Konstrukční návrh experimentálního prototypu axiální ucpávky	64
<b>5</b>	<b>Numerické modelování</b>	<b>66</b>
5.1	Simulace magnetického pole – tvorba modelu	66
5.1.1	Vstupní materiálové parametry magnetických kapalin	66
5.1.2	Vstupní materiálové parametry permanentních magnetů	68
5.1.3	Výpočtový model experimentální axiální ucpávky	74
5.2	Výsledky simulací magnetického obvodu finální varianty	76
5.2.1	Určení polohy vnitřního rozhraní	76
5.2.2	Určení polohy vnějšího rozhraní	77
5.2.3	Vyhodnocení kritických tlaků	78
5.3	Vnitřní proudění v doméně magnetické kapaliny	79
<b>6</b>	<b>Experiment</b>	<b>82</b>
6.1	Příprava experimentu	82
6.1.1	Postup a použité přístroje	82
6.1.2	Úpravy prototypu	83

6.2	Průběh testování	84
6.2.1	Varianta 1 – první pokusy	84
6.2.2	Varianta 2 – určení tlakové kapacity ucpávky	84
6.3	Výsledky a porovnání se simulací	86
6.3.1	Výsledky experimentu	86
6.3.2	Srovnání se simulací a zhodnocení	86
<b>7</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>88</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>92</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>93</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK</b>	<b>100</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK</b>	<b>101</b>

---

## 1 ÚVOD

1

Tématem této práce je studie hydrodynamické ucpávky, využívající princip těsnění za pomoci magnetické kapaliny, držené v těsněném místě magnetickým polem permanentního magnetu.

Zajistit spolehlivý způsob utěsnění rotujících součástí, který bude bránit nežádoucímu uniknutí těsněné látky do vnějšího prostoru, stejně tak jako kontaminaci samotného vnitřního prostoru z vnějšku, a který bude spolehlivě fungovat i v podmínkách těch nejnáročnějších aplikací současné doby, je přetrvávajícím a kritickým problémem, značně limitujícím plné využití potenciálu těchto aplikací. Prvotním impulzem pro studium zmíněného typu ucpávek byl článek [27] (*Mitamura et al., 2010*), který informuje o velmi slibných výsledcích speciálního těsnění s magnetickou kapalinou, vyvinutého pro axiální pumpu zařízení na podporu krevního oběhu pro implantaci do lidského těla. Článek svou tematikou dobře zapadá do oblasti, které je na OFI VK věnována poměrně vysoká pozornost - totiž výzkumu a vývoji malých pump a dalších zařízení, s potenciálním využitím anebo přímým účelem pro bioaplikace v souvislosti s krevním oběhem lidského těla. Jen letošní rok se této problematice věnuje několik diplomových prací a základní idea zmíněného článku tedy zapadala do rámce těchto činností velmi dobře. Bylo tedy rozhodnuto provést studii využitelnosti takovéto ucpávky pro koncept již vyvíjeného inovativního tandemového axiálního čerpadla s prstencovými motory.

Následující kapitoly de facto mapují celý vývojový proces studie: od prvotní hluboké rešerše celé problematiky a blízkce souvisejících témat, tvořící časově nejnáročnější, avšak nezbytný předpoklad vlastní kreativní práce. Až na jejím základě mohly být stanoveny konkrétní cíle, které má tato studie splnit, aby tak přispěla k rozšíření poznání v této oblasti. Jejím výsledkem pak je určení možného postupu při návrhu vlastního konceptu neobvyklé axiální varianty ucpávky, uzpůsobené parametrům daným principem fungování prstencových motorů, ale též vlastní experimentální ověření funkčnosti tohoto konceptu ucpávky, a potažmo vytyčení jednoho z možných směrů dalšího vývoje.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Úvodní část rešerše shrnuje základní poznatky z oblasti vývoje zařízení na podporu krevního oběhu, objasňuje tematický kontext vzniku této práce a rámcovou motivaci pro vývoj nové hydrodynamické ucpávky (kapitola 2.1). Pro vlastní vývoj jsou však stěžejní především kapitoly 2.2 a 2.3, které do hloubky zkoumají problematiku magnetických kapalin a jejich použití jako těsnicího média.

### 2.1 Zařízení na podporu krevního oběhu

Dle [1] bylo v evropských zemích v roce 2012 zapsáno v seznamu čekatelů na transplantaci srdce celkem 3400 pacientů, přičemž bylo v témže roce provedeno pouze 2004 transplantací; v USA každoročně na stejný zákrok čeká kolem 4000 pacientů, avšak přibližný počet ročně dostupných orgánů se dlouhodobě drží kolem čísla 2300<sup>1</sup>. Jen ve Velké Británii zemřelo od ledna do září 2017 již 22 čekatelů [4]. A konečně i v České republice je na čekací listině k listopadu 2017 evidováno 148 pacientů [5].

Ačkoliv technologie *mechanických oběhových podpůrných systémů (MCSSs)* v současnosti ještě není natolik pokročilá, aby zcela plnohodnotně a plošně nahradila klasickou transplantaci, může již teď palčivý problém nedostatku orgánů alespoň zmenšit.

#### 2.1.1 An insight into short- and long-term mechanical circulatory support systems (*Ferrari, Kruzliak, Spiliopoulos, 2015*)

Titulní článek [6] poskytuje vynikající úvod do problematiky zařízení na podporu krevního oběhu. V první části shrnuje posledních 40 let vývoje MCSSs, které v současnosti mohou zajišťovat buď krátkodobou stabilizaci oběhu u pacientů s vyvíjejícím se *kardiogenním šokem*<sup>2</sup>, nebo mohou být nasazeny pouze za účelem *překlenutí období předcházející transplantaci*<sup>3</sup>, a konečně též i jako *permanentní alternativa k ní*<sup>4</sup>. Mezi MCSSs zahrnuje např. *intra-aortální balónkové pumpy, mimotělní (extrakorporální) membránové okysličovací systémy, totální srdeční náhrady* a v neposlední řadě také *ventikulární asistenční zařízení (VADs)*.

VADs jsou de facto mechanické pumpy, jejichž funkcí je podpora jedné nebo více komor selhávajícího srdce. Podle toho, zda asistují levé, respektive pravé komoře, se označují jako LVADs, respektive jako RVADs<sup>5</sup>. Jejich první úspěšná implantace byla provedena roku 1966. Z hlediska technologie je důležité rozdělení na objemové (pulzační) a hydrodynamické (rotační) VADs.

Za hlavní výhodu objemových VADs lze označit zachování pulzujícího charakteru vznikajícího proudu, který je pro fyziologii lidského těla přirozený,

<sup>1</sup> K říjnu 2017 je tomu konkrétně 3994 čekatelů a 2444 provedených transplantací [2, 3].

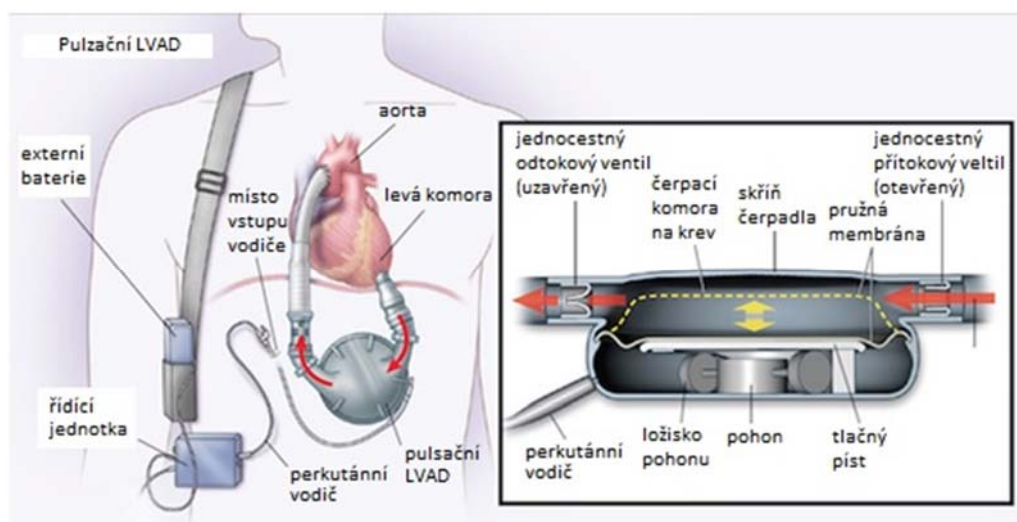
<sup>2</sup> Šok způsobený těžkou poruchou srdeční funkce, zejména jako komplikace rozsáhlého či opakovaného infarktu myokardu [7].

<sup>3</sup> Anglicky *bridge to transplant (BTT)*.

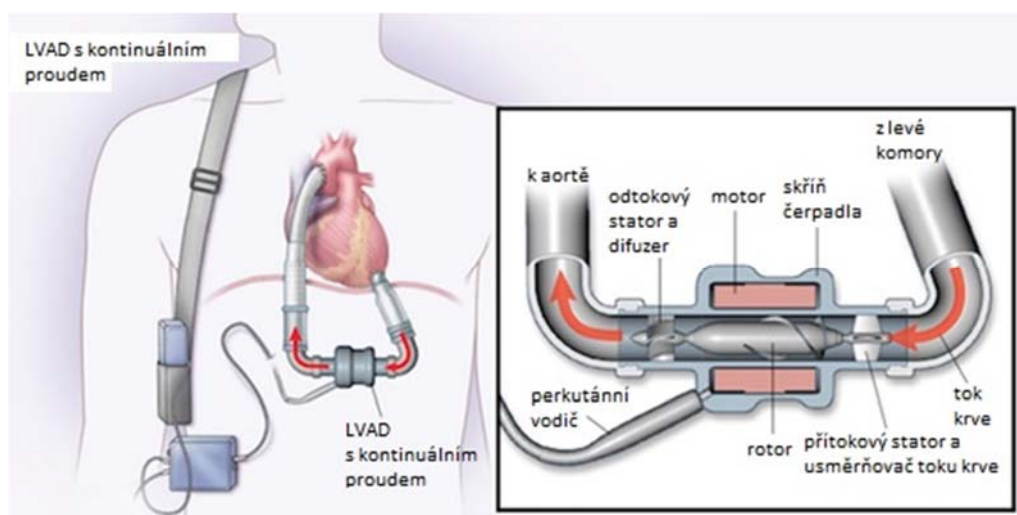
<sup>4</sup> Neboli tzv. *destination therapy (DT)*. Podrobnou a dlouhodobou studii zkoumající slibné možnosti uplatnění tohoto léčebného postupu provedl na velkém vzorku pacientů Kirklín et al. v [16].

<sup>5</sup> Případné kombinace obou se označují BVADs; z hlediska četnosti je ovšem nejobvyklejší variantou použití levé varianty (LVAD) [14, 15, 16].

z obecného hlediska nároků na MCSSs však nikoli nutný<sup>6</sup>. Řada nevýhod tohoto systému (větší rozměry, složitost - např. nutnost použití ventilů - v důsledku toho vyšší nebezpečí mechanického selhání i možné infekce) jej pak staví ve srovnání s hydrodynamickými pumpami na nižší vývojový stupeň asistenčních zařízení (1. generace VADs)<sup>7</sup>. Schéma jednoho z možných konstrukčních provedení pulzačního VAD je na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Možné konstrukční provedení LVAD s pulzujícím proudem (1. generace VADs) [10, upraveno]



Obr. 2.2 Možné konstrukční provedení LVAD s kontinuálním proudem (2. generace VADs) [11, upraveno]

<sup>6</sup> Autoři ovšem připouštějí pokračující diskuzi a odkazují na [12] a [13], zohledňující pozitiva i negativa kontinuálního proudu krve. Důsledné porovnání vlivu pulzujícího a kontinuálního proudu na rekonvalescenci pacientů provádějí též autoři v [9], a predikují nalezení ideálního řešení v kombinovaném pulzujícím kontinuálním proudu, vyvolaném modulací otáček.

<sup>7</sup> Viz např. [8] str. 3.

Hydrodynamické VADs jsou zdrojem kontinuálního proudu vyvolaného rotujícím členem – oběžným kolem. Hlavní výhodou je jejich jednodušší a menší konstrukce, vyžadující méně pohyblivých součástí, a nižší energetická náročnost. Existují dvě základní konstrukční verze: centrifugální (radiální) a axiální. Centrifugální čerpadla jsou mohutnější variantou, která generuje vyšší tlaky při nižších průtocích, zatímco axiální čerpadla poskytují vysoké průtoky při nižších nárůstech tlaku – je to však za cenu mnohem vyšších otáček, které k tomu potřebují. Válcovitý tvar axiálních čerpadel a jejich lehčí konstrukce je však činní vhodnější variantou z pohledu snadnější implantace – obr. 2.2.

### 2.1.2 Současné požadavky a přetrvávající problémy

Při hodnocení vhodnosti implantátů je však potřeba brát v potaz i širší souvislosti, dané mimořádností prostředí, v němž budou nasazeny. Požadavkům na maximální spolehlivost, bezproblémovou a dlouhodobou funkci, biokompatibilitu součástí, minimalizaci rizika zanesení infekce<sup>8</sup> a s tím související nutnosti zajistit možnost sterilizace - tomu všemu je potřeba věnovat náležitou pozornost<sup>9</sup>. Potenciálních rizik spojených s implantací podpůrných zařízení existuje mnoho – viz např. [17].

V souvislosti s předmětem této práce je třeba brát v potaz především fenomén hemolýzy a trombózy, částečně pak i možnosti sterilizace:

- Trombóza je děj, při kterém dochází ke srážení (koagulaci) krve za vzniku krevní sraženiny (trombu) [18, 19]. Do procesu jsou zapojeny krevní destičky (trombocyty), které se, pokud jsou například vystaveny příliš vysokému smykovému napětí, akumulují, srážejí a následně přiléhají k tzv. *trombogenným povrchům implantátu* – do míst pomalého, stagnujícího, nebo recirkulujícího proudu a oblastí nízkého smykového napětí<sup>10</sup> [12]. Sraženiny se mohou poté uvolňovat a způsobit emboli<sup>11</sup> až s následkem smrti, anebo se shlukovat uvnitř implantátu, obalovat jeho části (obr. 2.3) a bránit tak správnému proudění, což obvykle vede k nutnosti provedení chirurgického zákroku a výměně pumpy [21, 24].
- Hemolýza, neboli rozpad červených krvinek (erytrocytů) provázený uvolněním krevního barviva (hemoglobinu), může být způsobena například mechanickým poškozením membrány krvinky (tzv. *fyzikální hemolýza*) [20], pokud je podobně jako v předchozím případě krvinka vystavena nadkritické hodnotě smykového napětí. Jde o nejlépe prozkoumaný aspekt mechanicky způsobeného poškození krve a jeho

<sup>8</sup> Častým místem vniku infekce je okolí vývodu napájecího kabelu pumpy – proto někteří autoři [14, 24] volají po radikálnější změně směru vývoje ke kompletně implantovatelným zařízením s bezdrátovým přenosem energie přes kůži pomocí elektromagnetické indukce. S takovým systémem je již i relativně úspěšně experimentováno [35], od běžného nasazení je však vývoj stále daleko.

<sup>9</sup> S rostoucím využíváním MCSSs začíná významnou roli hrát také ekonomická stránka věci. Finanční efektivitu léčebného procesu a vliv na udržitelnost systému zdravotní péče se pokouší posoudit např. [22].

<sup>10</sup> Metodu pro optimalizaci designu asistenčního zařízení s ohledem na snížení náchylnosti ke vzniku trombózy vyvinul např. Girdhar et al. v [25].

<sup>11</sup> Ucpání cévy a následné nedokrvění příslušné části těla: končetin, plic, mozku atd. [23].



matematický model lze nalézt například v [12]<sup>12</sup>.

- Sterilizaci zařízení určených k implantaci je možné provádět různými způsoby, například: pomocí autoklávu, mikrobicidního plynu (typicky ethylenoxidu), či ozářením gama paprsky [26]. Je však třeba posoudit vhodnost té které metody pro konkrétní provedení asistenčního zařízení.



**Obr. 2.3** Trombotický útvar na rotoru explantovaného hydrodynamického LVAD [21]

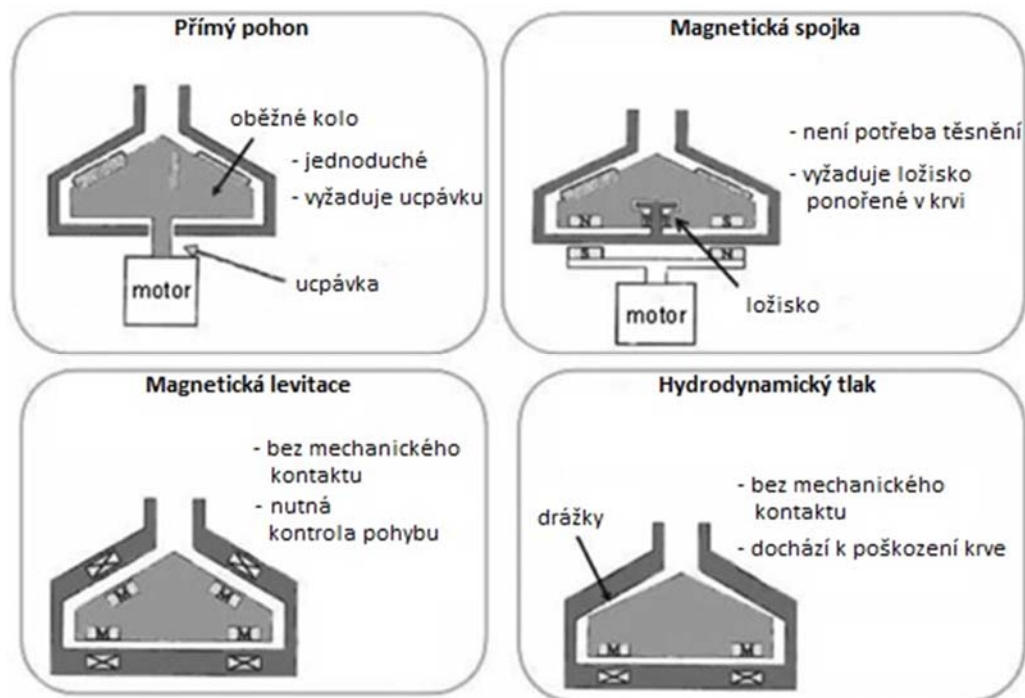
Problémy vznikající v důsledku poškození krve jsou stále aktuální i v případě zařízení současné, 3. generace VADs [12], která jsou ještě menší, často bezložiskové a centrifugální konstrukce, avšak takřka výhradně pracující na principu kontinuálního proudu [6]. Tyto přístroje jsou často poháněné pomocí magnetické levitace [8]. Avšak to je pouze jedno z možných řešení realizace pohonu VADs, které může v souvislosti se způsobem provedení ucpávky přispět ke zlepšení fyziologických parametrů zařízení, a snížit tak riziko komplikací pro jeho příjemce.

### 2.1.3 Problematika pohonu a těsnění

Dle [27] může být oběžné kolo hydrodynamických VADs poháněno různými způsoby, např. prostřednictvím *přímého pohonu*, *magnetické spojky*, *magnetické levitace*, či levitace za pomoci *hydrodynamického tlaku* – obr. 2.4. Každý způsob přináší jisté výhody i nevýhody, např. magnetická levitace oproti přímému pohonu eliminuje abrazi nepoužitím hřídele a slibuje tedy dlouhou životnost díky absenci opotřebení. Na druhou stranu zase vyžaduje přídavný ovládací systém a elektrickou energii navíc k udržení uložení a kontroly pohybu oběžného kola. Nevýhoda využití hydrodynamického tlaku – jinak ideálního systému uložení taktéž eliminujícího mechanický kontakt součástí – zase spočívá v principu jeho vzniku, kdy využívá krev jako pracovní kapalinu, což může opět vést k hemolýze [27, 29]. Také použití ložiska u magnetické spojky může být kritické jak z hlediska hemolýzy [32], tak vzniku krevních sraženin [12].

2.1.3

<sup>12</sup> Dále též v [28], kde navíc autoři - podobně jako v případě trombózy (viz pozn. <sup>10</sup>) – vyvíjejí model pro predikci hemolýzy, fungující na principu minimalizace oblastí výskytu vysokého smykového napětí a snížení proudění přes tyto oblasti.



Obr. 2.4 Způsoby pohonu oběžného kola VADs [27, upraveno]

Naproti tomu případ přímého spojení motoru a oběžného kola přináší výhody v jednoduchosti mechanismu a vysoké účinnosti, součástí konstrukce však musí být též hřídelová ucpávka, bránící vniknutí krve do prostoru motoru. Ucpávka je ale zároveň i obvyklým místem vzniku trombózy a hemolýzy; dále v případě konvenčních mechanických ucpávek není jejich životnost dostatečná pro požadavek dlouhodobého použití uvnitř lidského těla [27]. V prostředí krve navíc na rozhraní povrchů ucpávky a hřídele kvůli jejich relativní drsnosti vzniká denaturovaný proteinový film, který způsobuje vysoké a nestabilní tření [30]. Jako možný způsob překonání těchto potíží navrhuji v [27] použití *ucpávky využívající magnetickou kapalinu (MFS)*, a podobnou cestou jdou také autoři v [31], kteří se v rámci vývoje vlastní krevní pumpy s původně konvenčním mechanickým těsněním nyní věnují výzkumu vlastností MF ucpávek při těsnění krve.

#### 2.1.4 Prstencový motor

Prstencový (alternativně momentový) motor je specifický typ nejčastěji synchronního stroje s permanentními magnety. Díky své konstrukci, sestávající de facto ze dvou vůči sobě pohyblivých prstenců (vnější statorový s vinutím, vnitřní rotorový s permanentními magnety), může být s výhodou osazen například tam, kde je nutné šetřit prostorem či něco vést vnitřkem motoru. Pro detailnější parametry a možnosti uplatnění těchto motorů viz [34] - vyzdvihnout lze např. realizaci pohonu lodí – obr. 2.5.



Obr. 2.5 Schottel Rim-Driven Thruster [33]

Idea využití dvojice prstencových motorů při realizaci přímého pohonu oběžných kol tandemového axiálního krevního čerpadla v podobě, jak je pojata v rámci profesorem Pochylým paralelně vedené diplomové práce Karla Trlici, je doposud zřejmě unikátní. Toto řešení se zdá být vhodné z hlediska hemolýzy, neboť smyková napětí u běžných axiálních čerpadel nabývají v mezeře mezi špičkou vrtule a statorem velmi vysokých hodnot. Tato spára je ale v případě konstrukce podobné té na obr. 2.5 zcela eliminována. Díky tandemovému uspořádání s protiběžnou rotací je též možné vynechat difuzer – jinak obvyklý prvek axiálních LVADs, který je vysoce problematickým místem z hlediska vzniku trombózy. Jeho funkci přebírá druhé protiběžné kolo. Kritickým prvkem tohoto konceptu však zůstává realizace těsnicích uzlů, kterých je oproti klasickým způsobům pohonu rovnou několik.

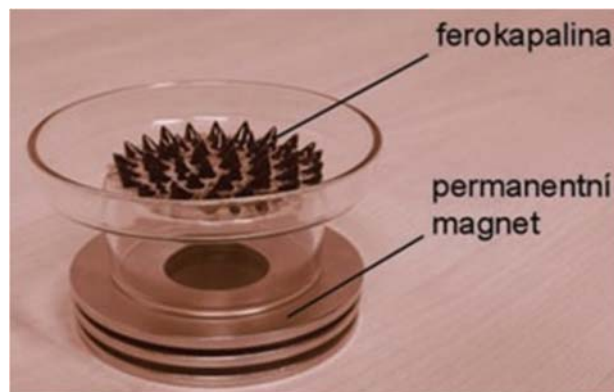
## 2.2 Magnetické kapaliny

Jak uvádí [36], z běžné praxe každý ví, že pouze určité kovy jsou magnetické. Tento jev, správně nazývaný feromagnetismus, vzniká *stejnoseměrným uspořádáním magnetických momentů*<sup>13</sup> jednotlivých atomů materiálu, a lze se s ním setkat pouze u pevných látek. Existuje však určitá skupina materiálů, které se skládají z jemných feromagnetických částic rozptýlených v nosné kapalině a vytvářejí tak unikátní spojení magnetických vlastností a kapalného skupenství – tzv. *kapalně feromagnetikum* [42] - viz obr. 2.6. Tyto suspenze jsou souhrnně označovány jako *magnetické kapaliny (MFs)*<sup>14</sup> a vědní obor, který se jimi zabývá, se nazývá *ferohydrodynamika*<sup>15</sup> [38].

<sup>13</sup> Vnik uspořádání je důsledkem tzv. *výměnné interakce* - výlučného jevu kvantové mechaniky [36].

<sup>14</sup> Alternativně též: *ferokapaliny, ferofluida, nanokompozitní magnetika* [38].

<sup>15</sup> Příbuznými obory jsou [38]: *elektrohydrodynamika* - zabývá se silovou interakcí mezi elektrickým polem a elektricky polarizovatelnou kapalinou (tzv. *elektroreologickou (ER) kapalinou* [39]); *magnetohydrodynamika* - zabývá se silovou (Lorentzovskou) interakcí mezi magnetickým polem a kapalinou, kterou prochází elektrický proud.



Obr. 2.6 Magnetická kapalina s volnou hladinou pod vlivem magnetického pole permanentního magnetu [56]

### 2.2.1 Základní charakteristika, vlastnosti, složení a výroba

Magnetické kapaliny se řadí mezi tzv. „smart“ materiály, což jsou takové materiály, které samy od sebe reagují na změnu prostředí, ve kterém se nacházejí, a to změnou svých vlastností [40] – např. při aplikaci magnetického pole na MR kapalinu dojde k výraznému zvýšení odporu vůči proudění [39] – naroste její zdánlivá viskozita<sup>16</sup>. MFs jsou známy a v určitých oblastech využívány prakticky již asi půl století, avšak jejich výraznější nástup je možné pozorovat až od konce milénia<sup>17</sup>. Umožnil jej kromě pokroku technologického také pokrok v oblasti jejich matematického modelování [44, 39]. Současný intenzivní rozvoj na poli nanotechnologií pak otevírá cestu k syntéze zcela nových typů MFs s lepšími užitnými vlastnostmi a tedy i širším praktickým využitím [42].

Základní informace o magnetických kapalinách byly již mnohokrát shrnuty různými autory, proto i následující poznatky vycházejí především, pokud není uvedeno jinak, z prací profesora Daniela Mayera [38] a jeho doktoranda inženýra Petra Polcara [42] na toto téma:

Jemné částičky pevné fáze jsou obvykle z práškového železa či z látek obsahujících ionty  $Fe^{2+}$  nebo  $Fe^{3+}$  (sraženiny železnatých a železitých roztoků, např. maghemit  $Fe_2O_3$  či magnetit  $Fe_3O_4$ ), niklu, feritu a jiných. Velikost částic je nejvýznamnějším parametrem pro rozdělení magnetických kapalin na dva základní typy<sup>18</sup>:

<sup>16</sup> V případě neneutonských kapalin, kam spadají i MFs, hovoříme o zdánlivé viskozitě. Ta je stejně jako dynamická viskozita u newtonských kapalin (např. voda) funkcí teploty a tlaku, navíc je ale závislá i na jiných parametrech: rychlosti smyku, deformační historii kapaliny a dalších [55].

<sup>17</sup> Typickou a zřejmě nejvýznamnější aplikací magnetických kapalin byly po dlouhou dobu právě hřídlové ucpávky [37], především s vývojem sofistikovanějších kontrolních mechanismů [39] se však do budoucna stávají vysoce perspektivními i další aplikace, např. v semi-aktivních tlumičích [56].

<sup>18</sup> Dělení však nemusí být vždy tak striktní, existují i další druhy kapalin – například tzv. *nano-micro-structured composite magnetizable fluid (CMF)* vyvíjená rumunskou společností Roseal, která obsahuje mix mikro- a nanočástic, a kombinuje tak výhody obou: vysokou magnetizaci, výrazný magnetoviskózní efekt a zároveň zvýšenou stabilitu proti sedimentaci [45].

- *feromagnetické (FF) kapaliny*<sup>19</sup> – koloidní suspenze – obsahuje částice o rozměrech řádově v nanometrech
- *magnetoreologické (MR) kapaliny* – nekolooidní suspenze – obsahuje větší částice o rozměrech řádově v mikrometrech

Důležitým důsledkem velikosti částic je jednak buď přítomnost (u FF kapalin), anebo absence (u MR kapalin) *Brownova pohybu*<sup>20</sup>, který udržuje částice ve vznosu a tedy v rovnoměrné koncentraci po objemu kapaliny a brání jejich usazování, a dále také intenzita tzv. magnetoviskózního jevu (více v kap. 2.2.3). Každý ze dvou druhů kapalin je tak více vhodný pro jiné použití.

Pro FF kapalinu přitom platí, že každá částice tvoří tzv. Weissovu doménu se spontánní magnetizací, díky čemuž má magnetický moment a chová se jako miniaturní permanentní magnet – magnetický dipól. Částice MR kapaliny jsou oproti tomu multidoménné a jako dipól se chovají pouze při působení magnetického pole.

Tyto dipóly, rozptýlené v kapalném fázi (vodě, minerálním či syntetickým oleji, glykolu, parafínu, petroleji a dalších), se pak mohou pod vlivem vnějšího magnetického pole volně polarizovat, tj. natáčet a případně i řadit podle jeho směru - obr. 2.7. Působí na ně magnetické síly dle rovnice [36]:

$$F = Mg\alpha B \quad (2-1)$$

kde	$F$	[N]	magnetická síla
	$M$	[A/m]	magnetizace částice
	$B$	[T]	magnetická indukce

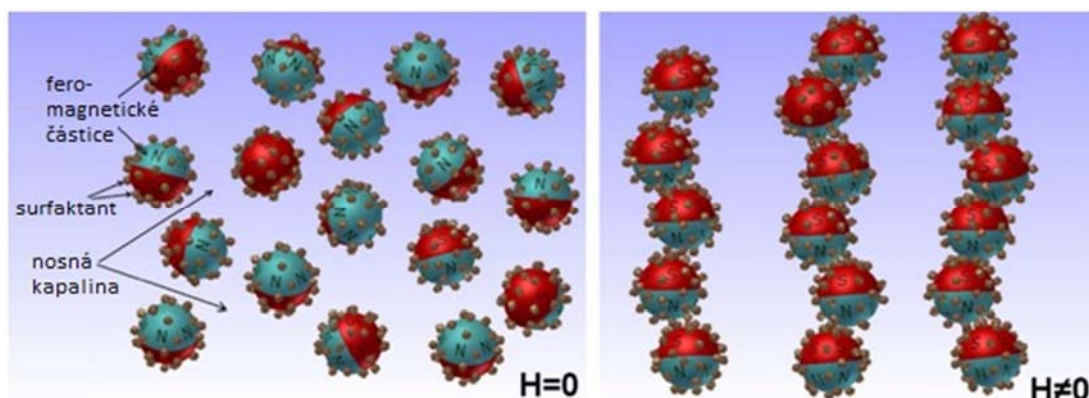
a celá suspenze je díky tomu i s nimi vtahována do magnetického pole ve směru jeho intenzity. Suspendované částice - jejich velikost, koncentrace a zastoupení jednotlivých velikostních frakcí - zcela určují magnetické vlastnosti suspenze, zatímco nosná kapalina má pak největší vliv na její chemické a mechanické vlastnosti. Jejich matematický popis je ovšem obtížný kvůli magneticky anizotropnímu charakteru MFs.

Permeabilita MFs je o několik řádů nižší (relativní hodnoty v rozmezí  $\mu_r=1\div 5$ ) než permeabilita u pevných feromagnetik, přesto stále tyto kapaliny zesilují magnetické pole.

<sup>19</sup> Někdy též zjednodušeně *ferokapaliny*. Názvosloví magnetických kapalin bohužel nebývá zcela striktně dodržované, někteří autoři uvádějí ferokapaliny jako nadřazený pojem, zahrnující jak MR kapaliny, tak kapaliny s menšími částicemi, které jiní zase speciálně označují jako *magnetické nanokapaliny* - z anglického *magnetic nanofluids (MNFs)*.

<sup>20</sup> Náhodný pohyb mikroskopických částic dispergovaných v tekutině. Molekuly v roztoku se neustále náhodně srážejí vlivem tepelného pohybu, a díky tomu je náhodná i okamžitá poloha částice [48]. Jeho vlivu podléhají částice s dostatečně nízkou hmotností, v případě MFs jde o částice s nanorozměry.





**Obr. 2.7** Magnetoviskózní jev: magnetická (resp. magnetoreologická) kapalina bez ovlivnění magnetickým polem (intenzita magnetického pole  $H=0$ ) se navenek jeví jako nemagnetická (vlevo), pod jeho vlivem ( $H\neq 0$ ) se však částice polarizují a formují do řetězců (vpravo) [41, upraveno]

Pro průmyslové využití je pak důležitá dostatečná koloidní stabilita magnetické kapaliny - nesmí docházet ke shlukování (agregaci) částic vlivem přitažlivých sil (van der Walsových ani magnetických). Za tímto účelem jsou částice chemicky ošetřeny – jsou pokryty povrchově aktivní látkou – tenkým ochranným polymerním obalem, tzv. detergentem či surfaktantem, který mezi částicemi vyvolává odpuzivé síly – viz obr. 2.7. Detergent tvoří například u typické FF kapaliny asi 10% jejího objemu; 85% je nosná kapalina a pouze zbylých 5% objemu připadá na pevné částice – tj. podstatně menší podíl než v případě typické MR kapaliny, v nichž částice tvoří až 70% (avšak váhových).

Pracovní teplota typické fero kapaliny může ležet v rozsahu  $-125^{\circ}\text{C}$  až  $200^{\circ}\text{C}$ , přičemž teplota zároveň ovlivňuje viskozitu nosné kapaliny s přibližně exponenciální závislostí. Změny teploty negativně působí na detergent - kapalina je postupně destabilizována a zkracuje se tak její životnost. Nároky na chlazení zařízení pracující s MFs nebývají vyšší než v případě pevných feromagnetik, neboť hodnoty *Curieových teplot*<sup>21</sup> obou druhů magnetik jsou zhruba srovnatelné.

Výroba magnetických kapalin probíhá synteticky dnes již mnoha možnými způsoby<sup>22</sup>:

- mechanické drcení neboli *mokrý mletí* – jeden z nejstarších způsobů, časově velmi náročný proces, částice řádově v mikrometrech
- různé rychlejší fyzikálně-chemické postupy – *chemické vylučování částic z roztoků železických solí, elektrolyza, odpařování, vločkování*
- další chemické nanotechnologické procesy – *srážecí metoda, chemická substituce, mikroemulzní technika, dekompozice organických sloučenin kovů*

<sup>21</sup> Magnetické vlastnosti MFs se snižují s rostoucí teplotou, až při dosažení Curieovy teploty je jejich relativní permeabilita  $\mu_r=1$ .

<sup>22</sup> Detailněji o některých procesech např. v [44] a také v odkazech uvedených v práci [42]; další inovativní a při výrobě MFs potenciálně využitelná metoda je výroba magneticky vodivého prášku za pomoci kavitace. Prototyp zařízení pracujícího na principu dýzy byl vyvinut v roce 2013 ve spolupráci výzkumného centra CEITEC a OFI FSI VUT v Brně [46, 47].

### 2.2.2 Matematický popis – model magnetické kapaliny

Nalézt vhodný fyzikální model komplexně popisující chování magnetických kapalin je poměrně složitý problém, který na svého řešitele klade požadavky na hluboké znalosti z oblasti fyziky, magnetismu a hydrodynamiky a proto již desítky let zaměstnává mnohé odborníky. V závislosti na tom, jaké veškeré vlivy jsou do modelu zahrnuty, neboli jak velkého zjednodušení oproti realitě se daný model dopouští, lze odvodit více modelů proudění magnetické kapaliny. Vyčerpávajícím úvodem do problematiky může být např. publikace [44] (*Blums et al., 1997*), kde autoři popisují posun od raně používaného modelu magnetické kapaliny jakožto magnetizovatelného média pouze o jediné složce, ke konceptu modelu s vnitřní rotací částic v pohybuující se magnetické kapalině, zohledňujícího i další faktory, např. nerovnovážné procesy *magnetické relaxace*<sup>23</sup>. Takový model je při zahrnutí nevratných termodynamických procesů disipace odvozen např. v [49].

V případech, kdy je procesy relaxace magnetizace možné zanedbat (magnetické pole se v čase nemění – to je obvykle i případ hřidelových ucpávek s MFs [60]), je možné dle [44] aplikovat kvazi-rovnovážný model hydrodynamiky magnetické kapaliny:

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \eta \nabla v + M \nabla H \quad (2-2)$$

$$\operatorname{div} v = 0 \quad (2-3)$$

kde	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota
	$v$	[m/s]	rychlost
	$p$	[Pa]	tlak
	$\eta$	[Pa·s]	dynamická viskozita
	$M$	[A/m]	magnetizace
	$H$	[A/m]	intenzita magnetického pole

Spodní vztah (2-3) je rovnicí kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu, zatímco horní vztah (2-2) je forma Navier-Stokesovy rovnice, jejíž člen  $M \nabla H$  vyjadřuje tzv. *ponderomotive force*<sup>24</sup>. Blums dále mluví o existenci rozsáhlé skupiny takových případů proudění magnetické kapaliny, kde je tato síla potenciálem - např. izotermické proudění s konstantní koncentrací feročástiček. Důsledky případů potenciálního charakteru zmíněného členu se zajímavě a pro magnetické kapaliny charakteristicky projeví v situaci, kdy řešíme hydrodynamický problém kapaliny s otevřeným rozhraním. Tvar takového rozhraní se totiž pod vlivem sil magnetického pole může deformovat, přičemž takto změněný tvar objemu kapaliny v prostoru zároveň ovlivňuje magnetické pole uvnitř kapaliny a tedy i působící síly. Vystává tak rozsáhlá třída nelineárních problémů rovnovážných tvarů (pro ilustraci viz obr. 2.6), určených rovnováhou magnetických sil a sil povrchového napětí. Některé postupy řešení těchto problémů budou dále představeny v kapitole 2.3.5.

<sup>23</sup> Návrat vektoru magnetizace  $M$  do rovnovážného stavu při změně magnetického pole. Definujeme pomocí časových konstant [51].

<sup>24</sup> Nelineární síla působící na nabitou částici v nehomogenním oscilujícím elektromagnetickém poli [52] – v české mutaci bývá člen označován obecně jako *magnetická síla*.

Pro kvazi-rovnovážný model zároveň platí, že intenzita magnetického pole v kapalině je určena rovnicemi magnetostatiky [44]:

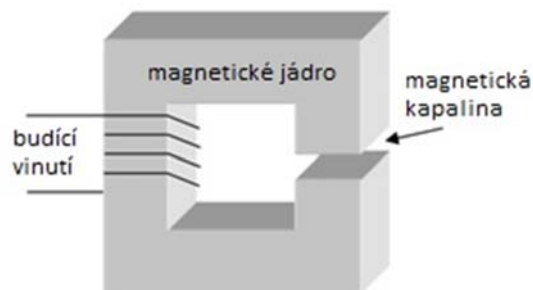
$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0 \quad (2-4)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = 0 \quad (2-5)$$

za okrajových podmínek continuity normálové složky magnetické indukce  $\mathbf{B}$  a tečné složky intenzity magnetického pole  $\mathbf{H}$  na rozhraních kapaliny. Rovnici (2-4) nazýváme Gausův zákon magnetostatického pole, rovnice (2-5) vychází z Ampérova zákona. Ten je v zobecněné podobě společně s rovnicí (2-4) součástí systému čtyř Maxwellových rovnic, pomocí nichž jsme schopni popsat elektromagnetické pole v přítomnosti hmoty. Pro potřeby této práce není nutné zde všechny uvádět, pro bližší seznámení lze doporučit např. [53] či [54].

### 2.2.3 Magnetické pole a magnetoviskózní jev

Zdrojem magnetického pole, kterým MFs ovlivňujeme, může být buď permanentní magnet, anebo elektromagnet. Zatímco permanentní magnety jsou samy o sobě zdrojem neměnného (magnetostatického) pole, magnetické pole elektromagnetu můžeme dynamicky měnit změnou proudu v jeho vinutí – schéma elektromagnetu je na obr. 2.8. V případě mnoha dynamických aplikací využívajících elektromagnety tak mohou hrát negativní roli hysterezní ztráty, vznikající jako důsledek časově proměnlivého magnetického pole [38].



**Obr. 2.8** Schéma jednoduchého elektromagnetu tvořeného cívkou (budícím vinutím) a feromagnetickým jádrem pro ovlivňování magnetické kapaliny ve šěrbině [57, upraveno]

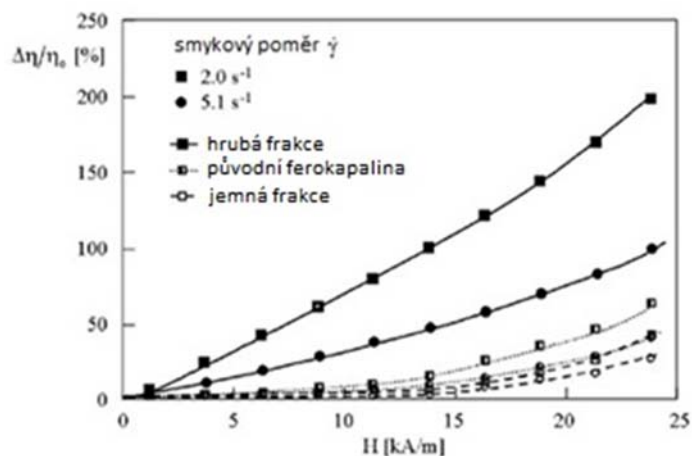
Permanentní magnety jsou hojně využívány jako zdroj magnetostatického pole pro hřídlové ucpávky s MFs, pro mnoho ostatních aplikací magnetických kapalin jsou ale elektromagnety mnohem vhodnější. Umožňují totiž plné využití tzv. magnetoviskózního efektu – jak uvádí [42]: význačného jevu především magnetoreologických kapalin, neboť podmínkou jeho vzniku je dostatečná velikost a koncentrace feročástic v nosné kapalině.

Podstatou efektu je proměnlivost viskozity magnetické kapaliny v závislosti na působícím magnetickém poli. Efekt se projevuje tvorbou řetězců částic ve směru siločar magnetického pole ( $H$ , resp.  $B$ ) a je ilustrován na obr. 2.7 vpravo – takto



by řetězce přemostily tenkou šterbinu v jádru elektromagnetu na obr. 2.8. Řetězce omezují mezimolekulární pohyby a způsobují anizotropii fyzikálních vlastností kapaliny – mění její viskozitu. Ta se zvyšuje s rostoucí intenzitou magnetického pole [38] a nejvyšší hodnotu má ve směru kolmém na směr siločar [42]. Kapalina se při vzniku řetězců chová v podstatě jako pevná látka a teče až při jejich protržení, ke kterému dojde při dosažení mezního smykového napětí – *meze toku*  $\tau_0$  [39]. Tento jev nachází široké uplatnění například v technologii semi-aktivních tlumičů, kdy v závislosti na intenzitě magnetického pole dodávaného elektromagnetem lze dosáhnout velmi rozdílné intenzity tlumení a tím značného dynamického rozsahu tlumiče – viz např. [59]. Pro určité aplikace může mít magnetoviskózní efekt naopak také negativní důsledky v logicky vyšších viskózních ztrátách [42].

Principem jeho vzniku a zásadním vlivem velikosti částic na magnetoviskózní jev ve fero kapalínách se zabývali v [50] (*Odenbach, Thurm, 2002*): pomocí separačního zařízení oddělili z komerčně dostupné fero kapaliny částice hrubé a jemné frakce, s jejichž pomocí pak vytvořili dvě podobné fero kapaliny, s jediným rozdílem ve velikosti jejich fero částic. Vliv tohoto rozdílu na magnetoviskózní efekt dokládá obr. 2.9. Zobrazuje změnu viskozity (resp. poměr změny viskozity k hodnotě viskozity neovlivněné magnetickým polem  $\frac{\Delta\eta}{\eta_0}$ ) v závislosti na intenzitě magnetického pole  $H$ , a to při dvou hodnotách gradientu rychlosti (smykového poměru) v kapalině  $\dot{\gamma}$ . Je patrné, že magnetoviskózní efekt narůstá s klesajícím smykovým poměrem (projevuje se efekt tzv. *shear thinningu*) v případě obou frakcí i původní komerční fero kapaliny. Ovšem ve srovnání s nárůstem viskozity u kapaliny s hrubou frakcí (vyplněné symboly, plná čára) vychází magnetoviskózní efekt u kapalin s jemnou frakcí (nevyplněné symboly, přerušovaná čára) jako v podstatě zanedbatelný.



Obr. 2.9 Magnetoviskózní jev v závislosti na velikosti [50, upraveno]

### 2.2.4 Veličiny a vztahy pro popis magnetických kapalin v magnetostatickém poli

Tato kapitola shrnuje charakteristické veličiny důležité pro další práci s magnetickými kapalinami v magnetostatickém poli a jejich vzájemné vztahy, a doplňuje další poznatky, užitečné pro návrh hřídelové ucpávky. Dle [54] platí následující:

- hlavní veličinou charakterizující magnetické pole je *vektor magnetické indukce*  $\mathbf{B}$  [T], definovaný např. rovnicí:

$$\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} \quad (2-6)$$

kde  $\mathbf{f}$  je okamžitá hodnota síly a  $\mathbf{j}$  je proudová hustota v daném bodě.

- dále zavádíme *magnetický (indukční) tok*  $\Phi$  [Wb] pro libovolně orientovanou plochu  $S$ :

$$d\Phi = \mathbf{B}d\mathbf{S} \quad (2-7)$$

a zároveň platí, že magnetický tok libovolnou uzavřenou plochou  $S$  je roven nule, v diferenciálním tvaru tak platí rovnice (2-4).

- magnetickou indukci lze vyjádřit pomocí *vektorového potenciálu magnetického pole*  $\mathbf{A}$  jako:

$$\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A} \quad (2-8)$$

- vektorový potenciál je vždy možné vybrat tak, aby byla splněna tzv. *kalibrační podmínka*:

$$\text{div}\mathbf{A} = 0 \quad (2-9)$$

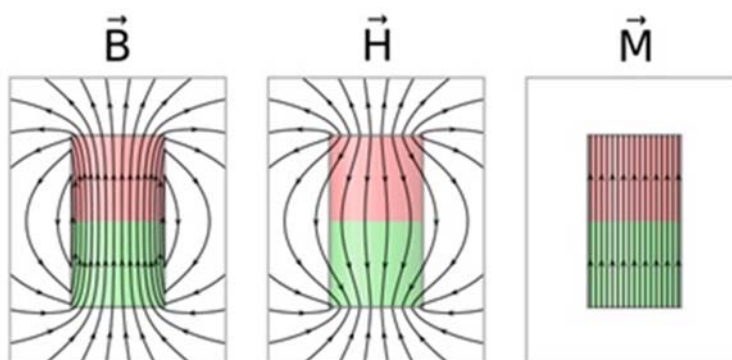
- spojitě prostorové rozložení magnetických dipólů lze charakterizovat hustotou dipólového momentu  $\mathbf{M}$  [A/m], nazvanou *vektor magnetizace*, jehož vztah vůči podobné veličině *vektoru magnetické polarizace*  $\mathbf{P}$  [T] je:

$$\mathbf{P} = \mu_0\mathbf{M} \quad (2-10)$$

kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m je *permeabilita vakua*.

- zavádí se také veličina *intenzita magnetického pole*  $\mathbf{H}$  [A/m], a pro libovolný bod pak v případě magnetostatického pole platí rovnice (2-5) - takové pole je tedy potenciální a lze jej popsat skalárním potenciálem  $\phi$ . Porovnat průběhy vektorů  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{M}$  lze na příkladu

tyčového magnetu na obr. 2.10. Je zřejmé, že siločáry  $\mathbf{B}$  a  $\mathbf{H}$  lze v okolí magnetu považovat v podstatě za totožné<sup>25</sup>.



Obr. 2.10 Porovnání siločar  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{M}$  uvnitř a vně válcového permanentního magnetu [58]

- dále platí následující vztah mezi magnetizací a intenzitou magnetického pole:

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \quad (2-11)$$

kde bezrozměrnou konstantu úměrnosti  $\chi_m$  nazýváme *magnetickou susceptibilitou látky*. Její vztah vůči permeabilitě vyjadřují rovnice pro *permeabilitu látky*  $\mu$  [H/m] a její bezrozměrnou *relativní permeabilitu*  $\mu_r$ :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2-12)$$

$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad (2-13)$$

- permeabilita látky je zároveň dána poměrem magnetické indukce a intenzity magnetického pole:

$$\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} \quad (2-14)$$

- na základě rovnic (2-11) až (2-14) lze tedy odvodit:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{M} + \mathbf{H}) \quad (2-15)$$

Jak dále dodává [54]: „Libovolná úloha o magnetostatickém poli může být vyřešena pomocí těchto rovnic; stačí znát magnetické vlastnosti a prostorové rozložení příslušných látek.“

Praxe však ukazuje, že splnit obě zmíněné podmínky nemusí být v případě magnetických kapalin jednoduché: problém se znalostí prostorového rozložení

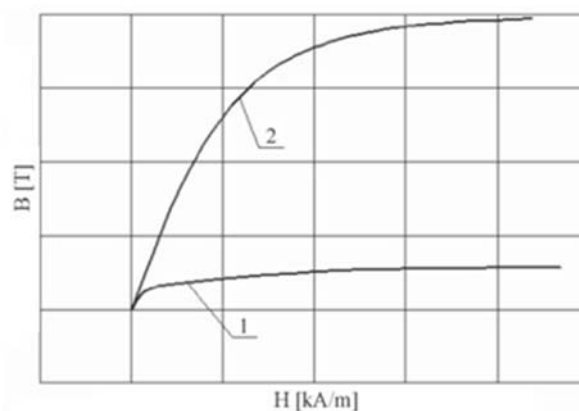
<sup>25</sup> Obdobný by byl též průběh siločar vektoru magnetizace  $\mathbf{M}$ , pokud by byl magnet obklopen magnetickou kapalinou. V magnetostatickém poli, ve kterém se relaxace magnetické kapaliny nemůže projevit, jsou totiž siločáry  $\mathbf{M}$  a  $\mathbf{H}$  rovnoběžné [49].

magnetické kapaliny s otevřenou hladinou byl nastíněn v části 2.2.2; druhý, neméně významný problém spočívá ve zjištění jejich magnetizačních a magneto-viskózních vlastností. Kapalné skupenství, silná anizotropie a relativně nízké hodnoty permeability jsou dle [42] komplikacemi, které znemožňují aplikaci klasických metod pro určování materiálových vlastností pevných feromagnetik na magnetické kapaliny. Navíc, pokud vůbec výrobce sám má magnetizační křivky svých kapalin k dispozici, většinou je negarantuje a zákazníkovi ani neposkytuje. Řešením je tedy vývoj vlastních speciálních měřicích metod, které respektují specifické vlastnosti kapalných feromagnetik (např. [63, 123]).

Pro seznámení se s hlavními charakteristikami magnetických kapalin lze opět čerpat z [42]:

Nejdůležitějším parametrem pro konstruktéra je její permeabilita, vyjádřená pomocí *magnetizační (neboli B-H či M-H) křivky* kapaliny – obr. 2.11. Permeabilita MFs je však obecně nelineární – magnetické pole způsobuje anizotropii jinak izotropní homogenní kapaliny. Příčinou anizotropie jsou vznikající nehomogenity ve struktuře kapaliny (tvorí se řetězce částic) a se zesilujícím se magnetickým polem se tedy zesiluje také anizotropie - až do okamžiku magnetické saturace. Permeabilita je tak zároveň funkcí prostoru anizotropního prostředí. Přesto s ní lze pracovat jako s konstantou, a to za fyzikálně splnitelného předpokladu, že se pracovní bod MFs pohybuje po lineární části B-H křivky (tj. v oblasti nízké magnetické indukce) a zároveň, že vektory  $\mathbf{B}$  a  $\Phi$  musejí být přibližně kolineární. Platí tedy rovnice (2-14). Dojde-li k saturaci, dále se zvyšující intenzita pole už nemá vliv na růst magnetizace - ta se zastaví na určité maximální hodnotě  $M_S$ , která se různí pro konkrétní kapaliny - dle [38] typicky asi 1,3 T, často je to však i mnohem méně.

Obr. 2.11 zároveň ilustruje typický rozdíl v průběhu magnetizačních křivek pro případ magnetoreologické a feromagnetické kapaliny, který do značné míry definuje odlišné oblasti jejich použití. Řádový rozdíl hodnot saturace MR a FF kapalin dokládá také tabulka 1. Doplňme, že v případě hřídelových ucpávek, využívajících nejčastěji ferokapaliny s nanočásticemi, se jejich pracovní bod obvykle nachází v oblasti saturace – v takovém případě pak bereme hodnotu permeability kapaliny jako  $\mu_r \approx 1$  [60].



**Obr. 2.11** Závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole v případě: feromagnetické kapaliny - s nanočásticemi (1), magnetoreologické kapaliny - s mikročásticemi (2) [62, upraveno]

Další významnou charakteristikou MFs jsou jejich magneto-viskózní vlastnosti, vyjádřené obvykle pomocí  $\tau_0$ - $H$  křivek – křivek závislosti meze toku  $\tau_0$  [Pa] kapaliny na intenzitě magnetického pole. Tyto křivky mají význam především u magnetoreologických kapalin<sup>26</sup>, schopných ze svých velkých feročástic vytvářet silné řetězce a tedy i mít výraznou mez toku, čehož se s výhodou využívá v nejrůznějších dynamických aplikacích. I zde se projevuje saturace kapaliny – mez toku roste jen do určité hodnoty intenzity pole a nad touto se už dále nezvyšuje. Křivky bývají obvykle poskytovány výrobcem (např. zde [122] pro MR kapalinu MRF-122EG firmy LORD).

Samotný parametr dynamické viskozity má ale pochopitelně význam i u magnetických kapalin, které se výraznou mezí toku nevyznačují – tedy kapalin feromagnetických. Její hodnota se dle konkrétního typu pohybuje v rozmezí  $\eta=5\div 10000$  mPa·s, zároveň je ale závislá na magnetické indukci a lze pro ni nalézt empirický vztah, např. dle Radionova [60]:

$$\eta(B) = \eta_{B=0}(1 + 50\sqrt{B}) \quad (2-16)$$

kde za  $B$  dosazujeme v teslách; hodnota dynamické viskozity při  $B=0$  bývá většinou udávána výrobcem – viz např. tab. 2.1.

Tab. 2.1 Srovnání vlastností vybraných FF a MR kapalin [63, upraveno]

Magnetická kapalina	Dynamická viskozita Pas ( $B = 0$ T, $\gamma = 100$ s <sup>-1</sup> )	Hustota g/ml	Saturační magnetizace kA/m
FF-APGS21	0.50	1.14	17
FF-APGW05	0.51	1.30	31
MR-122EG	0.21	2.38	361
MR-140CG	1.57	3.54	698
MR-Basonetic 2040	1.07	2.47	424
MR-Basonetic 5030	0.58	4.12	795

Analogicky k magnetickým kapalinám lze pak doplnit charakteristické veličiny také pro další materiály, používané při konstrukci zařízení využívajících MFs. Jsou jimi především permeabilita a hodnota saturační magnetizace pevných feromagneticky měkkých materiálů (např. oceli), vyjádřené opět magnetizačními křivkami. Jejich dohledávání pro konkrétní materiály je obecně poměrně komplikované, existují však i jakési webové knihovny (z dobré vůle jejich autorů veřejně dostupné) - např. zde [98]. Pro případ permanentních magnetů jsou pak charakteristické hodnoty jejich *zbytkové magnetizace (magnetické remanence)  $B_R$*  [T] a *koercivní síly  $H_C$*  [A/m] (hodnoty uvádí výrobce), které lze nahradit odpovídající velikostí relativní permeability [60]. Jinak významnou charakteristiku feromagnetických materiálů – jejich hysterezní křivku – můžeme pro případ magnetostatického pole opomenout.

<sup>26</sup> Konstrukční návrh reometru pro měření viskozity MR kapaliny například na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně v roce 2013 provedl Radek Lán ve své bakalářské práci [61].

### 2.2.5 Reologický model – binghamská kapalina

Charakterizovat chování magnetické kapaliny lze z makroskopického pohledu pomocí reologického modelu. Všechny reálné kapaliny lze dělit z hlediska jejich deformačních vlastností na několik druhů [64]:

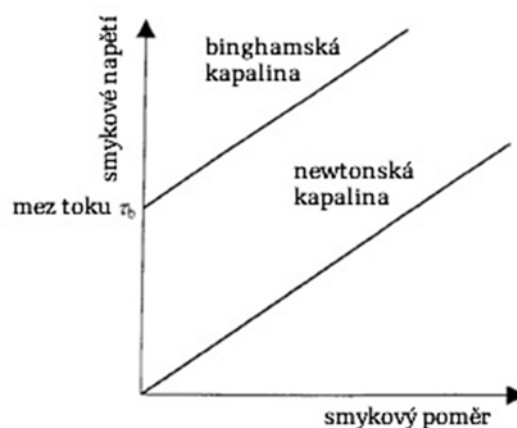
Základním parametrem rozdělení na newtonské a nenewtonské je formulace jejich viskozity, respektive zdali je tato při dané teplotě a tlaku konstantní hodnotou anebo funkcí tečného napětí  $\tau$  a případně i příčného gradientu rychlosti  $\frac{dv}{dn}$ . Pro první případ newtonských kapalin platí Newtonův zákon viskozity:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dn} \quad (2-17)$$

pro druhý případ, kam bývají obecně řazeny i magnetické kapaliny, pak:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \left(\frac{dv}{dn}\right)^n \quad (2-18)$$

kde  $k$  je součinitel koexistence (trvání),  $n$  je exponent nenewtonského toku a  $\tau_0$  je právě mez toku (nenewtonské) kapaliny při  $\frac{dv}{dn} = 0$ , zmiňovaná výše. Nenewtonské kapaliny se dále dělí na kapaliny s vlastnostmi časově nezávislými (tj. pseudoplastické, binghamské a dilatantní) a časově závislými (tixotropní, reopexní). Skupinám těchto kapalin přísluší odlišné hodnoty koeficientů v rovnici (2-18), a různé průběhy závislosti jejich smykového napětí na gradientu rychlosti vykresluje známý reogram (viz např. [64, 65]) - v rámci magnetických kapalin však není potřeba zabývat se jimi všemi. V souvislosti s MFs bývá totiž nejčastěji skloňován především binghamský reologický model. Příkladem dalších směsí vykazujících se binghamským chováním může být např. zubní pasta či splašková voda [64]. Obr. 2.12 znázorňuje jeho srovnání s modelem newtonským.



Obr. 2.12 Idealizovaný reogram newtonské a binghamské kapaliny [39, upraveno]

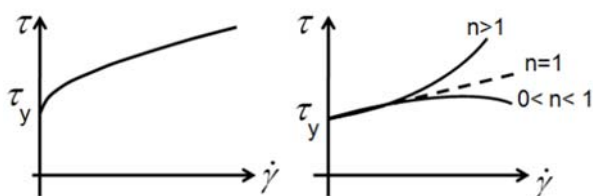
Binghamská, neboli ideálně plastická tekutina kombinuje newtonské lineární chování kapaliny při smykovém napětí vyšším než je mez toku  $\tau_0$ , a chování pevného tělesa při napětí nižším než  $\tau_0$  - kapalina tedy v oblasti  $\tau < \tau_0$  nemůže téci [39]. V rovnici (2-18) přísluší takto popsané magnetické kapalině hodnoty koeficientů  $n=1$ ,  $k=\eta_B$  (*binghamská viskozita*<sup>27</sup>) a platí tedy [66]:

$$\tau = \tau_0(\mathbf{H}) + \eta \cdot \frac{dv}{dn} \quad (2-19)$$

Bez vlivu magnetického pole ( $\tau_0=0$ ) lze s dostatečnou přesností popisovat MFs jako newtonské kapaliny.

Pro většinu inženýrských aplikací představuje tento jednoduchý binghamský model efektivní nástroj popisu základních charakteristik MFs závislých na magnetickém poli [66]. Otázkou však je, nakolik jej lze považovat za univerzálně platný pro veškeré magnetické kapaliny a jejich aplikace. S přihlédnutím k často velmi rozdílným vlastnostem v současnosti dostupných MFs - ať už hovoříme o velikosti částic (či dokonce o směsi částic různých velikostí), jejich koncentraci, chemickém složení částic i nosné kapaliny - to lze jen těžko považovat za samozřejmé. A skutečně - výsledky rešerše poukazují na nedostatečnou jednoznačnost vymezení platnosti binghamského modelu. Situace je ještě relativně přehledná v případě kapalin s výrazným magnetoviskózním efektem - typicky tedy u MR kapalin, kde bývá binghamský model v rámci jejich charakterizace pravidelně zmiňován - např. [39, 66, 67, 71]; jak ovšem připomíná obr. 2.9, kapaliny s příliš jemnými částicemi vykazují i v přítomnosti magnetického pole de facto newtonské chování [50] - mez toku je tak malá, že je pro praktické využití v podstatě zanedbatelná. V takovém případě tedy nemá smysl hovořit o binghamském modelu, striktně vzato však není splněn ani předpoklad platnosti Newtonova zákona, neboť viskozita je funkcí magnetického pole - např. dle odvozené závislosti v rovnici (2-16).

Existují dále také jakési vyšší variace na Binghamův model - Claracq et al. v [68] uvádí např. modely Cassonův či Hershel-Bulkleyův, které aproximují průběh závislosti neneutonského smykového napětí  $\tau$  na smykovém poměru  $\dot{\gamma}$  pomocí křivek - obr. 2.13. Jak ale vyplývá z jím provedené spektromechanické analýzy několika MR kapalin, ani tyto modely mnohdy dostatečně přesně nereprezentují skutečně naměřené závislosti.

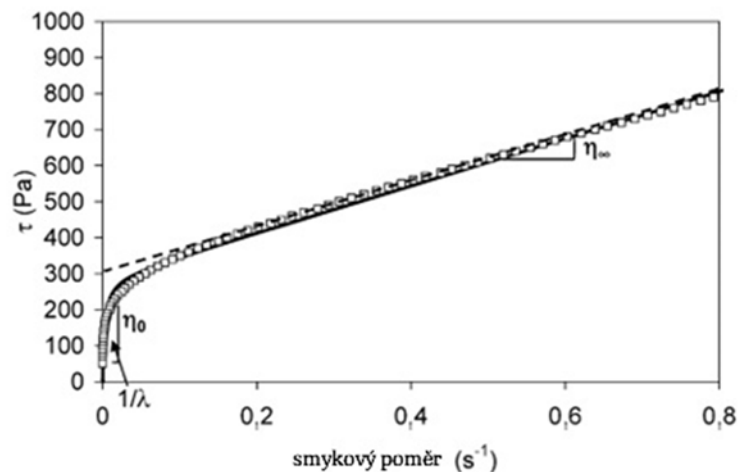


**Obr. 2.13** Cassonův model (vlevo) a Hershel-Bulkleyův model pro různé hodnoty exponentu neneutonského toku  $n$  (vpravo) [67]

<sup>27</sup> Odpovídá směrnici lineární části reogramu binghamské kapaliny.



Z experimentálně zjištěného reogramu MR kapaliny na obr. 2.14 je totiž patrné, že v oblasti velmi malých smykových poměrů tato teče newtonsky (jako kapalina s velmi vysokou viskozitou určenou směrnicí  $\eta_0$ ). Chová se zde tedy spíše jako pseudoplastická kapalina a binghamskému modelu odpovídá až při vysokých hodnotách smykového poměru. Claracq nakonec dosahuje nejlepší aproximace průběhu pomocí Crossova modelu.<sup>28</sup>



**Obr. 2.14** Experimentálně zjištěný reogram MR kapaliny z článku [68, upraveno] (čtverečky), a jeho aproximace modelem dle Binghamu (čárkovaně) a Crosse (plná čára);  $\eta_\infty$  zde označuje binghamskou viskozitu  $\eta_B$ .

To, že takovéto chování není u magnetických kapalin zcela mimořádné, potvrzuje také diplomová práce [55] (Stejskal, 2013), v níž se autor zabývá právě aplikací binghamova modelu na MFs. Ta též dokládá obecnou nedostupnost relevantních parametrů magnetických kapalin, které by spolehlivě umožnily aplikovat na ně Binghamův model. Proto i Stejskal odvozuje mez toku ferokapaliny, jejíž ostatní parametry získal z článku [69], jako pouze zdánlivou, a to extrapolací průběhu „binghamské“ části křivky  $\tau$ - $\dot{\gamma}$  (oblast vysokého  $\dot{\gamma}$ ) do oblasti  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ . Podobně jako to ilustruje čárkovaná přímka na obr. 2.14; kapalinu z Claracqova článku [68] by tedy bylo možné s připuštěním určité nepřesnosti aproximovat Binghamovým modelem se (zdánlivou) mezí toku  $\tau_0 \approx 300$  Pa. Práce [55] dále srovnává analyticky odvozené tvary rychlostních profilů proudění této jedné konkrétní ferokapaliny z článku [69] pro několik typových úloh s řešením pomocí CFD solveru Fluent. Ten využívá pro simulaci proudění binghamské kapaliny Hershel-Bulkleyův model, rozšířený o předpoklad, že rychlost smyku pro oblast  $\tau < \tau_0$  může být i větší než 0. Ačkoliv výsledky práce mnoho nevypovídají o obecné aplikovatelnosti Binghamova modelu na nejrůznější MFs, jsou přesto dokladem dobré shody mezi analytickým a numerickým řešením pomocí Fluentu, a to za předpokladu, že dokážeme určit parametry kapaliny potřebné pro binghamský model.

Ve snaze přesně porozumět a modelovat chování magnetických kapalin v oblasti

<sup>28</sup> Souhrn a definice nejpoužívanějších reologických modelů různých kapalin lze nalézt např. zde [70].



nízkých smykových poměrů a otevřít tak cestu k nové úrovni jejich využití se ale v současnosti asi největší pozornost výzkumu obrací směrem ke studiu těchto jevů na mikroskopické úrovni. Dokladem toho může být práce [67] (*Nassar, 2013*), v níž autor v rámci svého výzkumu - jehož cílem je pomocí MR kapaliny reprodukovat charakteristickou hmatovou odezvu klávesy klasického pianu - nejdříve shrnuje nedostatky dosavadních mikroskopických modelů, a dále se je snaží překonat za pomoci nově získaných poznatků o vnitřních dějích a interakcích částicových struktur. Hloubka této problematiky však už překračuje rozsah této práce.

### 2.2.6 Výrobci a aplikace magnetických kapalin

2.2.6

Dle [56] existovalo už v roce 2007 několik tisíc patentů využívajících magnetické kapaliny, uplatnit v praxi se však podařilo pouze některým z nich - a hřídelové ucpávky patří mezi ty nejstarší a nejúspěšnější [37].

V současné době existuje již široký sortiment komerčně dostupných magnetických kapalin s rozdílnými vlastnostmi. Jejich výrobci a distributory jsou například:

- Ferrotec (USA) – nabízí kapaliny pro audiotechniku a biomedicínské aplikace, avšak žádnou jmenovitě vhodnou pro těsnění – dodává pouze vlastní kompletní magnetické ucpávky [90]
- Liquids Research Limited (Spojené království) – nabízí řadu MR i FF kapalin, mezi nimi i několik jmenovitě vhodných pro magnetické ucpávky [89]
- Lord Corporation (USA) – nabízí MR kapaliny a produkty je využívající; zajímavým údajem je zde uváděná cena: v přepočtu více než 16 000 Kč za litr [91]
- dále bývají zmiňovány [42]: laboratoře při polytechnické univerzitě v Timisoaře (Rumunsko) či laboratoře Ivanovské Státní Energetické Univerzity V. I. Lenina – jinak též FerroLabs (Rusko; komerční produkce kapalin je v současnosti však již pravděpodobně ukončena)

MR kapaliny bývají typicky spojovány spíše s jinými druhy aplikací, než jsou hřídelová těsnění, kde se častěji používají FF kapaliny. Je to především kvůli vyššímu třecímu momentu MR kapalin (a tedy i většímu odporu proti pohybu a tím pádem nižší účinnosti) ve srovnání s FF kapalinami. Přesto je s nimi i na tomto poli stále experimentováno [41,74, 124].

Nejrůznější aplikace magnetických kapalin byly již mnohokrát shrnuty různými autory - hřídelové ucpávky ještě budou rozebrány dále, z ostatních tedy alespoň jmenujme [37, 43, 56, 59, 66, 67, 71, 74, 81, 92]:

- tlumiče pro:
  - stavebnictví – např. seismický tlumič
  - osobní auta
  - sedadla nákladních aut
  - jemné měřicí přístroje – např. galvanometr
  - automatické pračky
  - krokové motory

- v biomedicině:
  - léčba kostní rakoviny – speciální enzymy surfaktantu se dokáží navázat na maligní buňky a ty mohou být pomocí magnetického pole poté odděleny
  - diagnostika – kontrastní látka pro magnetickou rezonanci
  - terapie – cílený transport léků
  - destrukce nádorové tkáně hypertermií – teplem vzniklým při působení vysokofrekvenčního magnetického pole na kapalinu
  
- a dále:
  - v optice – magnetické pole mění též optické vlastnosti magnetické kapaliny, což do budoucna slibuje další zajímavé aplikace – např. optické filtry a čočky
  - brzdy a spojky – tento princip nachází využití též při vývoji končetinových protéz
  - kapalinou chlazené reproduktory
  - detekce trhlin – např. v podmořských aplikacích
  - leštění povrchů
  - separace odpadních kovů
  - výkonové transformátory
  - hydraulické ventily
  - ložiska

Posledně jmenovaná ložiska jsou v kontextu magnetických ucpávek poměrně zajímavou aplikací. Jak podotýká [85], společně s vývojem technologií a materiálů vede příbuznost problematiky ložisek a ucpávek k jejich stále častější konstrukční integraci, která jednak zvyšuje kompaktnost, ale může mít i další pozitivní vlivy na vlastnosti zařízení.

Možné způsoby a výhody využití MFs v ložiskách představuje např. [72] (*Ochonski, 2005*); hlubším studiem problematiky se zabývají např. [83, 82, 105].

### 2.3 Hřídelové ucpávky s magnetickou kapalinou

Tato kapitola pojednává o specifické podskupině hřídelových ucpávek – tedy prvků, jejichž primární funkcí je utěsnění průsaků tekutiny při rotačním pohybu přilehlých součástí [85].

Relativní pohyb vůči okolí je obecný parametr, podle kterého lze těsnění dělit - a to na dynamická (přímočará – tj. pístní neboli plunžrová; rotační – tj. hřídelové ucpávky) a statická [86]. Zatímco přímočará a statická těsnění, jejichž typickými představiteli mohou být např. elastomerové O-kroužky [86], nemusí být předmětem našeho dalšího zájmu, v kontextu ucpávek s magnetickou kapalinou je namísto nejdříve alespoň stručně představit klasičtější způsoby řešení problému utěsnění rotujících částí.

### 2.3.1 Úvod – konvenční hřídelové ucpávky

Publikace [86] (*Flitney, 2007*) je důkladným úvodem do světa těsnění, progresivně se vyvíjejícího jak po stránce designu, tak využívaných materiálů:

Dynamická těsnění jsou neustále optimalizována za účelem minimalizace průsaku, tření i opotřebení, a zároveň čelí požadavkům na snižování ekonomických nákladů, zvyšování spolehlivosti, rozšiřování tolerančního rozpětí použití či co nejsnazší montáž. Měla by též být schopna vyrovnat se se změnou pracovních podmínek – skutečné stroje se zastavují a opět rozbíhají. Rozsah aplikací hřídelových ucpávek zahrnuje vybavení domácností, automobilový, letecký a energetický průmysl, průmyslová čerpadla, kompresory a mnoho dalšího.

Hřídelová těsnění lze rozdělit na poměrně mnoho druhů, nejčastějšími jsou [85, 86]:

- manžetové kroužky neboli gufera a jejich variace – např. V-kroužky
- alternativní elastomerová a plastová těsnění – např. tkaninová těsnění, těsnění s pozitivní lubrikací, ale také O-kroužky
- mechanická těsnění – např. těsnicí kroužky, pružinová těsnění, elastomerní a kovové měchy (vlnovce)
- měkké neboli provazcové ucpávky
- bezdotyková těsnění – např. labyrintová a odstředivá
- ucpávky s magnetickou kapalinou
- a další typy plus jejich nejrůznější kombinace.

Gufera jsou jedny z nejpoužívanějších těsnění. V určité úpravě je lze použít až do přetlaku 10 bar, jeho maximální hodnota je však obecně silně závislá na obvodové rychlosti hřídele. Principem funkce je udržování mechanického kontaktu mezi hlavním břitem a hřídelí, čímž vzniká fyzická bariéra mezi těsněným médiem a okolím - obr. 2.16. Jejich hlavním limitem je tedy vznikající tření a teplo, což je ovšem průvodní faktor veškerých kontaktních ucpávek.

Mechanické ucpávky těsní v rovině kolmé na osu hřídele - ve styku dvou rovinných ploch na čelech rotujícího a nehybného těsnicího kroužku. Principem je vytvoření mazacího hydrostatického a hydrodynamického filmu mezi styčnými plochami, který přenáší zatížení. Detailní informace o různých typech těchto ucpávek lze nalézt v katalogích výrobců, např. od firmy Grundfos zde [93].

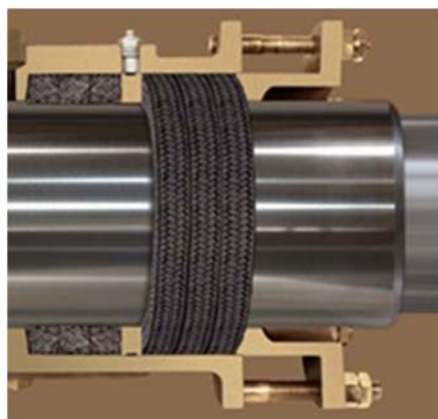
Snad nejčastějším řešením utěsnění hřídelů jsou ale provazcové ucpávky, jejichž koncept lze datovat až k počátkům průmyslové revoluce. Oproti mechanickým jsou sice prostorově náročnější, ale jsou také levnější a méně citlivé na nečistoty v kapalině i na průhyb hřídele. Pletené provazce (kroužky) s průřezem tvarovaným do hranata jsou s radiální vůlí uloženy kolem hřídele v ucpávkovém prostoru – obr. 2.15. Vzniká tak škrťací spára s často nezanedbatelným průsakem, který však zároveň může zajišťovat funkci mazání nebo chlazení ucpávky. Maximální tlaková únosnost se v závislosti na materiálech a konstrukci standardně pohybuje mezi 10÷30 bar, ve speciálním provedení však může dosáhnout až hodnoty 500 bar.

Další široce využívané řešení je pomocí bezdotykového těsnění, které ze svého principu sice nemůže těsněnému médiu vytvořit úplnou bariéru, vyznačuje se však nízkým třením a lze jej využívat i při vysokých otáčkách. Labyrintové těsnění je tvořené zuby a mezerami tak, aby mezi rotorem a státorem byla jen tenká štěrbin. Prosakující látka mění při průchodu touto štěrbinou směr a rychlost, víří se a ztrácí

energii, v každém stupni těsnění tak dochází k tlakovému poklesu. Odstředivá ucpávka zase využívá odstředivé zrychlení kapaliny od rotujícího disku s lopatkami, osazeného na těsněné hřídeli. Vzniklý prstenec odstředované látky vytváří tlak, který brání úniku média a správná funkce ucpávky je tedy závislá na otáčkách. Proto může být kombinována třeba s gufery, které zajistí utěsnění hřídele při zastavení stroje – viz např. [75].



Obr. 2.16 Těsnění hřídele pomocí gufera s prachovkou [x106]



Obr. 2.15 Uložení provazců v ucpávkovém prostoru [x107]

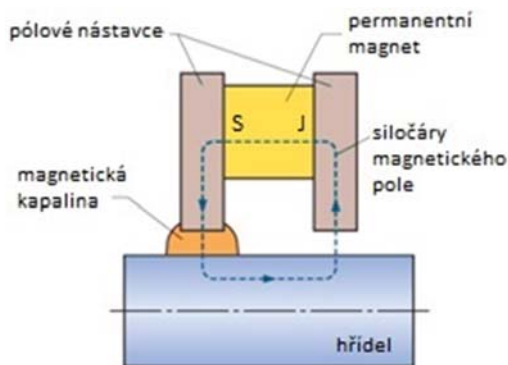
Poslední jmenované ucpávky s magnetickou kapalinou (alternativně též *ferohydrodynamická (FHD) těsnění* [56]) jsou dostupné od 70. let minulého století. Protože těsnicím médiem je kapalina, tření těchto ucpávek je obecně velmi nízké a k opotřebení tedy prakticky nedochází. I díky tomu jsou vysoce spolehlivé a mohou bez údržby běžet i více než 10 let. Také jsou schopné fungovat při relativně velké excentricitě a házení hřídele [97]. Další výhodou je poměrně jednoduchý design a snadná montáž [80]. Zajišťují v podstatě hermetické utěsnění nezávisle na tom, zda hřídel rotuje či stojí - díky tomu jejich stěžejní aplikací bylo a stále je těsnění plynů a vakuových technologií. Do nedávné doby převládal názor (a snad i skutečně platilo), že pro těsnění kapalných látek se kvůli kontaminaci ferokapaliny těsněnou látkou příliš nehodí (uvádí i [86]). Jak ale ukáže kapitola 2.3.6, popsaná situace se v posledních letech mění a dnes je už i těmto aplikacím věnována odpovídající vědecká pozornost.

### 2.3.2 Ucpávky s magnetickou kapalinou – princip a základní uspořádání

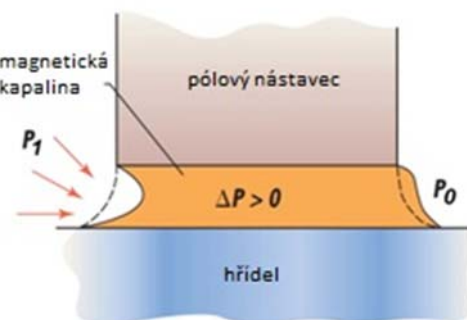
Základní informace poskytne např. [80] (*Ochonski, 2005*):

Jednoduchá FHD ucpávka v zásadě sestává z prstencového permanentního magnetu (nejčastěji axiálně polarizovaného; materiál standardně AlNiCo, eventuálně silnější NdFeB či SmCo), k jehož pólům přiléhají stacionární pólové nástavce z magneticky měkkého feromagnetika (např. nerezová ocel), dále z magnetické kapaliny samotné a těsněné hřídele. Ta musí být v obvyklé variantě uspořádání MFS (viz obr. 2.18a) vyrobena z magnetizovatelného materiálu. Tím vzniká uzavřený magnetický obvod, který udržuje magnetickou kapalinu v mezeře v podobě jakéhosi „kapalného těsnicího kroužku“ přilnutého k povrchům nástavců a hřídele. Při rotaci

dochází ke smýkání kapaliny, ta ale zůstává v mezeře držena magnetickou silou - vzniká dynamické těsnění. Šířka prstencové štěrbině bývá typicky od 0,05 do 0,125 mm, excentrický pohyb hřídele ale dokáže pojmout i ucpávka s mezerou až 0,25 mm.



Obr. 2.18a Schéma principu jedno-  
stupňového FHD těsnění [94, upraveno]



Obr. 2.17 Ilustrace vlivu tlakové  
diference na tvar magnetické kapaliny  
v mezeře [80, upraveno]

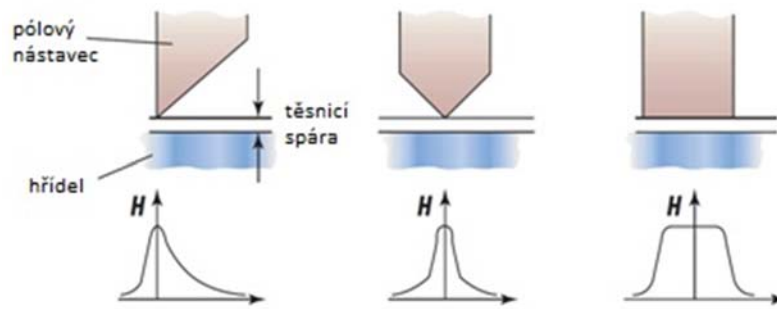
Obr. 2.17 ilustruje deformaci MF kroužku pod vlivem tlakového diferenciálu  $\Delta P = P_1 - P_0$ , kdy  $P_1 > P_0$ . Maximální hodnota tohoto diferenciálu, při které dochází k překonání magnetických sil a MF kroužek je protržen či zcela vytlačen ze štěrbině (dochází k rapidnímu průsaku a selhání těsnění), se označuje jako *kritický tlak* (angl. *burst pressure*). Představuje tedy *tlakovou únosnost (kapacitu)* jednoho elementu MF, kterou za podmínky, že je MF saturaovaná (její permeabilita přibližně odpovídá vzduchu:  $\mu_r \approx 1$  a magnetické pole tedy v podstatě není ovlivněno její přítomností), lze vyjádřit [84]:

$$\Delta p = \mu_0 M_S (H_1 - H_0) \quad (2-20)$$

kde  $M_S$  je saturační magnetizace a  $H_1$ , resp.  $H_0$  je *intenzita magnetického pole*<sup>29</sup> na rozhraní MF a vnějšího okolí na straně vyššího, resp. nižšího tlaku. Tato rovnice platí za předpokladu zanedbání vlivu gravitační a odstředivé síly.

Rozložení magnetického pole v mezeře je silně ovlivňováno tvarem pólových nástavců – obr. 2.19. Nejčastěji pomocí jejich zkosení tak lze přesně dosáhnout i požadovaného rozložení magnetické kapaliny. Nejsilnější pole se nachází právě pod takto vzniklým vrcholem.

<sup>29</sup> Rovnici lze alternativně vyjádřit i za pomoci indukci na rozhraních jako  $\Delta p = M_S (B_1 - B_0)$ .

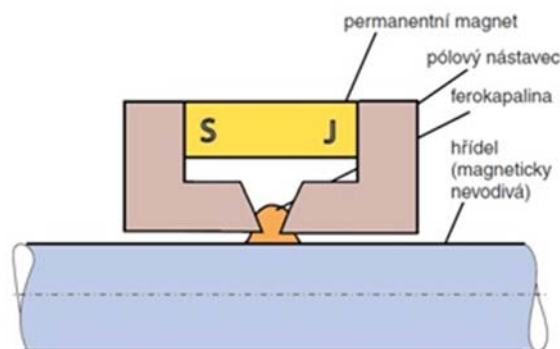


Obr. 2.19 Vliv tvaru pólových nástavců na rozložení magnetického pole v mezeře. [80, upraveno]

Jak dále doplňují [56, 80, 86]:

- V případě magneticky nevodivé hřídele bývá pro uzavření magnetického obvodu tato rozšířena o kroužek z materiálu magneticky vodivého<sup>30</sup>. Naopak, abychom zabránili uzavření obvodu přes nežádoucí magneticky vodivé části (často např. stěny skříně, kde je těsnění uloženo), musíme zde vložit nemagnetický materiál.
- Protože těsnicí médium je kapalina, tření i opotřebení MFS je obvykle zanedbatelné.
- MFS díky minimálnímu vnitřnímu tření způsobuje jen malé energetické ztráty a dovoluje dosáhnout otáček i více než 10 000/min.
- Viskózní odpor nezávisí na tlakovém diferenciálu působícím na těsnění, chod ucpávky je tedy extrémně hladký i při fluktuujícím tlaku.
- Vypařování nosné kapaliny ovlivňuje stabilitu těsnění. MFS je omezeno průměrem hřídele  $D$  a hodnotou otáček  $N$ , respektive parametrem jejich součinu  $DN$  (kde  $D$  [mm],  $N$  [ot/min]). Běžné ucpávky dosahují hodnoty  $DN$  až 200 000. Bylo ale zaznamenáno až  $DN = 500\,000$  - při vysokých obvodových rychlostech (cca nad 10m/s) je však nutné MF chladit, aby se vysokou teplotou nezkracovala její životnost.

<sup>30</sup> Alternativně lze též modifikovat konstrukci ucpávky do podoby jako na obr. 2.18b, kde se magnetický obvod uzavírá mimo hřídel.



Obr. 2.18b Schéma alternativního uspořádání jednostupňové MF ucpávky se zkosnými pólovými nástavci. [56, upraveno]



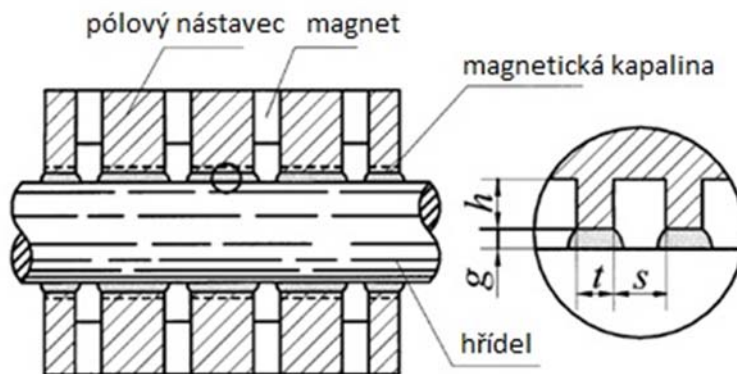
- MFS lze použít i v prašném, chemicky agresivním či radioaktivním prostředí.

### 2.3.3 Hlubší analýza jedno- a vícestupňové FHD ucpávky – optimální parametry

2.3.3

Většina převážně vysokotlakých aplikací používá sofistikovanější verzi ucpávky v podobě vícestupňového těsnění. Z jedностupňového případu na obr. 2.18a vznikne dvoustupňové těsnění, pokud umístíme magnetickou kapalinu i do mezery pod druhý pólový nástavec. Další stupně lze však získat i v rámci jednoho pólového nástavce, pokud na něm vytvoříme drážky – zuby a mezery – obr. 2.20. Každý stupeň nese tlakový diferenciál úměrný intenzitě magnetického pole v jeho mezeře a hodnotě saturace magnetizace ferokapaliny dle rovnice (2-20), typicky je to 10÷25 kPa; součet individuálních únosností jednotlivých stupňů přibližně odpovídá celkové kapacitě ucpávky [80]<sup>31</sup>. Ta je však v inženýrské praxi dle [96] často nižší – příčinou je nerovnoměrné rozložení magnetické kapaliny v jednotlivých stupních. Projevuje se častěji v ucpávkách s vysokým počtem stupňů, které jsou velmi blízko u sebe. Mechanismus jeho vzniku může být trojí:

- přenesení části MF z jednoho stupně do jiného při montáži ucpávky na hřídel
- „přeskočení“ MF při působení vysoké tlakové difference, když se část objemu deformovaného těsnicího kroužku dostane do sféry silnějšího vlivu magnetického pole vedlejšího stupně
- stržení části MF s prosakující těsněnou látkou při překonání kapacity jednoho stupně do stupně následujícího



Obr. 2.20 Schéma vícepólové vícestupňové FHD ucpávky [99, upraveno]

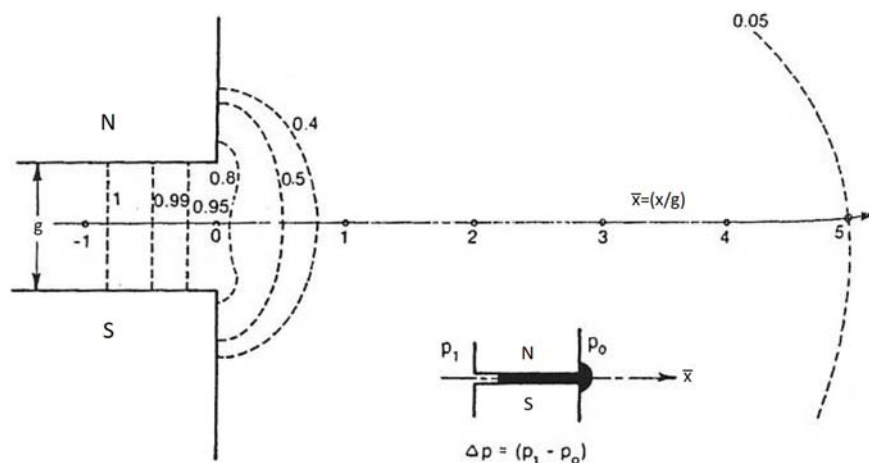
Analýzu kvantitativních vztahů mezi parametry magnetického obvodu, vlastnostmi magnetické kapaliny a výslednou kapacitou jedno- i vícestupňového FHD těsnění provedli v [84] (Walowit, Pinkus, 1981). Její výsledky by měly být platné jak pro statické, tak dynamické podmínky. Na odvození vztahu (2-20)

<sup>31</sup> Studie vlivu tvaru stupně na tlakovou kapacitu byla provedena např. v [112].

v meridiálním řezu ucpávkou ukazují, že křivky konstantní intenzity magnetického pole s dobrou přesností reprezentují také křivky konstantního tlaku, a zároveň tak jsou i křivkami potenciálního rozhraní kapaliny. Stejný závěr je s velkou přesností platný také pro křivky magnetické síly.

Z analýzy teoretického případu jednostupňového těsnění dle obr. 2.21 především vyplývá, že: tlakové pole uvnitř mezery je přibližně konstantní; 50% maximální hodnoty tlakové kapacity  $\Delta p$  se dosáhne ve vzdálenosti  $\bar{x}$ , která odpovídá polovině šířky mezery  $g$ ; 95% maximální hodnoty  $\Delta p$  pak ve vzdálenosti  $\bar{x} = 5g$  (teoreticky plné kapacity by se dosáhlo až pro případ  $\bar{x} \rightarrow \infty$ ).

Z analýzy vícestupňového těsnění byly získány poměry optimální geometrické konfigurace, které odpovídá maximální tlaková únosnost  $\Delta p$  vzhledem k dané osové délce ucpávky  $L$ , resp. jednoho jejího pólového nástavce. S rostoucím počtem stupňů  $N$  roste celková kapacita  $\Delta p$  ucpávky, proto je žádoucí mít co nejmenší vzdálenost  $s$  mezi zuby o tloušťce  $t$ . Avšak zmenšování rozestupů vede k interferencím magnetických polí jednotlivých stupňů, které nežádoucím způsobem naopak snižují jejich individuální maximální  $\Delta p$ . Walowit a Pinkus analyticky odvozují optimální geometrické poměry jako:  $t \approx 2g$  a  $s \approx 3g$ .



Obr. 2.21 Element magnetické kapaliny mezi opačnými póly dvou magnetů teoretického jednostupňového těsnění [84, upraveno]

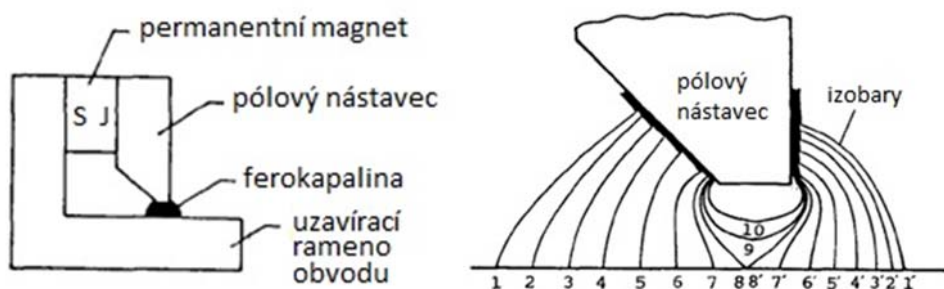
Optimální rozsah parametrů FHD těsnění odvodili také v [100] (Zou, Lu, 1992). Na základě numerického řešení a experimentu uvádějí oproti [84] mírně odlišné intervaly poměrů hodnot šířek zubů  $t$ , rozestupů mezi nimi  $s$  a výšek zubů  $h$ .<sup>32</sup> Poznatky o návrhových principech MF ucpávek pak ještě dále rozšiřují:

Provedli numerické a experimentální vyhodnocení izobar a tvarů průřezu těsnícího MF kroužku ve stacionárním případě experimentálního těsnění z obr. 2.22 vlevo. S ohledem na komplexnost problematiky přesného výpočtu rozložení

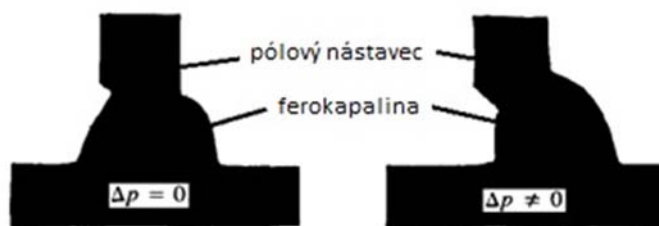
<sup>32</sup>  $t = (4 \div 8)g$ ,  $s \approx (1,5 \div 3)t$  a  $h \geq 1,5t$ . Poměry však byly odvozeny za předpokladu vyššího počtu stupňů těsnění ( $N=15 \div 40$ ) a konkrétních rozměrů permanentního magnetu – viz [99, 100]. Obdobně též v [x122] na základě numerického řešení odvodili tentokrát pro nízký počet stupňů ( $N=4$ ) vztahy:  $t = (5 \div 7)g$ ,  $s \approx (10 \div 25)g$  a  $h = (5 \div 15)g$ .



ferokapaliny v magnetickém poli navrhuji pro numerické řešení využít metodu konečných prvků pro axisymetrickou úlohu (2D řešení). Na základě simulace rozložení magnetického pole pak lze dopočítat i tlakovou kapacitu ucpávky. Výsledné průběhy izobar ferokapaliny zobrazuje obr. 2.22 *vpravo*. Křivky odpovídají liniím konstantní intenzity magnetického pole. Zároveň i rozhraní odpovídajícího množství kapaliny musí svým tvarem kopírovat tyto křivky, a to při  $\Delta p = 0$  i  $\Delta p \neq 0$ , jak ukazuje obr. 2.23.



Obr. 2.22 Experimentální statické těsnění (*vlevo*); izobary z numerického řešení, kde křivkám s rostoucím označením 1-1', 2-2', ..., 8-8', 9, 10 zároveň přísluší rostoucí hodnoty konstantního tlaku (*vpravo*) [100, upraveno]



Obr. 2.23 Zachycení tvaru MF kroužku na základě fotodokumentace experimentu se statickým těsněním [100, upraveno]

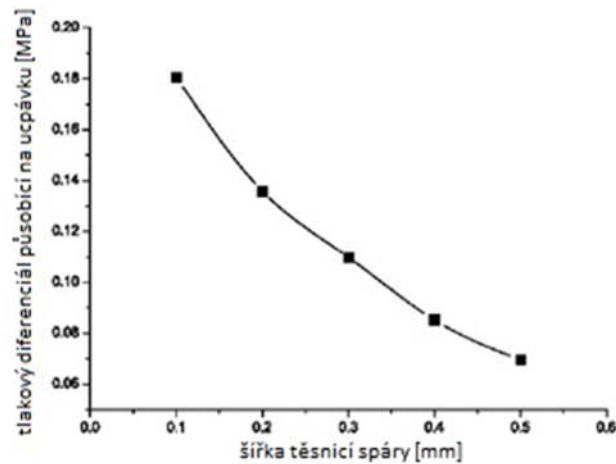
V neposlední řadě také formulovali vliv odstředivé síly na tlakovou kapacitu při vysokých obvodových rychlostech. Odstředivá síla odsune část kapaliny ve směru podél nástavce, což se projeví snížením kapacity. Řešením může být vyplnění okolí nástavce nemagnetickým materiálem, který zamezí radiálnímu pohybu ferokapaliny. Pro tento případ odvodili vztah za obvyklé podmínky  $M=M_s$  (saturovaná kapalina):

$$\Delta p = M_s(B_2 - B_1) + \varphi(r_2) - \varphi(r_1) \quad (2-21)$$

kde  $B_2$ , resp.  $B_1$  je hodnota magnetické indukce na rozhraní MF a vnějšího okolí na straně vyššího, resp. nižšího tlaku a  $\varphi(r_2)$ ,  $\varphi(r_1)$  jsou funkcemi průměru a otáček hřídele a tvaru pólového nástavce (kompletní výrazy uvedeny v [100]).

Vznik odstředivé síly, vedoucí ke snížení kapacity těsnění, jmenuje spolu se zahříváním ferokapaliny jako negativní důsledek vysokých obvodových rychlostí také [x80]. Dodává ale, že tyto problémy se větší částí aplikací MF ucpávek netýkají, protože obvykle pracují s relativně nízkými obvodovými rychlostmi do 10 m/s, kdy je možné vliv odstředivé síly zanedbat – viz též [114].

Výrazný pokles tlakové kapacity ucpávky při zvětšování velikosti těsnicí spáry g zaznamenalo mnoho autorů [41, 101, 103, 107, 108, 115] - viz obr. 2.24.

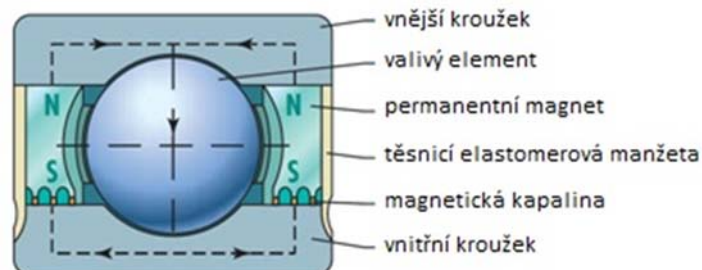


Obr. 2.24 Závislost kapacity ucpávky na velikosti těsnicí štěrbině [101, upraveno]

Doplňující poznatky o možnostech navýšení kapacity ucpávky s méně obvyklou „ironless“ konstrukcí (tzn. s nemagnetickou hřídelí a bez použití pólových nástavců - magnetický obvod se uzavírá přímo přes sousední radiálně polarizované prstencové magnety) přináší na základě analytického řešení magnetického pole článek [109]. Využití naleznou při konstrukci „ironless“ reproduktorů i FHD ložisek.

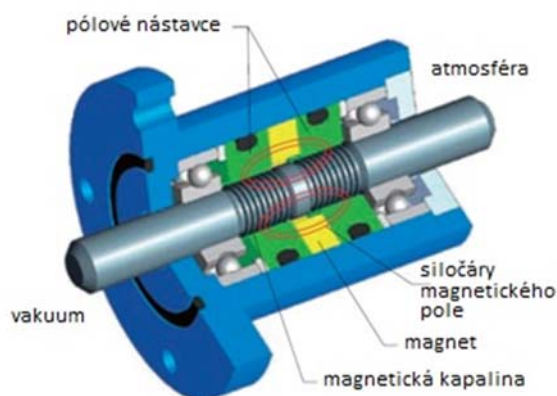
#### 2.3.4 Klasické aplikace a různé konstrukční varianty FHD ucpávek

Použití FHD těsnění je velmi mnohostranné: osvědčily se např. u pohonů pevných disků, u vakuových čerpadel, v leteckých a astronomických přístrojích, u manipulátorů a robotů pracujících s toxickým či biologicky aktivním materiálem [56]. Lze je též integrovat přímo do valivých ložisek (obr. 2.25), anebo mohou chránit ložiska například dopravníkových pásů, dokonce být použita i jako statická těsnění - zajišťující pevné spojení bez průsaku, či mohou po mnoho let bez problémů sloužit pro ochranu před únikem a zároveň i vnější kontaminací těsněného plynného média v průmyslových větrácích a ventilátorech [79, 80]. Obr. 2.26 znázorňuje podobu komerčně vyráběné FHD ucpávky, jakožto kompletního montážního celku včetně ložisek, určeného pro vakuovou techniku.



Obr. 2.25 Valivé ložisko s integrovanou FHD ucpávkou [80, upraveno]

FHD ucpávky lze použít též ve spojení s dalšími typy těsnění: [76] vysvětluje princip kombinace mechanické a FHD ucpávky. Toto *tandemové těsnění* spojuje výhody obou: relativně vysokou tlakovou kapacitu zároveň při dlouhodobém pracovním nasazení bez jakéhokoliv průsaku. Tento koncept lze použít pro vakuovou techniku, ale i pro vertikální čerpadlo na zkapalněný plyn. Z obavy před míšením kapalného plynu s magnetickou kapalinou a následným snižováním těsnosti systému hlavní část tlakové diference (až 25 bar) stále zpracovává primární mechanické těsnění. To je v přímém kontaktu se zkapalněným plynem, zatímco sekundárnímu FHD těsnění je ještě předřazen odsávací systém. Tlak na něj je tedy minimalizován (na max. 3 bar) a absolutní těsnost je spolehlivě zajištěna.



Obr. 2.26 Montážní celek vícestupňového FHD těsnění pro vakuum [94, upraveno]

Obr. 2.27 představuje sérii vybraných konceptů řešení ochrany valivých ložisek pomocí FHD ucpávek s inovativní konstrukcí dle článku [79], ilustrující variabilitu jejich možné podoby:

Těsnění *A* je specifické uspořádáním se dvěma axiálně polarizovanými magnety, z nichž jeden rotuje společně s hřídelí a druhý je pevně spojen se statorem. Magnety jsou uchyceny v protilehlých tvarovaných objímkách, které jsou zároveň i pólovými nástavci, přes které se uzavírá magnetický obvod. Alternativním řešením bez nutnosti použití samostatného magnetu je případ, kdy jsou samotné pólové nástavce polarizované, a to vždy opačně v rámci jedné dvojice.

Případ *B* je vícestupňové těsnění, u kterého se magnetický obvod uzavírá přes ložisko. Využívá k tomu radiálně polarizovaných magnetů (jeden rotuje, druhý je nehybný).

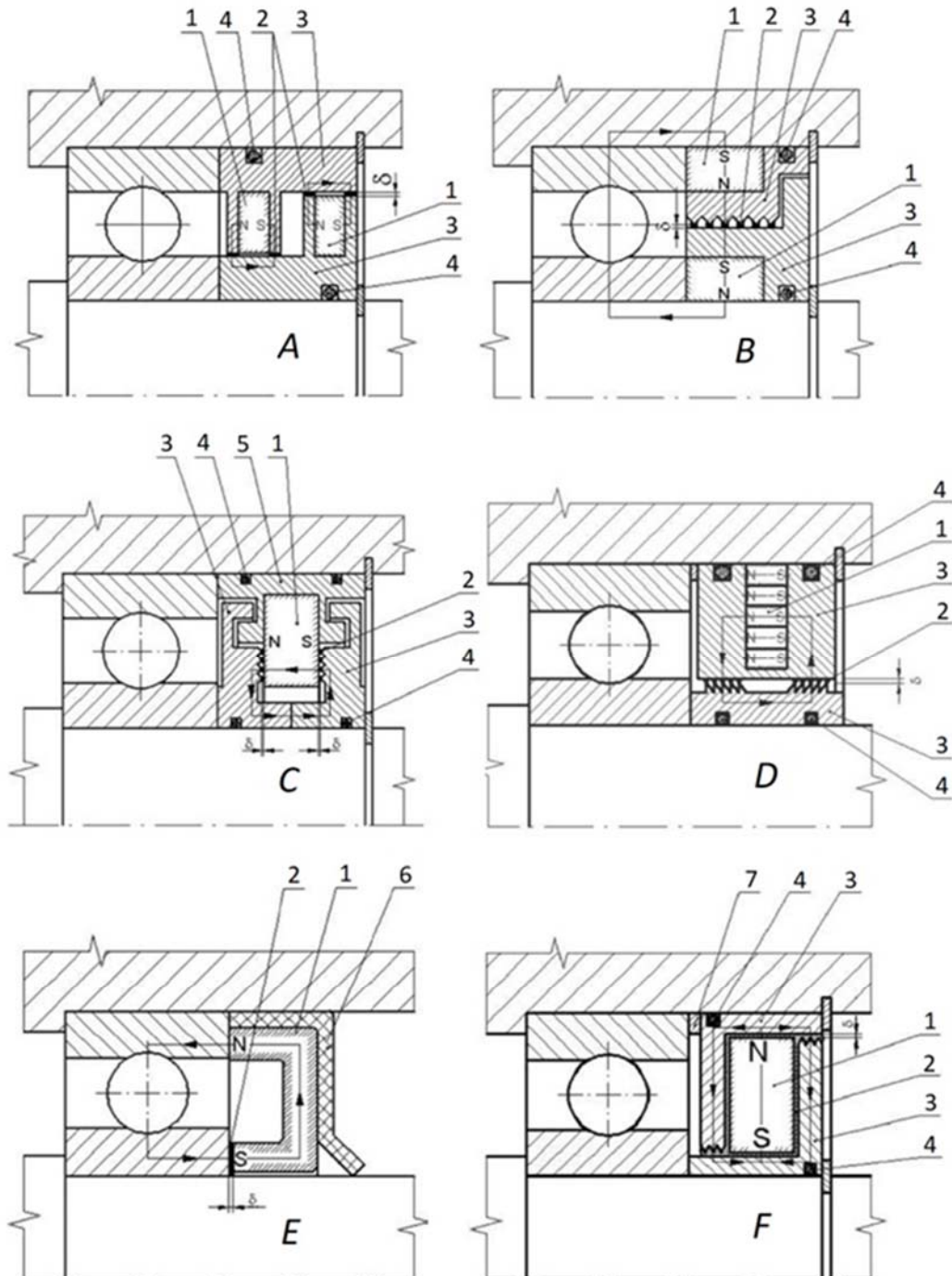
Případ *C* je kombinací vícestupňového FHD a axiálního labyrintového těsnění. Statický magnet je polarizován axiálně.

Na případu vícestupňového těsnění *D* je zase zajímavě vyřešen zdroj magnetického pole pomocí mnoha malých diskových axiálně polarizovaných magnetů.

Těsnění *E* je de facto dvoustupňová ucpávka, kde první stupeň tvoří konvenční manžetová ucpávka a druhý stupeň těsnění zajišťuje magnetická kapalina. Magnetický obvod permanentního magnetu s průřezem tvaru C se opět uzavírá skrze ložisko. Jedná se o jednu s mnoha možností kombinací FHD a konvenčních ucpávek, zvyšujících efektivnost těsnění spojením výhod obou přístupů.

Poslední případ *F* využívá „plovoucí“ magnetický systém: radiálně polarizovaný magnet je volně uložen mezi dvěma pólovými nástavci s průřezy tvaru L a mezeru mezi nimi vyplňuje ferokapalina. Vznikají tak dva těsnící stupně ve dvou uzavřených magnetických obvodech s jediným zdrojem magnetického pole.

Pro zajištění těsného spojení rotující, resp. statické části FHD ucpávky s hřídelí, resp. se skříní lze využít statická těsnění (běžné O-kroužky).



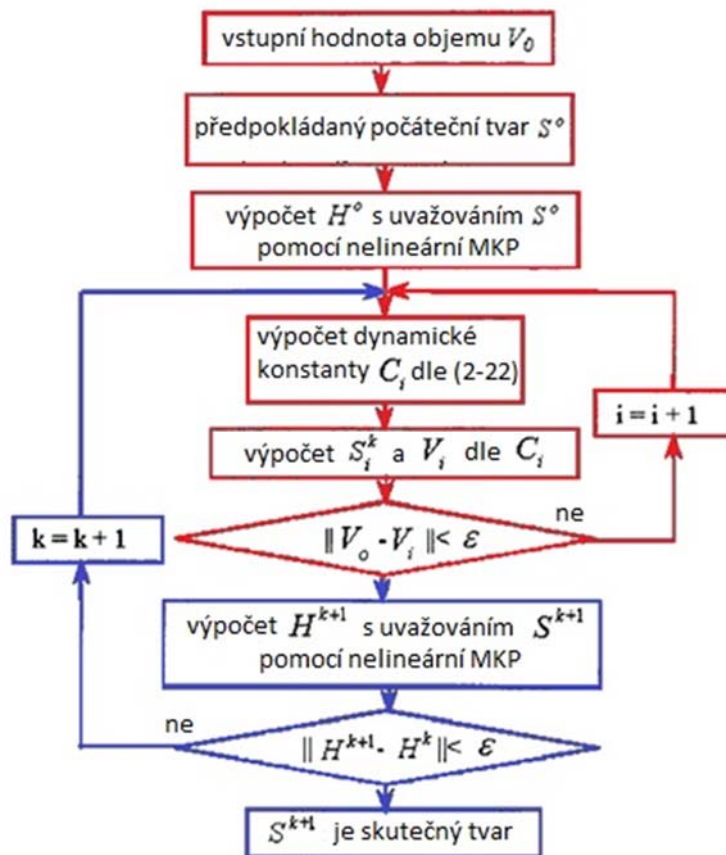
**Obr. 2.27** Různé varianty konstrukčního uspořádání FHD ucpávek: 1 – permanentní magnet, 2 – magnetická kapalina, 3 – pólový nástavec, 4 – O-kroužek, 5 – stacionární objímka, 6 – manžetové těsnění, 7 – distanční kroužek,  $\delta$  – šířka těsnící MF spáry. [79, upraveno]

### 2.3.5 Využití numerických simulací při řešení problematiky FHD ucpávek

S vývojem výpočetní techniky se ohromným způsobem rozšiřují možnosti výzkumu působení vnějších sil na magnetickou kapalinu a současně uvnitř probíhajících dějů. V posledních letech tak lze zaznamenat nárůst počtu prací, které berou v potaz dříve přecházené či neobjasněné souvislosti např. sekundárního proudění, termomagnetické konvekce a dalších fenoménů, které mají vliv na charakteristiku ucpávky. Následuje několik příkladů:

#### Determination of the Curvature of the Magnetic Fluid Under the External Forces (Park, Park, 2002)

Autoři v článku [104] navrhují obecnou metodu ( $M \neq M_S$ ) k určení tvaru magnetické kapaliny pod vlivem externích sil, založenou na myšlence, že dynamická konstanta má za podmínky rovnovážného stavu na povrchu volného rozhraní kapaliny na ní stejnou hodnotu. Z mnoha možných tvarů řešení pro tuto hodnotou je konkrétní výsledná křivka určena podmínkou zvoleného objemu fero kapaliny. Postup řešení přitom vychází z dříve uvedených poznatků o provázanosti vzájemného vlivu tvaru kapaliny a rozložení magnetického pole. Uvedený algoritmus de facto simultánně numericky řeší Navier-Stokesovu rovnici (popisující mechanickou energii kapaliny) a Maxwellovu rovnici energie magnetického pole s pomocí MKP – viz schéma na obr. 2.28.



Obr. 2.28 Algoritmus numerického řešení tvaru povrchu magnetické kapaliny pod vlivem externích sil [104, upraveno]

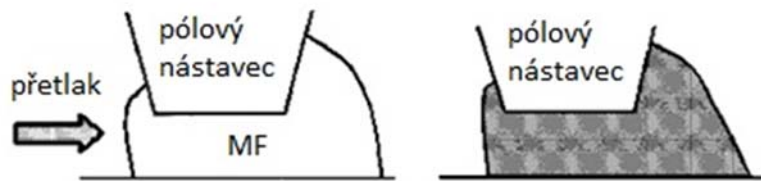


Dynamická konstanta  $C$  je za předpokladu neviskózní nestlačitelné homogenní kapaliny odvozena jako:

$$C = P_0 - 2 \int M dH + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h - \frac{1}{2\mu_0} M_n^2 \quad (2-22)$$

kde členy pravé strany mají zleva význam: působící tlakové difference, energie magnetického pole, energie hybnosti, gravitační energie a energie povrchového napětí.

Na příkladu FHD ucpávky pak autoři demonstrují změny tvaru hranice kapaliny při působení různých vnějších vlivů: nízké a vysoké hodnoty otáček hřídele a různé tlakové difference. Obr. 2.29 dokládá dobrou shodu mezi výsledkem získaným navrženou metodou a experimentem pro statický případ těsnění.



Obr. 2.29 tvaru MF ve statickém FHD těsnění na základě: výpočtu (vlevo), experimentu (vpravo) [104, upraveno]

*Modeling of a Dynamic Magneto-Fluid Seal in the Presence of a Pressure Drop (Polevikov, Tobiska, 2001)*

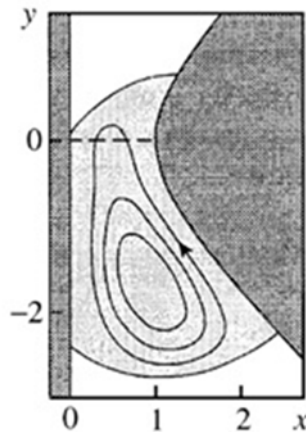
Problém stability FHD těsnění s volným povrchem magnetické kapaliny řeší v [110]. Dle autorů byla deformace ferokapaliny pod vlivem vnějších sil v dřívějších studiích buď zanedbávána (tvar rozhraní byl považován za konstantní), anebo byl uvažován pouze zjednodušený případ bez tlakové difference či při nulových otáčkách. Jejich komplexnější přístup předpokládá axiální symetrii pole magnetického i hydrodynamického (nepřipouští excentricitu). Vzhledem k malému poměru tloušťky těsnicí spáry vůči poloměru hřídele lze problém řešit jako rovinný (v kartézských souřadnicích); otáčky hřídele jsou do modelu zahrnuty prostřednictvím odstředivé síly. Autoři dále studují rozložení proudu uvnitř ferokapaliny a proces uvolňování tepelné energie.

V první části algoritmu hledají tvar volného rozhraní kapaliny – tato část je v zásadě shodná s první (červeně zvýrazněnou) smyčkou schématu na obr. 2.28. Za předpokladu silného magnetického pole lze považovat ferokapalinu za magneticky saturovanou ( $M = M_S$ ); na rozdíl od obecného případu (kdy  $M \neq M_S$  a algoritmus tedy pokračuje modrou částí) ferokapalina svou přítomností nijak neovlivňuje magnetické pole. Jeho analytické řešení je přitom pro hyperbolický tvar použitého pólového nástavce známé.

V druhé části za pomoci MKP nalézají rozložení úhlové rychlosti uvnitř ferokapaliny a následně řeší problém sekundárního proudění v meridiální rovině - obr. 2.30. Docházejí k závěru, že jeho zpětný vliv na rychlostní pole úhlové rychlosti lze s dobrou přesností zanedbat v případě menších hřídelí s nižšími otáčkami. Zkoumají také změny jeho charakteru při úpravě provozních parametrů ucpávky. Tak bylo zjištěno, že intenzita konvektivního pohybu narůstá společně

s otáčkami, ale i s rostoucí hodnotou tlakového diferenciálu.

Z dalších výstupů jen doplníme, že ke ztrátě stability (selhání těsnění) dochází ve chvíli, kdy se objem ferokapaliny zdeformuje působením vnějšího tlaku natolik, že bod kontaktu rozhraní kapaliny a hřídele se nachází v místě nejvyšší intenzity magnetického pole – odpovídá linii  $y=0$  dle obr. 2.30. Za tímto místem už magnetické síly nejsou schopné vyrovnat působení tlaku.



**Obr. 2.30** Sekundární proudění ferokapaliny v FHD ucpávce při nenulových otáčkách a tlakovém diferenciálu [110, upraveno]

*Numerical Simulation of the Flow in Magnetic Fluid Rotary Shaft Seals (Mítkova, Tobiska, 2004)*

Na předchozí studii navazují autoři práce [106]. Detailněji se zde zaměřují na řešení hydrodynamické části problému ve fixní doméně  $\Omega$  (meridiálním řezu kroužkem FM kapaliny), a to především s ohledem na co nejlepší efektivitu řešení diskretizovaných rovnic pomocí MKP, při použití vlastní „decoupling“ strategie (přístupu k řešení provázaných rovnic). Tvar rozhraní nalézají v zásadě stejným způsobem jako předchozí autoři, s předpokladem  $M = M_S$ . Na redukováném modelu (2D úloha v kartézském s. s., ustálené provozní podmínky, bez uvažování vnějšího tlakového diferenciálu) řeší problém rozložení úhlové rychlosti  $\omega$ , sekundárního proudění  $\mathbf{u}=(u_1, u_2)$  a tlaku  $p$  po průřezu  $\Omega$ :

$$-\frac{1}{Re} \Delta \omega + \mathbf{u} \cdot \nabla \omega = 0 \quad (2-23)$$

$$-\frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla p = \delta \omega^2 \mathbf{e}_x \quad (2-24)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2-25)$$

kde  $Re$  je Reynoldsovo číslo,  $\delta = g/R \ll 1$  je relativní šířka štěrbiny a  $\mathbf{e}_x$  je jednotkový vektor ve směru  $x$ . Okrajové podmínky na dvou površích volného rozhraní  $\Gamma_F$  (na obr. 2.31a červeně), pólovém nástavci  $\Gamma_C$  (zeleně) a hřídeli  $\Gamma_S$  (modře) jsou definovány jako:

$$\mathbf{u} = 0 \quad \text{na } \Gamma_C \cup \Gamma_S \quad (2-26)$$

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{na } \Gamma_F \quad (2-27)$$

$$\mathbf{n} \cdot \sigma(\mathbf{u}, p)_{ij} \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad \text{na } \Gamma_F, i, j = 1, 2 \quad (2-28)$$

$$\omega = 0 \quad \text{na } \Gamma_C \quad (2-29)$$

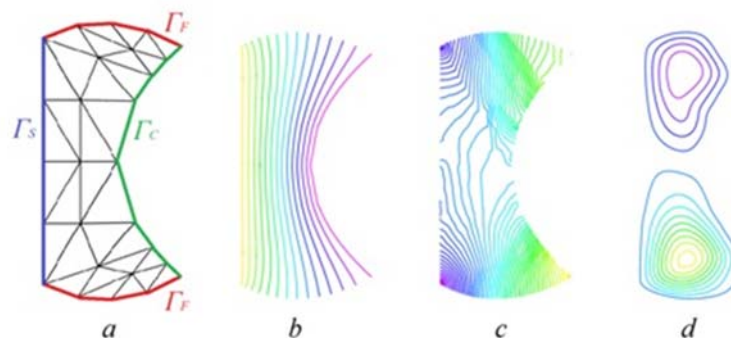
$$\omega = 1 \quad \text{na } \Gamma_S \quad (2-30)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad \text{na } \Gamma_F \quad (2-31)$$

kde  $\mathbf{n}$  a  $\boldsymbol{\tau}$  je jednotkový normálový, resp. tečný vektor; hydrodynamická část tenzoru napětí je definována jako:

$$\sigma(\mathbf{u}, p)_{ij} = \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - p \delta_{ij}, i, j = 1, 2 \quad (2-32)$$

Vlastní algoritmus řešení je podrobně popsán v samotném článku, zde jen poznamenejme, že na rozdíl od Polevikova postupu [110] autoři berou v potaz i člen  $\mathbf{u} \cdot \nabla \omega$  v rovnici (2-23), vyjadřující zpětný vliv sekundárního proudu na úhlovou rychlost, který Polevikov zanedbává na základě úvahy, že  $\omega \gg \mathbf{u}$ . K iterativnímu řešení soustavy algebraických rovnic na diskretní triangulační síti o různých jemnostech dále používají multigradní metodu. Některé výsledky jejich simulací ilustruje obr. 2.31.



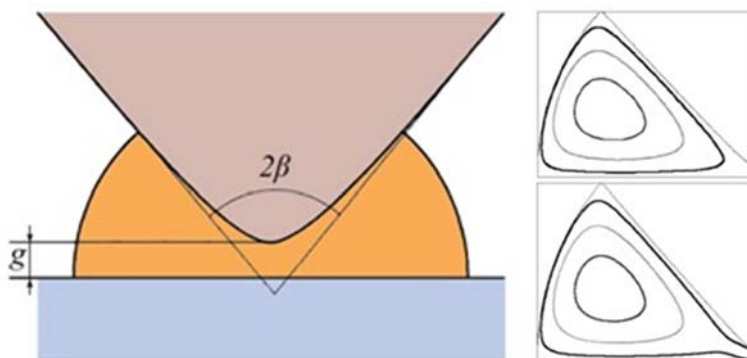
Obr. 2.31 Numerické řešení hydrodynamické úlohy na doméně  $\Omega$ : diskretizace problému na 2. úrovni jemnosti sítě (a); izolinie obvodové rychlosti (b), tlaku (c) a proudové funkce (d) po dvou iteracích pro 6. úroveň jemnosti sítě [106, upraveno]

Spolupráce skupiny autorů kolem Mitkové a Tobisky pokračuje, v další publikaci [111] navrhnou klasifikaci ferohydrodynamických problémů v závislosti na povaze interakcí *magnetického pole – volného rozhraní ferokapaliny a vnitřního proudění – volného povrchu ferokapaliny*. Problematiku modelování FHD ucpávek rozšiřují právě snahou o zachycení vlivu proudění uvnitř těsnícího kroužku na tvar jeho volného rozhraní ( $\Omega$  není fixní). Další pozornost však přesouvají k obecnějším problémům, např. numerickému modelování rovnováhy volné kapky ferokapaliny v externím magnetickém poli.



*Influence of the Meridional Flow and Thermomagnetic Convection on Characteristics of Magnetic Fluid Seal (Krakov, Nikiforov, 2011)*

Studie [112] odhaluje významný vliv termomagnetické konvekce na charakter sekundárního proudění a koncentraci částic. Z numerického řešení ucpávky o konfiguraci dle obr. 2.32 (s hyperbolickým průřezem nástavce) plynou tyto hlavní závěry:



**Obr. 2.32** Geometrické uspořádání řešeného problému (vlevo): šířka těsnicí spáry  $g$ , vrcholový úhel  $2\beta$ ; znázornění sekundárního proudění: bez zahrnutí termomagnetické konvekce (vpravo nahore), se zahrnutím termomagnetické konvekce (vpravo dole) [112, upraveno]

- I velmi malé otáčky hřídele zajistí prostřednictvím sekundárního proudění rovnoměrné rozložení feročástic v magnetické kapalině (zabrání rozvrstvování ferokapaliny), což vede k prodloužení životnosti.
- V případě vysokých otáček se vlivem viskozity ferokapalina v mezeře  $g$  pod vrcholem nástavce intenzivně zahřívá, avšak při zahrnutí vlivu termomagnetické konvekce dochází ke změně charakteru sekundárního proudění (obr. 2.32 vpravo). Proud proráží do nejužší oblasti pod vrcholem, odvádí odsud teplo a způsobuje relativně rovnoměrné rozložení teploty v celé ferokapalině, čímž opět prodlužuje životnost.

Sekundární proudění v meridiální rovině je tedy způsobeno dvěma zdroji: rotací hřídele a termomagnetickou konvekcí. Vliv konvekce se přitom zesiluje s rostoucími otáčkami a viskozitou použité ferokapaliny. Druhý bod závěru je zároveň argumentem pro použití FHD ucpávek i při vysokých obvodových rychlostech.

V případě stojících hřídelí může v místě silného magnetického pole docházet k nárůstu koncentrace feročástic, kterému nemohou bránit sekundární efekty meridiálního proudění. To může vést až k solidifikaci MF ve šterbině ucpávky - ztrátě kapalnosti, která brání opětovnému rozběhu otáček. Možnostmi využití ohřevu takových hřídelí za účelem vytvoření intenzivní termomagnetické konvekce homogemizující ferokapalinu se autoři zabývají dále v [117].

Z nejnovějších studií meridiálního proudění v FHD ucpávce jmenujme ještě [113] (Liu, 2016), zkoumající jeho podobu ve stavu kritické tlakové diference (hranice MF je zatlačena do místa maximální intenzity magnetického pole – viz [110]) a při úpravách geometrie pólového nástavce, v jejichž důsledku se mění i tvar těsnicího kroužku ferokapaliny. Hlavním poznatkem je, že sekundární proudění je nejvíce citlivé právě na tento tvar: s ostřejším vrcholovým úhlem nástavce  $2\beta$  (obr.

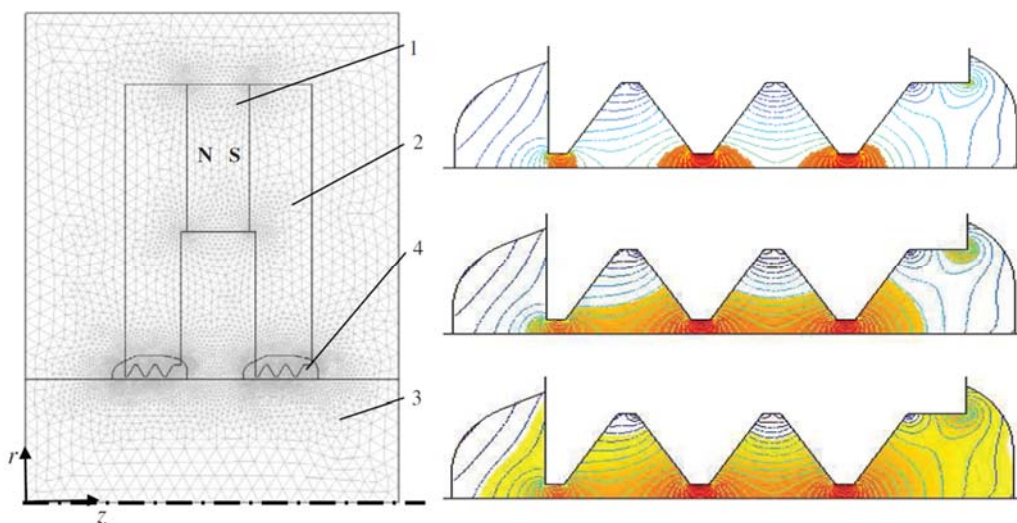
2.32) se zesiluje, s rostoucí mezerou  $g$  lehce klesá. Negativním důsledkem zmenšování úhlu  $\beta$  je ale pokles kritického tlaku.

Výše jmenované práce zhusta přinášejí zcela nové pohledy do principů vnitřního fungování FHD ucpávek. Sloučení těchto poznatků a komplexní vyhodnocení významnosti vlivu jednotlivých faktorů, které by vedlo k vytvoření jakéhosi jednoznačného postupu využitelného při praktickém návrhu pro konkrétní podmínky, zatím nebylo provedeno. V budoucnu jej snad lze očekávat. S ohledem na intenzivní rozvoj a atraktivnost inovativních aplikací magnetických kapalin by to bylo velmi užitečné.

Zahrnout všechny tyto poznatky do vývoje vlastní ucpávky by byl v současnosti extrémně náročný úkol. Při nevyhnutelné volbě jednoduššího způsobu je snad možné odkazovat se na poněkud praktičtější postupy některých autorů:

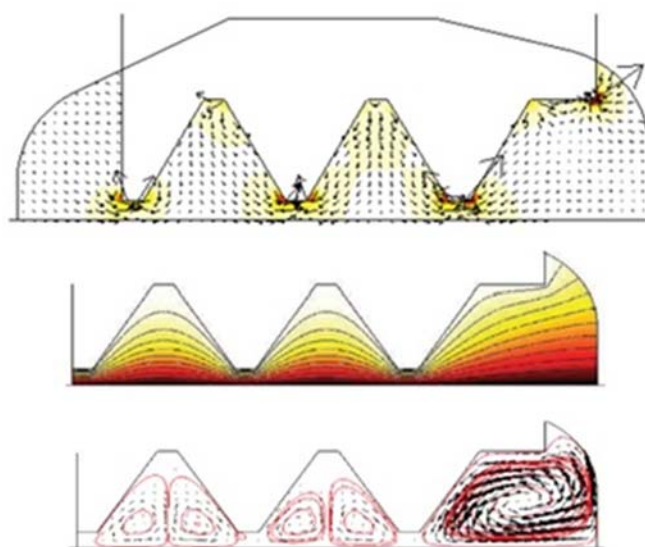
*Finite-Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic-Fluid in the Core of Magnetic-Fluid Seal for Rotational Shaft*  
(Radionov, Podoltsev, Zahorulko, 2012)

Autoři článku [60] nejdříve za předpokladu saturace ferokapaliny řeší rozložení magnetického pole v ucpávce průmyslového ventilátoru dle obr. 2.33 *vlevo*. Distribuci magnetické indukce v doméně ferokapaliny znázorňuje pomocí izolinií obr. 2.33 *vpravo*, kdy každá ze tří variant vybarvených oblastí představuje rozložení odpovídajícího objemového množství ferokapaliny ve statickém stavu (hřídel nerotuje) a při absenci tlakového diferenciálu. Znalost rozložení izolinií indukce (resp. intenzity pole) a objemu ferokapaliny umožňuje přibližně určit její rozhraní i při působení známého tlakového diferenciálu (křivka rozhraní a izolinie musí být kolineární). Kapalina se zdeformuje tak, aby platila rovnice (2-20). Distribuci měrné magnetické síly (působící na jednotku objemu), kterou lze spočítat podle rovnice (2-1), znázorňuje obr. 2.34 *nahoře*. Z rozložení vektorů je patrné, že tato síla má tendenci vtahovat kapalinu do nejužšího místa pod vrcholem zubu.



**Obr. 2.33** Vysítovaný magnetický obvod ucpávky (*vlevo*): permanentní magnet (1), pólový nástavec (2), hřídel (3), ferokapalina (4); izolinie magnetické indukce v oblasti těsnicí šterbiny, s prostorem obsazeným různými objemy saturované ferokapaliny (*vpravo*) [60, upraveno]

Dále řeší hydrodynamický problém sekundárního proudění. Dopouštějí se přitom zjednodušení, kdy fixní tvar řešené domény přebírají z předchozího kroku za stavu působícího tlaku, avšak při statické hřídeli. I navzdory velké obvodové rychlosti (33m/s) tak zanedbávají vliv odstředivé síly na tvar rozhraní. Na druhou stranu berou v potaz proměnlivou viskozitu ferokapaliny v závislosti na síle magnetického pole dle empirického vztahu (2-16). Obr. 2.34 *uprostřed* ilustruje numerické řešení rozložení úhlové rychlosti (tmavší část škály odpovídá vyšším rychlostem), *dole* pak vírové struktury sekundárního proudění. Výrazně vyšší intenzita víření na pravé straně je umožněna volným povrchem rozhraní ferokapaliny, zatímco v prostoru mezi zuby jejich stěny vírové struktury rozbíjejí.



Obr. 2.34 Rozložení vektorů měrné magnetické síly (*nahoře*), úhlové rychlosti (*uprostřed*) a sekundárního proudění (*dole*) [60, upraveno]

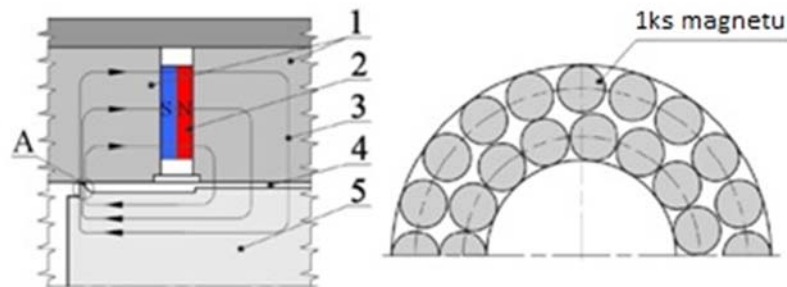
*Numerical Simulation and Experimental Validation of the Critical Pressure Value in Ferromagnetic Fluid Seals (Szczech, Horak, 2017)*

Vlivy na tlakovou kapacitu jednostupňové ucpávky (obr. 2.35 *vlevo*) zkoumali v nejnovější publikaci [114]. Na případu těsnění pro průměr hřídele 50mm a s těsnicí mezerou 0,1mm srovnávali výsledky numerického řešení a experimentu. V první části byl na základě simulací průběhu magnetické indukce po délce mezery vyhodnocen optimální tvar stupně (pólového nástavce – detail A) – obr. 2.36. V druhé části byl zkoumán vliv proměnlivého objemu několika druhů ferokapalin (převážně od firmy Ferrotec; hranice domény kapaliny byly stanoveny stejným způsobem, jako v předchozím článku, za předpokladů:  $\Delta p \neq 0$ ,  $n = 0$ ,  $M = M_S$ ), a jednak vliv proměnlivého objemu permanentního magnetu (tvořeného různým počtem a uspořádáním diskových neodymových magnetů – obr. 2.35 *vpravo*). Ze studie vyplývá několik závěrů:

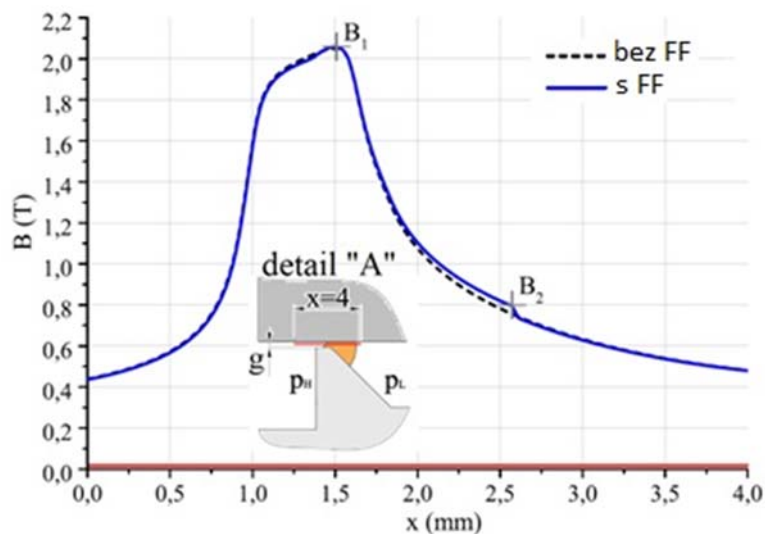
- Rozdílnost hodnot  $\Delta p_{max}$  mezi simulací a experimentem je závislá na objemu ferokapaliny a permanentního magnetu. Největší relativní

chyba byla zjištěna pro nejmenší objem magnetu (kapalina nejspíš nebyla dostatečně saturovaná).

- Viskozita ovlivňuje hodnotu kritického tlaku – vyšší viskozita snižuje  $\Delta p_{max}$ .
- Přidávání objemu ferokapaliny nad určitou hodnotu nemá výrazný vliv další nárůst  $\Delta p_{max}$ .
- Zvyšování intenzity magnetického pole zvětšováním objemu magnetu nad určitou optimální hodnotu má za následek snížení  $\Delta p_{max}$ .



**Obr. 2.35** Schéma jednodušné experimentální ucpávky (vlevo): pólový nástavec (1), permanentní magnet s proměnlivým objemem (2), siločáry uzavřeného magnetického obvodu (3), vzduchová mezera (4), rotující hřídel (5); realizace proměnlivého objemu pomocí mnoha diskových magnetů (vpravo) [114, upraveno]



**Obr. 2.36** magnetické indukce po délce těsnicí mezery bez a za přítomnosti ferokapaliny [114, upraveno]

### 2.3.6 Těsnění kapalných látek

Výše zmínění autoři Szczech, Horak, a též Szydło, jsou dále podepsáni pod publikacemi, zkoumajícími použití uvedené FHD ucpávky při těsnění vody [118, 95]. Společně s Matuszewskim [62, 119, 78] tak tito polští autoři tvoří jakési evropské ohnisko současného výzkumu těchto aplikací. V Asii jsou to pak např. Zhao, Liu, Yang, Wang a mnoho dalších autorů především z Číny [120, 77,

121, 102].

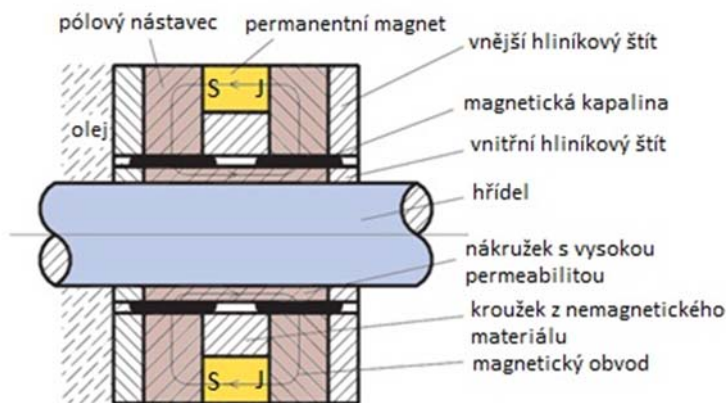
Následuje stručné seznámení s obsahem těchto prací (seřazeno chronologicky):

[120] (*Zhao et al., 2003*):

V první části studie FHD ucpávky pro hřídel lodního šroubu je popsán postup přípravy vlastní magnetické kapaliny s částicemi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  o průměrné velikosti 10 nm v hydrofobní nosné kapalině – vřetenovém oleji. V experimentální části je testováno vícestupňové těsnění – při 600 ot/min bylo dosaženo nejvyšší celkové tlakové difference 2MPa, než došlo k průsaku mořské vody. Magnetizační křivka použité ferokapaliny s nejlepšími hydrofobními vlastnostmi je v práci uvedena.

[77] (*Liu et al., 2004*):

Studie se zabývá optimalizací designu FHD ucpávky (obr. 2.37) pro těsnění mazacího oleje, a to dvěma způsoby: 1) Vylepším magnetického obvodu: zabráněním „průsaku“ magnetického pole do nežádoucího prostoru za pomoci rozšíření hřídele o nákrůžek z materiálu s vysokou permeabilitou, skrze který se siločáry pole uzavírají lépe, než v případě jejich vedení přímo přes samotnou hřídel. 2) Přidáním hliníkových „štítů“ po stranách: dojde tak k prodloužení šterbiny, v níž společně s ferokapalinou rotuje i těsněný olej. Rozdíl rychlostí těchto kapalin se díky tomu výrazně sníží, což má pozitivní vliv na udržení stability rozhraní – zabránění vzniku Kelvin-Helmholtzovy nestability na rozhraní dvou vůči sobě se pohybujících tekutin. Experiment na hřídeli o průměru 20mm běžel bez selhání při 1200 ot/min a při tlakovém diferenciálu 3kPa po dobu 10 týdnů.



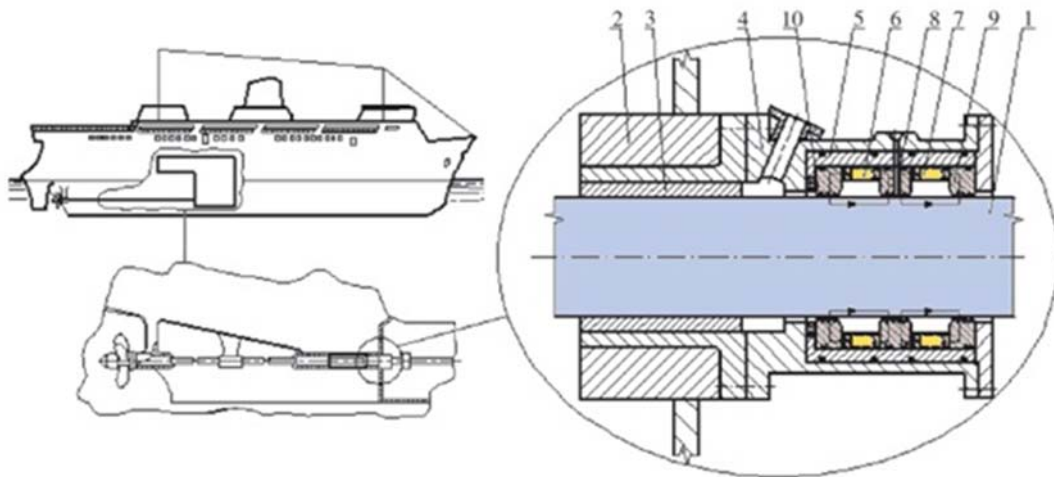
Obr. 2.37 Schéma navržené podoby nové FHD ucpávky [77, upraveno]

[62] (*Matuszewski, Szydło, 2008*):

Článek informuje o použití FHD ucpávek v náročných podmínkách: u hřídelí s výrazným axiálním i radiálním kmitáním (výchyly až 0,7 mm), při vysokých teplotách (až 1200°C) a při těsnění vody. Většinou uvádí tandemové případy těsnění, kdy FHD ucpávka slouží jako druhý stupeň, kterému předchází primární manžetové, centrifugální, či šroubové těsnění. Obr. 2.38 znázorňuje FHD ucpávku pro hřídel lodního šroubu. Závěr práce předkládá výsledky testování provozuschopnosti vlastního výzkumného standu – půlhodinové testy při 250/500/600 ot/min hřídele o průměru 200 mm ověřily schopnost magnetické kapaliny utěsnit vodu pod tlakem



30 kPa při pracovní mezeře o velikosti 0,5 mm. Jiný test ucpávky na hřídeli o průměru 50 mm běžel bez problému po dobu 200 hodin při 3000 ot/min a tlaku vody 0,1 MPa.



**Obr. 2.38** Schéma umístění pohonu námořního plavidla a jeho těsnicího uzlu (vlevo), FHD ucpávka hřídele lodního šroubu (detail vpravo): 1 – hřídel, 2 – tělo, 3 – kluzné ložisko, 4 – skříň těsnění, 5 – nemagnetický nákrůžek, 6, 7 – permanentní magnety, 8, 9 – drážkované pólové nástavce, 10 – magnetická kapalina [62, upraveno]

[121] (Yang *et al.*, 2009):

Práce pokračuje ve výzkumu FHD ucpávky pro hřídel lodního šroubu, na standu z práce [120], s ferokapalinou na bázi glycerinu (její magnetizační křivka je uvedena). Výhody takovýchto těsnění oproti konvenčním těsněním pro lodní dopravu spatřuje ve snížení energetických ztrát a hluku redukcí tření i vibrací, a zároveň ve zvýšení maximálních možných rychlostí.

[118] (Szydło, Szczech, 2011):

Tato studie, vyšetřující proces únavy FHD ucpávky za dynamických podmínek až do ztráty její schopnosti těsnit vodu, si zaslouží výraznější pozornost. Experimenty byly prováděny na čtyřech komerčně vyráběných ferokapalinách (FerroLabs), a dokazují, že jejich použití pro efektivní těsnění vody je možné. Příčinou vznikající nestability na rozhraní dvou kapalin však spíše pro nižší obvodové rychlosti.

Obecným požadavkem na ferokapaliny pro tyto aplikace je vysoké povrchové napětí na rozhraní, které je například při statických podmínkách v kombinaci s působením magnetických sil zcela dostatečné pro zajištění dlouhé životnosti těsnění. Pokud jsou ale povrchy vody a ferokapaliny vůči sobě v pohybu, způsobí určitá kritická hodnota vzniklé mezipovrchové nestability selhání těsnění, a to při *kritické obvodové rychlosti*.

Experimenty byly prováděny na jednostupňovém těsnění z článku [114], které umožňuje snadnou detekci průsaku (z tohoto důvodu je použití vícestupňového těsnění méně vhodné, neboť v jeho případě dochází k průsaku postupně mezi jednotlivými stupni, což vyhodnocení značně komplikuje). Experimenty lze rozdělit do dvou kategorií: 1) krátkodobé – ty umožňují určit *kritický tlak* (bez rotace hřídele)

a *kritickou rychlost*, 2) dlouhodobé – stanovující časovou *životnost* (tzn. pro 1 milion otáček) při různých rychlostech hřídele. Kritická rychlost i životnost byly stanoveny vždy při hodnotě relativního tlaku  $p/p_{krit} = 0,5$  (kde  $p$  je působící tlak,  $p_{krit}$  je kritický tlak konkrétní testované ferokapaliny).

Ze závěrů lze mimo jiné zmínit: životnost ucpávky nejvíce závisí na rychlosti pohybu – při nízkých hodnotách se prodlužuje; působící tlak má výrazný vliv na hodnotu kritické rychlosti. Překvapivým zjištěním se může zdát, že hodnota kritické rychlosti kapaliny výrobcem určené pro audiotechniku je téměř třikrát vyšší, než v případě kapaliny určené přímo pro hřídelová těsnění. To však může být i v důsledku použitého způsobu stanovení působícího tlaku (pokud kapalina vykazala vysokou hodnotu kritického tlaku, byla pak během testování kritické rychlosti také větším tlakem zatížena).

[119] (*Matuszewski, 2013*):

Článek představuje výsledky testování životnosti vícestupňového těsnění vody pro tři různé ferokapaliny (FerroLabs). Podobně jako předchozí práce, i zde je určen kritický tlak; kritická rychlost i životnost je však měřena při třech různých hodnotách působícího tlaku:  $p/p_{krit}=0,8; 1,6; 2,4$ . Vliv tohoto poměru na životnost je očekávatelný: vyšší tlak značně snižuje její hodnotu. Z dalších závěrů – nad rámec již dříve uváděných poznatků – dodejme, že pokus se zvýšením intenzity magnetického pole (přidáním několika kusů magnetů) prokázal jen malý vliv na hodnotu kritického tlaku (konkrétně jeho lehké snížení) i na maximální hodnotu obvodové rychlosti, při které životnost těsnění odpovídá 1 milionu otáček.

[95] (*Szczech, Horak, 2015*):

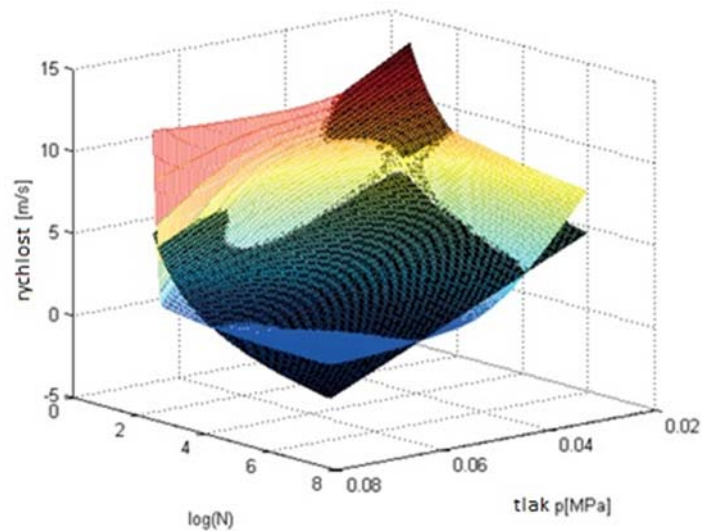
V návaznosti na studii [118] autoři srovnávají těsnicí schopnosti několika ferokapalin. S přihlédnutím k jejich vlastnostem (hustota, dynamická viskozita, saturační magnetizace) a provozním podmínkám (působící tlak, obvodová rychlost) navrhuji za účelem zjednodušení výběru vhodné ferokapaliny matematický model, vyjadřující tlakovou únosnost ucpávky, a zvažují možné vlivy některých charakteristik ferokapalin na vhodnost pro jejich použití při těsnění vody.

[102] (*Wang et al., 2016*):

Z teoretické analýzy FHD ucpávky s radiálním těsnicím kroužkem ferokapaliny odvozují autoři vztah přímé úměrnosti mezi velikostí smykové síly na rozhraní *ferokapalina-voda* a velikostí radiální šířky mezery  $g$ . Vyšší hodnotě této síly přisuzují negativní účinky na životnost těsnění, kterou experimentálně ověřují pro tři případy:  $g=0,05; 0,1; 0,2$  mm. Výsledky ukazují, že životnost těsnění se s rostoucím  $g$  postupně snižuje (od jednotek týdnů po jednotky hodin).

[78] (*Matuszewski, 2017*):

Publikace dokumentuje počátky snah o pravděpodobně první systematický přístup ke komplexnímu popisu problematiky dlouhodobé životnosti FHD ucpávek při těsnění kapalin. Na základě formální podobnosti dat získaných při měření životností ucpávek a únavových charakteristik oceli odvozují autoři vlastní matematický model pro obvodovou rychlost  $v$  jako funkci životnosti (tzn. počtu otáček  $N$  do selhání) a působícího tlaku  $p$ . Obr. 2.39 ilustruje schopnost modelu reprezentovat přibližný trend skutečného průběhu zkoumaných proměnných.



**Obr. 2.39** Příklad srovnání teoretického průběhu závislosti  $v=f(\log(N),p)$  (černá plocha) a experimentálních dat (kolorovaná plocha) [x94, upraveno]

Z výše uvedené literatury vyplývá, že použití magnetické kapaliny jako média těsnícího jiné kapaliny je velmi zajímavý a perspektivní problém, který je ale zatím spíše v počátcích svého vývoje. Navzdory řadě úskalí, která jej stále provázejí, se však společně se zájmem o něj již řadu let objevují také snahy o zhodnocení jeho potenciálně obrovských výhod rovnou i v oblasti z těch nejnáročnějších – v umělých náhradách pro lidské tělo.



### 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Tato práce se zabývá návrhem hydrodynamické ucpávky axiálního čerpadla s prstencovým motorem.

Předcházející přehled současného stavu poznání představil jednak dlouhodobé cíle, k jejichž dosažení mohou poznatky získané i v rámci této diplomové práce pomoci, ale také ukázal obrovskou šíři a rozmanitost, ovšem také náročnost celé problematiky a snad veškerých dílčích úkonů na cestě za potenciálně konečným výsledkem pravděpodobně mnohaleté snahy: totiž vznikem nového tandemového čerpadla s prstencovými motory, které bude mít příznivé vlastnosti z hlediska interakce jeho částí s čerpanou krví, a i díky tomu bezproblémově zajistí krevní oběh pacienta po mnoho let. K tomuto cíli by mohla tato práce přispět studiem návrhu hydrodynamické ucpávky na principu magnetické kapaliny, která může mít potenciálně vynikající vlastnosti pro využití v podpůrných oběhových zařízeních pro lidské tělo. Jak ale také ukázala rešerše, současná situace na poli porozumění, natož pak spolehlivého vyřešení všech problematických vlivů, které mohou hrát roli při těsnění krve, respektive jakékoliv obecné kapaliny, je od zcela praktického využití zatím ještě daleko. A přesto, jak uvádí [118], dle aktuálního stavu poznání se experimentální výsledky zdají být slibnější, než bylo na základě teoretických úvah očekáváno.

Právě na takovémto nižším vývojovém stupni – tedy na úrovni experimentálních a výpočtových studií vlastností FHD ucpávek při těsnění vody/krve, či na úrovni vývoje a testování prototypů krevních pump, postupného odhalování všech problematických a potenciálně až životně rizikových faktorů a následných snah o jejich eliminaci, se nachází veškerý současný světový výzkum.

O ještě jeden pomyslný vývojový stupeň níže lze zařadit vůbec vlastní porozumění a ověření již známých poznatků o možnostech a způsobech samotného návrhu ucpávky, a o práci s magnetickými kapalinami na experimentální i výpočtové úrovni obecně. Některé z těchto poznatků jsou již relativně známé a úspěšně využívané v oblasti těsnění např. ventilátorových hřídelů či ve vakuové technice. Jiné postupy, například v metodice přístupu ke studiu charakteristik ucpávek při změnách parametrů zařízení v simulacích i experimentu, jsou relativně nové. Bez pochyby všechny ale tvoří nutný vědecký základ, bez kterého by práce na vyšších úrovních nebyla možná.

Prozkoumat danou problematiku na této primární úrovni je hlavním cílem této práce, tvořícím obecný rámec následujících dílčích cílů:

- **1) Provedení důkladné rešerše celé problematiky.** Obsáhnutí širšího kontextu nejrůznějších faktorů, které mohou hrát významnou roli při návrhu či funkci FHD ucpávky. Nalezení zjednodušeného postupu využitelného v rámci možností této diplomové práce. Viz kapitola 2.
- **2) Návrh vlastního konceptu ucpávky s ohledem na kontext práce** - tj. axiálního čerpadla s prstencovým motorem, s výhledovým využitím jako srdeční náhrada. Analýza specifických požadavků, které definují směr vývoje vlastního prototypu. Viz kapitola 4.
- **3) Numerické modelování v navržené geometrii.** Zásadní část návrhu se týká především magnetického obvodu. Simulace magnetického pole

umožní zjistit teoretické vlastnosti ucpávky. Pro potřeby výpočtu je ale nutné nejdříve vyhodnotit neznámé vstupní parametry a zajistit jejich doplnění do modelu. Doplňková část se pak týká výpočtového ověření předpokládané podoby vnitřního proudění MF v doméně těsnicího kroužku ucpávky. Viz kapitola 5.

- **4) Laboratorní ověření teoretických předpokladů a významných parametrů na experimentálním prototypu.** Zajistit jeho výrobu a testování v rámci možností hydraulické laboratoře OFI. V tomto ohledu bude experiment omezen pouze na testování tlakové únosnosti těsnění vzduchu, nikoli kapalných látek. Potřeba je zajistit taktéž testovací vzorky magnetických kapalin. Viz kapitola 6.

Vzhledem k rozsahu dílčích úkolů jsou body 2, 3 a 4 řešeny paralelně a propojeně, a to pro jeden konkrétní koncept inovativní podoby FHD ucpávky. Ačkoliv první dílčí bod stojí teprve na počátku všech následujících – ale zároveň také proto – jedná se o bod zcela stěžejní. Při studiu takto současné a pro nováčka těžko uchopitelné oblasti, která se navíc poměrně vymyká běžnému obsahu studia na OFI, je zorientování se v problematice primárním, ovšem s přehledem také časově nejnáročnějším úkolem celé práce. Proto možná i největší část potenciálního přínosu této DP tkví již v předchozí kapitole 2, čemuž odpovídá i její značný rozsah. S ohledem na něj a též na v důsledku jeho zpracovávání vzniklou časovou tíseň je řešení některých dalších dílčích bodů předloženo místy v poněkud stručnější formě.

Přesto: i výsledky takovéto studie mohou být s vysokou pravděpodobností přenosné pro případné pokračování výzkumu, ale také i pro obecnější problémy a méně náročné aplikace, než pro MCSSs. Jak se například ukázalo v průběhu diplomové práce Martina Dobrovolného: v axiálním vodním čerpadle na principu prstencového motoru vyvinutém na OFI se použitá velkopřůměrová gufera ukázala jako poměrně problematická z hlediska tření a výsledných velmi vysokých ztrát. Pokud se v budoucnu podaří plně porozumět příčinám vzniku nestability těsnicího kroužku MF kapaliny, která má zásadní vliv na životnost při těsnění vody, a tento faktor eliminovat, nízké tření magnetických kapalin by vyřešilo problém velkých ztrát tohoto čerpadla. Z tohoto pohledu může mít tato práce význam alespoň jako konkrétní blízké ověření, že má smysl se tímto směrem dále ubírat.

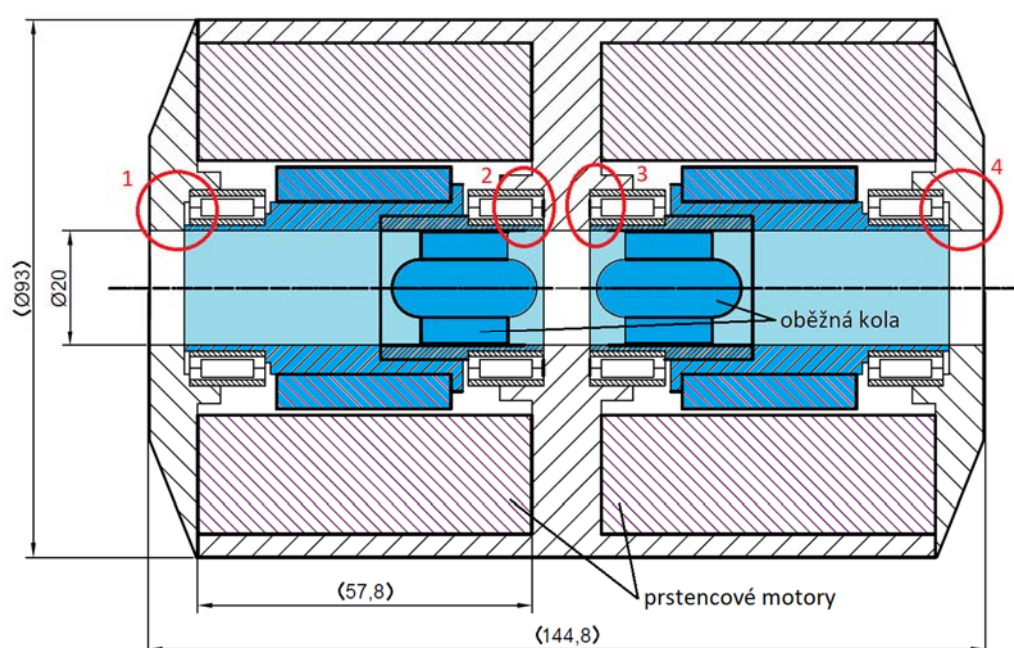
## 4 KONCEPČNÍ NÁVRH

4

### 4.1 Výchozí situace

4.1

Počátek práce byl výrazně ovlivněn spoluprací s Karlem Trlicou a ideou návrhu a realizace funkčního prototypu inovativního tandemového krevního čerpadla s prstencovými motory a FHD ucpávkami. Obr. 4.1 představuje jeden z prvotních postupně vypracovaných konceptů dle Trlice, které se od sebe liší v konstrukčních detailech, vzájemné vzdálenosti motorů a dalších prvků, v řešení uložení, těsnění a mnoha dalších. Varianta, která předpokládala využití FHD ucpávek, se stala styčným bodem těchto dvou jinak zcela samostatných diplomových prací.



**Obr. 4.1** Koncept tandemového axiálního krevního čerpadla s prstencovými motory: rotující prvky zvýrazněny modře (kromě ložisek); červeně označena poloha zamýšlených těsnících uzlů č. 1 až 4 [Trlica, 2018]

Hydraulický návrh samotného oběžného kola, zpracovaný v diplomové práci Tomáše Vrbky pod vedením docenta Miloslava Haluzy, do této spolupráce zasáhl pouze formou okrajových podmínek průtoku  $Q=0,12$  l/s, velmi přibližně očekávané hodnoty otáček  $n \approx 7500$  1/min a výtlačné výšky čerpadla  $H=1,2$  m. Hodnota vnitřního průměru prstence motoru, trubek a také vnějšího průměru oběžného kola byla smluvně určena jako  $D=20$  mm.

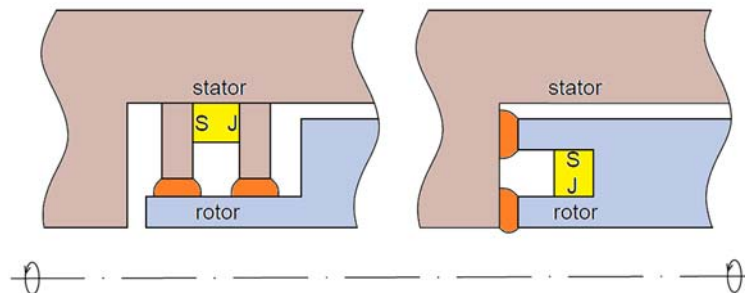
V průběhu spolupráce se postupně odhalila nesmírná komplexita jak návrhu FHD ucpávky, tak konstrukce samotné pumpy. Základním limitem zamýšleného díla byla snaha o minimální rozměry, která však šla zásadním způsobem proti dostupným možnostem výroby. Pro účely realizace prototypu by nebylo efektivní ani časově možné využít zakázkovou výrobu takových prvků, jako jsou ložiska a prstencové motory, proto bylo nezbytné využít v návrhu komerčně dostupné produkty, které se

ale svými rozměry a dalšími parametry ideálnímu řešení příliš neblíží.

Ačkoliv bylo od výroby prototypu nakonec z mnoha důvodů upuštěno a vývoj těchto dvou prací se vzájemně odklonil, idea návrhu FHD ucpávky, která by splňovala náročné podmínky dané požadavkem na pokud možno hladký a nerušený průchod proudu krve (z dříve zmíněných důvodů její citlivosti na vysoká smyková napětí, stagnaci či recirkulaci proudu, které mohou zapříčinit vznik trombózy a hemolýzy), měla tato myšlenka výrazný vliv na vývoj vlastního inovativního konceptu ucpávky i experimentální činnost, a de facto tedy na celé další směřování této DP.

## 4.2 Vývoj vlastního konceptu

Při hledání vhodného řešení těsnicích uzlů se primárně vycházelo z poznatků, získaných na základě rešerše. Hlavní idea a klíč k uchopení postupu při návrhu by se pak dal zjednodušeně shrnout jako snaha o maximální přiblížení rozhraní těsnicího kroužku magnetické kapaliny k hlavnímu proudu protékající těsněné látky (v úvahách doposud krve). Obr. 4.2 schematicky znázorňuje přibližné uspořádání dvou základních variant možné podoby FHD ucpávky pro utěsnění duté hřídele/rotoru prstencového motoru, v níž je umístěno oběžné kolo. Verze *vlevo* představuje v podstatě klasickou základní variantu FHD ucpávky s axiálně polarizovaným prstencovým magnetem, kdy u siločar magnetického pole v těsnicím kroužku ferokapaliny převládá jejich radiální směr (viz např. dříve obr. 2.18a - s tím rozdílem, že těsněná hřídel zde byla plná tyč). Verze *vpravo* je neobvyklé řešení, využívající radiálně polarizovaný prstencový magnet, kdy převládající směr siločar magnetického pole v těsnicím kroužku ferokapaliny je axiální (nejpodobnější případ z rešerše s axiálním směrem siločar snad na obr. 2.27, varianta E).



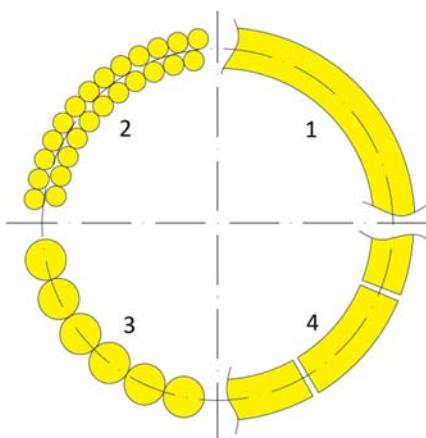
Obr. 4.2 Základní varianty přístupu k utěsnění duté hřídele prstencového motoru: radiální (*vlevo*), axiální (*vpravo*)

Na těchto dvou případech lze srovnat, že na rozdíl od levé varianty, která těsněné látce poskytuje významný prostor, kam se může od hlavního proudu oddělit, pravá varianta žádný takový prostor nedává. Další úvahy se proto soustředily na variantu s převládajícím axiálním směrem siločar magnetického pole v magnetické kapalně.

Následující dva oddíly představují některé uvažované koncepty řešení uspořádání prvků magnetického obvodu - odlišujícím znakem pro rozdělení je směr polarizace magnetu či magnetů. Omezená dostupnost permanentních magnetů o vhodných parametrech se totiž stala výrazným faktorem ovlivňujícím vývoj celého konceptu

vlastního testovacího prototypu ucpávky. Při snaze vybírat z běžně dostupného sortimentu NdFeB magnetů (protože nákladná zakázková výroba na míru by přicházela v úvahu až v pozdějších fázích vývoje, po ověření vůbec samotné realizovatelnosti celého konceptu) bylo uvažováno několik variant uspořádání zdroje magnetického pole ucpávky – viz obr. 4.3:

- Varianta 1 je tvořena spojitým prstencem s průřezem tvaru kvádrů. Principiálně umožňuje axiální i radiální polarizaci, avšak radiální verze není příliš častá. Také rozměrová škála kombinací vnitřního a vnějšího průměru a osové tloušťky je poměrně omezená.
- Varianty 2 a 3 jsou tvořeny řadou tyčových axiálně polarizovaných magnetů na jednom či více průměrech roztečné kružnice. Jedná se o takřka ideálně rozměrově variabilní systém, uvedený již v kapitolách 2.3.4 a 2.3.5. Škála průměrů a délek tyčových magnetů je široká, na rozdíl od varianty 1 ale není možné maximální využití dostupného prostoru – vždy zůstane volné místo mezi magnety, což může mít za následek snížení tlakové kapacity ucpávky.
- Varianta 4 je tvořena prstencem rozděleným po obvodu na několik segmentů. Téměř jediný běžně dostupný způsob vytvoření radiálně polarizovaného prstence ale trpí na malou rozměrovou variabilitu – segmenty jsou vyráběny téměř výhradně ve formě poměrně tenkých plátek.



Obr. 4.3 Varianty uspořádání permanentních magnetů v FHD ucpávce: (1) prsteneček, (2, 3) tyčové magnety, (4) segmenty

#### 4.2.1 Axiální ucpávka s radiální polarizací magnetu

4.2.1

Schematické návrhy si lze na obr. 4.1 dosadit např. do místa těsnicího uzlu č. 2 nebo 4, případně zrcadlově obrácené do uzlů č. 1 nebo 3.

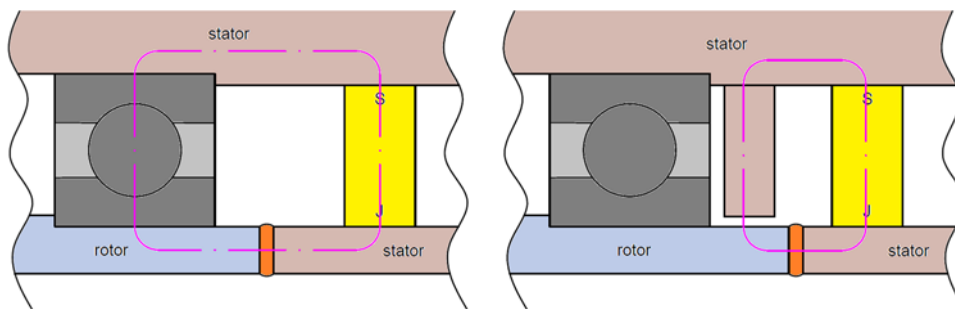
Obr. 4.4 ilustruje dva základní směry úvah o uspořádání magnetického obvodu: z důvodu výrazného omezení realizovatelných způsobů uložení rotoru prstencového motoru s oběžným kolem o průměru 20mm a ve snaze o minimalizaci vnějších rozměrů, vznikla nejdříve varianta, kdy je magnetický obvod uzavírán skrz valivé ložisko z magneticky měkkého materiálu (obr. 4.4 vlevo). Podoba vychází z konceptů uvedených v rešerši (obr. 2.27, varianta B a E). Teoreticky funkční uspořádání ale naráží na problémy v případě snahy o numerické simulování



magnetického obvodu. Překážky, v podobě nedostatečných informací o materiálu, přesném konstrukčním provedení, konkrétním počtu kuliček či válečků, a v neposlední řadě také problematické modelování bodového či liniového kontaktu jsou důvody, proč bylo v průběhu práce od tohoto konceptu upuštěno.

Praktického vyřazení ložiska z magnetického obvodu při zachování v zásadě stejného uspořádání lze dosáhnout přidáním dalšího disku/pólového nástavce před ložisko (obr. 4.4 *vpravo*), který má mezi svou spodní stranou a trubicou rotoru tenkou vzduchovou mezeru. Jak dále ukážou numerické simulace i experiment, takovéto řešení je zcela funkční.

Společným nedostatkem těchto dvou konceptů jsou ale obtíže při realizaci radiálně polarizovaného prstence v požadovaných rozměrech s využitím běžného sortimentu NdFeB magnetů.

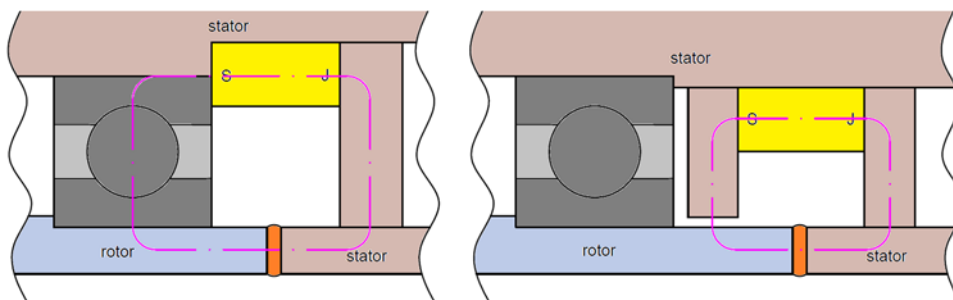


**Obr. 4.4** Axiální ucpávka s radiální polarizací magnetu - magnetický obvod je uzavírán: přes ložisko (*vlevo*), mimo ložisko (*vpravo*)

#### 4.2.2 Axiální ucpávka s axiální polarizací magnetu

Výrazně jednodušší situace je při axiální polarizaci permanentního magnetu. Nedostatečnou variabilitu kombinací vnitřních a vnějších průměrů plných prstenců lze pro realizaci zkušební prototypu obejít za pomoci prstence tyčových magnetů. Sestavu ucpávky je však potřeba doplnit o matrici, do které budou magnetu usazeny a která je bude držet ve zvoleném uspořádání – souhlasně orientované póly těsně sousedících magnetů se mají pochopitelně tendenci odpuzovat.

Obr. 4.5 *vlevo* předpokládá uzavírání magnetického obvodu skrze ložisko, varianta *vpravo* pak opět skrze pólový disk s mezerou.



**Obr. 4.5** Axiální ucpávka s axiální polarizací magnetu - magnetický obvod je uzavírán: přes ložisko (*vlevo*), mimo ložisko (*vpravo*)

Společným negativem všech čtyř představených variant je ale vznik axiální přitažlivé magnetické síly mezi čely trubek rotoru a statoru. V běžné radiální variantě FHD ucpávek se tato síla vyrovná – magnetické kapaliny jsou dokonce využívány pro svůj centrovací efekt. Tento nezanedbatelný faktor byl v prvních krocích přehlédnut, posléze byla ale i s jeho vědomím a jemu navzdory axiální ucpávka zvolena jako varianta, které bude nadále věnována širší pozornost.

### 4.3 Finální varianta

4.3

Finální varianta, která byla vybrána pro detailní zpracování – tedy zkoumání jak za pomoci simulací, tak experimentu na reálném prototypu, je axiální varianta ucpávky, jejíž zdroj magnetického pole je tvořen prstencem tyčových magnetů, a jejíž magnetický obvod se uzavírá přes pólový disk s mezerou. Byla vybrána i navzdory výše zmíněné nevýhodě, a to v první řadě pro svou potenciální výhodnost při použití v MCSSs. Totiž v případě úspěšného vývoje až do fáze spolehlivého zajištění její funkce v prostředí kapalného média by se jednalo o pravděpodobně ideální variantu pro tandemové srdeční čerpadlo. Navzdory komplikacím při snaze o začlenění FHD ucpávek do zde vyvíjeného konceptu MCSS se totiž ukazuje, že konvenční způsoby těsnění v takto náročných podmínkách naráží na své limity. V takovéto situaci může být tedy snaha o hledání nových variant vždy přínosem.

Navržené inovativní řešení je však třeba podrobit testování – v první řadě vůbec funkčnosti celého konceptu. Vzhledem k omezeným technickým možnostem, dostupným v rámci této práce, ale bylo potřeba upravit parametry prototypu za účelem celkového zjednodušení. Zároveň bylo nevyhnutelné ponechat určitý prostor pro improvizaci během celého procesu realizace experimentu, a dále dbát na to, že je to první pokus tohoto druhu na OFI prováděný. Bez předchozích zkušeností bylo tedy nutné přistupovat k volbě návrhových parametrů ucpávky i experimentu střízlivě. Proto bylo rozhodnuto, že testování bude probíhat pouze s těsněním vzduchu, nikoliv i s původně zamýšlenou vodou. Takový pokus by byl až součástí vyšších fází vývoje, přesto - výběr používaných magnetických kapalin byl tomuto účelu již přizpůsoben (viz kap. 5.1.1). Cíle pokusů na tomto prototypu byly tedy stanoveny na ověření principu funkce axiální FHD ucpávky, což lze vyjádřit ve formě několika otázek:

- Udrží se magnetická kapalina ve štěrbině?
- Jaký tlak vzduchu ucpávka udrží?
- Jak moc je tato schopnost ovlivněna otáčkami?
- Jakou roli celkově hraje zvolený typ magnetické kapaliny?

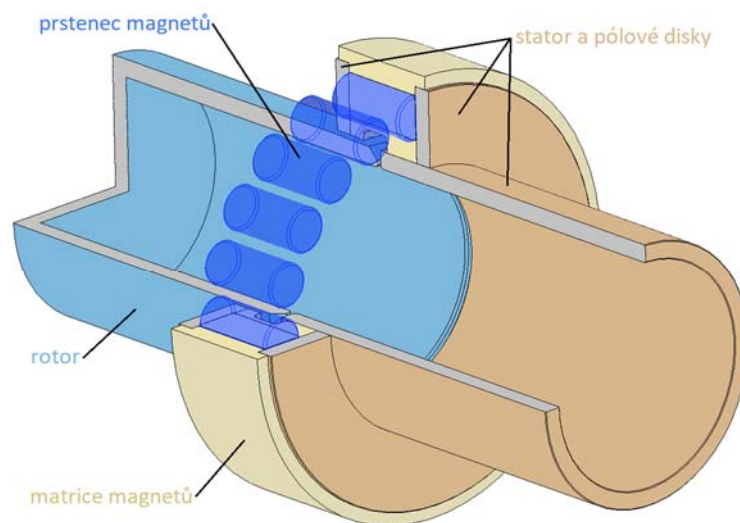
Hledáním odpovědí na tyto otázky se zabývá kapitola 6. Experimenty byly z důvodu omezených technických možností prováděny za pomoci soustruhu, jehož vřeteno roztáčelo trubku rotoru namísto prstencového motoru. Toto řešení se ukázalo být nakonec velmi výhodné, a to z důvodu snadného a spolehlivého nastavení požadované šířky těsnicí spáry.

V následující části představené parametry prototypu byly zvoleným způsobem provedení experimentu silně ovlivněny, proto jsou uváděny i v kontextu s ním.

### 4.3.1 Konstrukční návrh experimentálního prototypu axiální ucpávky

Obr. 4.6 zobrazuje řez sestavou navržené testovací ucpávky s popisem hlavních součástí:

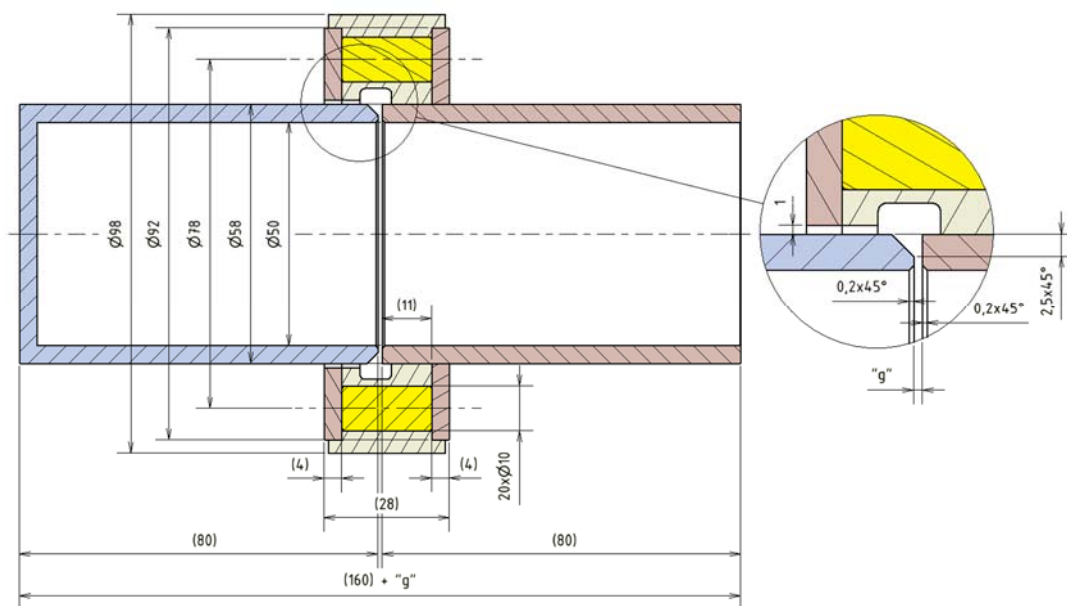
- rotor:
  - tvořen trubkou z běžné konstrukční oceli o vnitřním průměru 50mm a tloušťce stěny 4mm – větší rozměry byly voleny v rámci zmíněného střízlivého přístupu pro snadnější práci na prototypu a též kvůli dostupnosti daných polotovarů
  - bude upnut do sklíčidla soustruhu a roztáčen pomocí vřetene
  - pro možnost tlakování vzduchem je potřeba zadní část zaslepit, na obr. 4.6 a 4.7 přivařeným víčkem – konkrétní provedení bude ale vyřešeno až během přípravy experimentu
- stator a pólové disky:
  - materiál i tloušťky jsou stejné jako v případě rotoru
  - trubka statoru bude upnuta do opěrky soustruhu, sesouosena s rotorem a velikost těsnicí spáry bude nastavena pomocí pojezdu opěrky
  - jeden pólový disk bude navařen na trubku statoru, druhý vložen do matrice magnetů a držěn zde magnetickou silou
  - způsob zavíčkování a tlakování bude určen a doplněn až během příprav experimentu
- prstenec magnetů:
  - tvořen dvaceti tyčovými magnety o průměru 10mm a délce 20mm
  - materiál NdFeB N42
- matrice magnetů:
  - vyrobena pomocí 3D tisku na Odboru technologie obrábění
  - materiál ABSplus



Obr. 4.6 Sestava testovacího prototypu axiální ucpávky – 3D model



Další významné a detailnější rozměry jsou uvedeny na obr. 4.7. Hodnoty uvedené v závorkách pravděpodobně budou ještě upraveny pro potřeby realizace experimentální sestavy. Způsob plnění štěrby „g“ magnetickou kapalinou bude také doplněn během procesu příprav. Podoba zkosení protilehlých čel trubek vychází ze zkušeností jiných autorů (viz kap. 2.3.2 a 2.3.5) i vlastních simulací, a zajišťuje požadované rozložení intenzity magnetického pole pro správnou funkci těsnění.



Obr. 4.7 Sestava testovacího prototypu axiální ucpávky – kótovaný řez

## 5 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ

### 5.1 Simulace magnetického pole – tvorba modelu

Simulace magnetického pole probíhaly v softwaru Ansoft Maxwell 16.0. Tento program umožňuje řešit pomocí MKP Maxwellovy rovnice v uzlových bodech automaticky generované sítě prvků na uživatelem zadané geometrii. Zde řešená magnetostatická úloha rozložení magnetického pole v obvodu axiální FHD ucpávky by díky svojí geometrii principiálně měla umožňovat 2D axisymetrické řešení. Je zde ale jistá otázka vlivu reálného prostorového rozložení permanentních tyčových magnetů, respektive pro potřeby 2D reprezentace jeho nahrazení pomyslným plným prstencem. Tento problém je dále diskutován a v řešení zohledněn.

Zadaným geometrickým doménám je ale potřeba přiřadit též jejich materiálové charakteristiky. Jejich zajištění je zásadním prerekvizitou další práce. Kapitola 2.2.4 však ukázala, že získat tyto charakteristiky není v případě magnetických kapalin triviální záležitostí. Přesto se i díky rozsahu rešerše podařilo veškeré potřebné parametry zajistit.

#### 5.1.1 Vstupní materiálové parametry magnetických kapalin

Kapitola 2.2.1 uvedla, že existují v zásadě dva hlavní druhy magnetických kapalin (ferrokapaliny (FF) a magnetoreologické kapaliny (MR)), každá obvykle používaná v jiné aplikační oblasti. V rámci snahy o co nejširší pokrytí studované problematiky bylo rozhodnuto využít pro experimenty oba druhy. V případě MR kapaliny byla situace jednoduchá: na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně mají s prací s nimi již bohaté zkušenosti, mohli tedy poskytnout jak vzorek kapaliny a její magnetizační křivku, tak i některé cenné rady, a dále navíc i naměřenou B-H křivku oceli S235, využitou při simulacích.

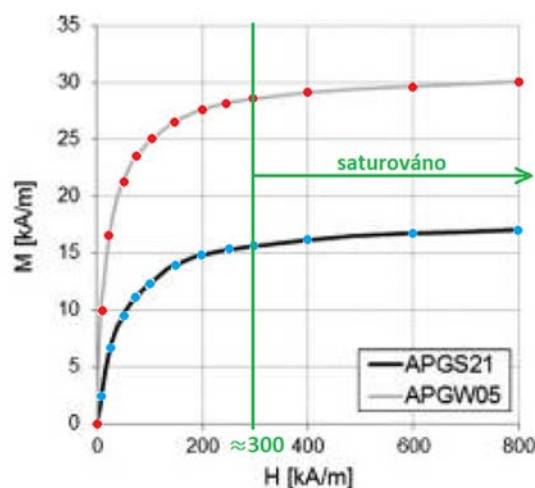
Získat ferrokapalinu se ukázalo jako komplikovanější a po finanční stránce potenciálně vysoce nákladný úkol, a to vzhledem k velmi vysoké ceně samotných kapalin i jejich dopravy ze zahraničí. Alternativní pokusy o samovýrobu by sice byly možné (viz rešerše), z časového hlediska ale velmi neefektivní. Po počátečních neúspěšných snahách o kontaktování výrobců zachránila experiment ochota pracovníků americké společnosti Ferrotec poskytnout vzorky dvou zvolených ferrokapalin, primárně určených pro audiotekniku, a to bez nároků na jakoukoliv platbu. Za tuto ochotu jim patří velký dík.

Tab. 5.1 shrnuje základní vlastnosti tří magnetických kapalin zvolených pro použití v dalších fázích studie. Jedním z klíčů pro výběr těchto konkrétních kapalin je poznatek z článku [114], že vyšší viskozita snižuje hodnotu kritického tlaku. Například proto byla zvolena tato konkrétní MR kapalina, neboť z nabídky výrobce LORD je viskózní nejméně.

Tab. 5.1 Srovnání vlastností FF a MR kapalin vybraných pro experiment

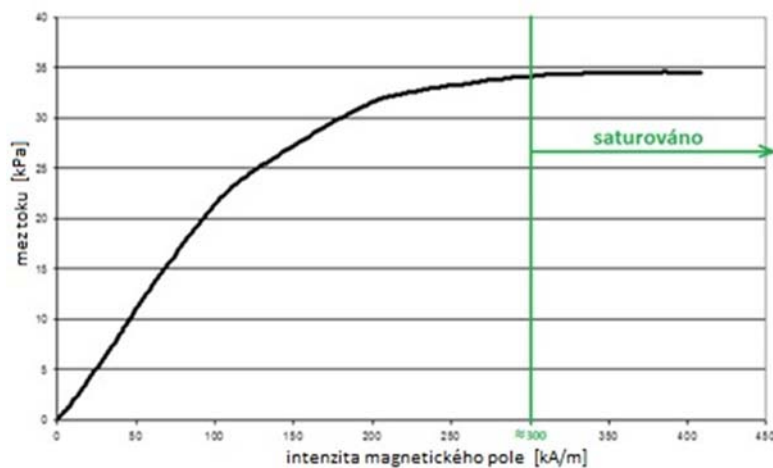
magnetická kapalina	výrobce	hustota [g/ml]	viskozita [mPa.s]	saturační magnetizace [kA/m]	nosná látka	poznámka
APGW10	Ferrotec	1,31	1000	32	syntetický esterový olej	-
APG1134	Ferrotec	1,07	1000	17	syntetický hydrokarbon	vyšší odolnost vůči vodě
MRF122EG	LORD	2,38	42	361	hydrokarbon	saturovaná mez toku $\tau_0=35\text{kPa}$

Důvodem, proč bude použito více vzorků FF kapalin než MR kapalin, je jejich obecně udávaná větší vhodnost pro těsnicí aplikace a také fakt, že každá je pro další vývoj zajímavá z jiného důvodu: zatímco APGW10 je sice běžnější ferokapalinou, má na druhou stranu vyšší hodnotu  $M_S$  a bylo by tedy zajímavé ověřit, nakolik tomu bude odpovídat zvýšení tlakové kapacity při jejím použití oproti druhé FF. APG1134 by zase dle údajů výrobce měla vykazovat vyšší odolnost při dlouhodobém kontaktu s vodou, což je zajímavým příslibem pro následující stupně vývoje. Neméně důležitou roli při výběru hrál také fakt, že výrobce sám magnetizační křivky svých produktů nedodává. I proto byly vybrány tyto konkrétní ferokapaliny - s ohledem na jedinečnou dostupnost jejich magnetizačních křivek, respektive křivek podobných ferokapalin stejného výrobce, se srovnatelnými fyzikálními a magnetickými vlastnostmi. Tyto M-H křivky jsou uvedeny v článku [63] (*Szczech, 2017*) – viz obr. 5.1. Do materiálové knihovny Maxwella je však potřeba je zadat formou B-H křivek. Jejich přepočítání ve zvolených označených bodech je možné za pomoci rovnice (2-15). Alternativou dohledávání experimentálních údajů v literatuře je vlastní měření (viz kap. 2.2.4), které však bylo mimo možnosti této práce.



Obr. 5.1 M-H křivky ferokapalin Ferrotec s naznačením saturační intenzity magnetického pole a body jejich přepočtu na B-H křivky: změřená APGS21 odpovídá experimentálně použité APG1134, analogicky APGW05 odpovídá použité APGW10 [63, upraveno]

Klasický postup při návrhu, umožňující využití zjednodušené rovnice (2-20) (kap. 2.3.2) předpokládá saturaci magnetické kapaliny<sup>33</sup>. Odpovídající minimální hodnota intenzity magnetického pole, kterou je tedy nutné zajistit v celé provozní oblasti výskytu MF, byla určena z M-H křivek ferokapalin a  $\tau_0$ -H křivky MR kapaliny udané výrobcem (obr. 5.2). Překvapivě bylo možné (pro jednoduchost a s přihlédnutím k jisté nepřesnosti) určit tuto hodnotu jako společnou pro všechny 3 kapaliny, a to jako  $H_{MS} \approx 300$  kA/m.



Obr. 5.2  $\tau_0$ -H křivka kapaliny MRF122EG s určenou hodnotou saturační intenzity magnetického pole [122, upraveno]

Aby bylo možné výpočtově ověřit splnění této podmínky a správně navrhnout celý obvod, je dále zapotřebí určit a zadat do modelu přesné parametry permanentního magnetu. Výrobci však pro konkrétní materiály uvádějí pouze rozsah hodnot remanence  $B_r$  a minimální hodnotu koercivní síly  $H_c$ . Ačkoliv i jejich odhad může být pro první fáze návrhu dostačující, chceme-li dále co nejpřesněji zkoumat mezní stavy funkce, kam kritický tlak ucpávky bezesporu patří, je co nejvyšší přesnost všech zadávaných parametrů vždy k užitku. Způsobům zajištění přesných parametrů navrhovaného prstence dvaceti tyčových magnetů se proto věnuje následující oddíl.

### 5.1.2 Vstupní materiálové parametry permanentních magnetů

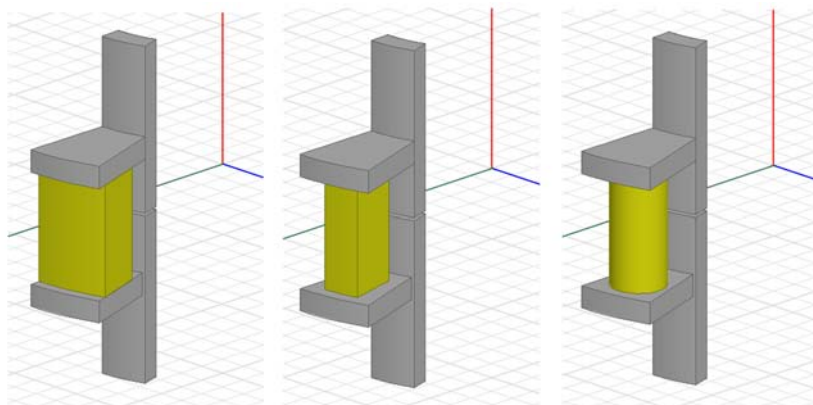
Realistického nastavení parametrů 2D axisymetrické reprezentace skutečného prstence tyčových magnetů, aby bylo možné považovat řešení takového modelu za korektní, lze dosáhnout kombinací několika přístupů:

<sup>33</sup> V případě, že se nepodaří zajistit dostatečnou intenzitu magnetického pole v doméně MF, bylo by teoreticky možné využít k určení rozhraní nesaturované MF metodu uvedenou v kapitole 2.3.5, a do rovnice (2-20) namísto  $M_s$  dosazovat hodnotu  $M$ . Za tímto účelem by mohlo být výhodné využít spíše program FEMM – neplacenou alternativu komerčních MKP řešičů magnetismu. Nevýhodu uživatelsky méně příjemného prostředí vynahrazuje zabudovanou možností provázání s programem Octave či MATLAB a skrz něj snadnou programovatelností úloh, zahrnujících cyklické změny řešené geometrie, jak to vyžaduje např. algoritmus z článku [104] (kap. 2.3.5). Náročnost takového postupu by však byla pro praktické účely snad až příliš vysoká.

- Odhadu skutečných parametrů  $B_r$  a  $H_c$  jednoho kusu tyčového magnetu dle přibližných údajů výrobce a výpočtu jeho relativní permeability  $\mu_r$ .
- Experimentálního ověření skutečné hodnoty indukce vyvolané celým prstencem magnetů pomocí Hallovy sondy ve zvoleném kontrolním místě prototypu.
- Simulací na 3D modelu a ověření hypotézy, že zvýšení hodnoty indukce v kontrolním místě při použití magnetu tvaru plného prstence oproti hodnotě v tomto místě vyvolané prstencem tyčových magnetů o zcela totožných materiálových parametrech, stejné osové tloušťce i pomyslném vnitřním a vnějším průměru (obálky těchto magnetů) lze přibližně opět srovnat na původní hodnotu indukce, a to snížením materiálových parametrů plného prstence, proporcionálním k poměru objemů těchto dvou variant provedení zdroje magnetického pole, při zachování konstantní hodnoty jejich relativní permeability.

Pro ověření uvedené hypotézy bylo využito periodicity úlohy – simulace jednotlivých variant byly provedeny vždy na jednom objemovém výseku mezi dvěma meridiálními řezy, a to pro v osové délce zkrácený a zjednodušený případ ucpávky bez jakéhokoliv zkosení čel rotoru a statoru, s neměnnou hodnotou šířky štěrbiny  $g$ . Srovnáváno bylo několik variant provedení prstence magnetů o konstantních parametrech vnější obálkové plochy – tedy tloušťce v radiálním směru (10mm), délce v osovém směru (20mm) a stálém středním průměru (78mm):

- na výsecích vždy po  $18^\circ$  tedy pro: plný prstenc (objem  $V_{1,00}=100\%$ ), prstenc tvořený 20 po obvodu pravidelně rozmístěnými hranoly o celkovém objemu 50% plného prstence ( $V_{0,50}=0,5 \cdot V_{1,00}$ ), prstenc 20 tyčových magnetů o celkovém objemu 64% plného prstence ( $V_{0,64}=0,64 \cdot V_{1,00}$ ) – viz obr. 5.3
- na výseku  $36^\circ$  pak pro pravidelný prstenc z 10 magnetů o celkovém objemu 32% ( $V_{0,32}=0,32 \cdot V_{1,00}$ ) – viz obr. 5.4



**Obr. 5.3** Srovnávací 3D výpočtové modely s využitím symetrie – varianty magnetů: plný prstenc  $V_{1,00}$  (vlevo), hranoly  $V_{0,50}$  (uprostřed), tyče  $V_{0,64}$  (vpravo)

Na obr. 5.4 *vlevo* je drátovým modelem růžově znázorněna výpočtová oblast s použitými okrajovými podmínkami: master/slave po stranách meridiálního řezu – tj. podmínka identického magnetického pole, a dále defaultní Neumannovy podmínky tečností siločar intenzity magnetického pole na zbývajících plochách. Zelené ohraničení označuje kontrolní roviny průběhu pole.

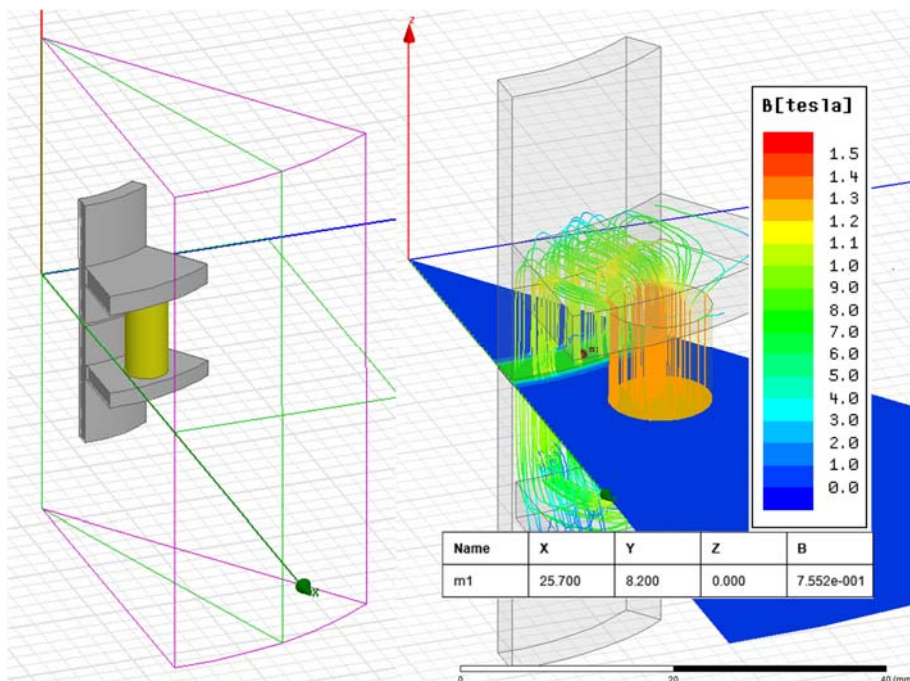
Parametry základní srovnávací verze materiálu magnetu byly zvoleny jako:  $B_r=1,3T$  a  $H_c=950kA/m$ . Jeho relativní permeabilitu lze dle [60] určit jako:

$$\mu_r = \frac{B_r}{\mu_0 H_c} \tag{5-1}$$

Magnetu tedy odpovídá hodnota  $\mu_r \doteq 1,089$ . Obr. 5.4 *vpravo* ilustruje způsob vyhodnocení indukce a umístění kontrolního místa – zde bodu. Při použití základního materiálu magnetu pro všechny varianty uspořádání magnetů byla v tomto místě zjištěna vždy jiná hodnota indukce. Po snížení parametrů  $B_r$  a  $H_c$  při  $\mu_r = konst.$  v simulacích u variant s *větším* objemem v poměru:

$$B_{r \text{ větší}} = B_{r \text{ 0,32}} \frac{V_{0,32}}{V_{\text{větší}}} \tag{5-2}$$

se však podařilo dosáhnout zde s velmi dobrou přesností vždy stejné hodnoty indukce. Tímto přepočtovým způsobem na základě poměru reálného vůči plnému objemu lze a dále bude pracováno i s materiálovými parametry magnetu ve 2D modelu.



Obr. 5.4 Hranice výpočtové oblasti varianty  $V_{0,32}$  (*vlevo*); vyhodnocení indukce v kontrolním místě se zobrazením siločar (*vpravo*)



Hypotéza je tedy ověřena jako správná a způsob převodu 3D úlohy na 2D problém ověřen jako korektní, a také velmi vhodný – výpočtová a časová náročnost 3D řešení se totiž ukázala být i v případě využití periodicity v kombinaci s častou změnou vstupních parametrů jako neúnosně velká.

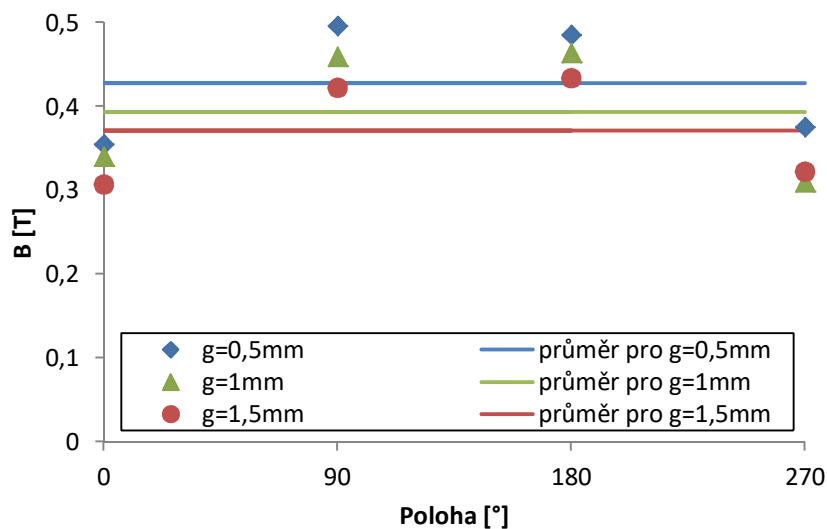
Další krok experimentálního ověření indukce má pro simulaci poměrně velkou důležitost, protože na rozdíl od modelu reflektuje i vliv skutečných, neidealizovaných okrajových podmínek – tedy určitého vlivu blízkého okolí ucpávky, skutečně použitých materiálů (oceli) a také nutných prvků zajišťujících uchycení prototypu, které ale musely být kvůli využití axisymetrie z modelu vyloučeny.

Prvotní odhad katalogových parametrů materiálu a na jejich základě odvozená jeho relativní permeabilita pak mají význam jakési vztažné hladiny, v jejíž blízkosti se musí finálně určené parametry modelu pohybovat. Bez ní by znalost samotné reálné hodnoty indukce v kontrolním místě prototypu neměla význam – až v kombinaci s co nejuvěrnějším 3D, či po přepočtu na reálný objem magnetů 2D modelem, ji lze využít coby cílové hodnoty, které chceme v kontrolním místě na modelu dosáhnout, a to změnami parametru  $H_c$  nebo  $B_r$  magnetu při zachování odhadnuté hodnoty  $\mu_r$ .

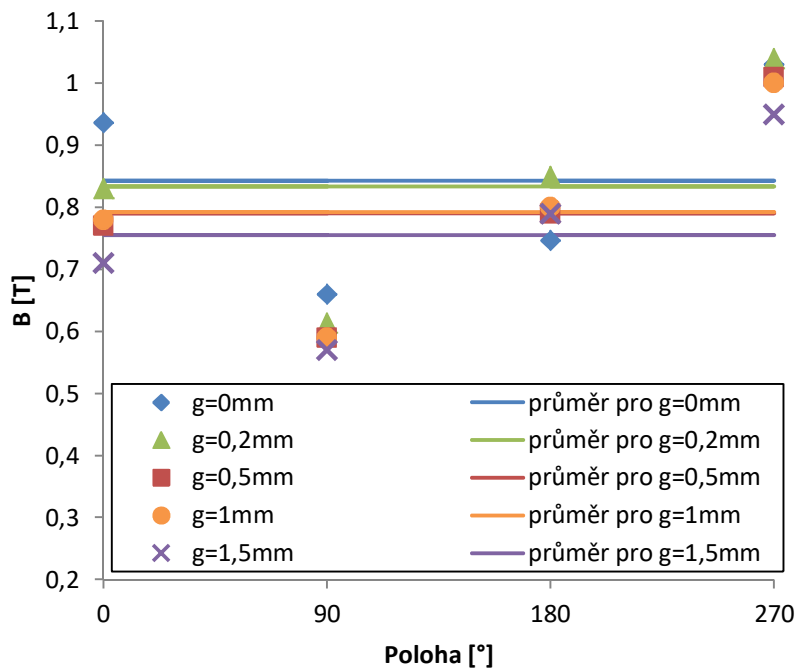
Experimentální ověření zajistili doktoři Rostislav Huzlík z ÚVSSR a Zbyněk Strecker z ÚK, odkud byla také zapůjčena použitá Hallova sonda, a probíhalo ve dvou fázích: nejdříve během příprav experimentální sestavy a prvních zkušebních testů na nedokončené podobě prototypu s nezakosenými čely těsnicí spáry a při použití polovičního počtu magnetů (tj. 10 ks do matrice nasázených ob jednu díru) – varianta 1; a posléze už na zcela dokončené a k finálnímu testování připravené ucpávce s navrženým zkosením a plným počtem magnetů – varianta 2. Jako kontrolní místo byla pro svou dostupnost zvolena mezera mezi pólovým diskem a trubicí rotoru o teoreticky konstantní velikosti 1mm – viz obr. 5.5. Měření probíhalo na několika nastavených hodnotách šířky těsnicí spáry  $g$ , a to vždy na čtyřech místech po obvodu mezery, vzdálených od sebe vždy o úhel  $90^\circ$ . Grafy na obr. 5.6 a 5.7 prezentují naměřené údaje v 1. a 2. variantě.



**Obr. 5.5** Měření indukce po obvodu vnější mezery mezi pólovým diskem a rotorem na finální verzi ucpávky (varianta 2)



Obr. 5.6 Výsledky měření indukce na variantě 1, tedy s polovinou magnetů a nezkosnými čely

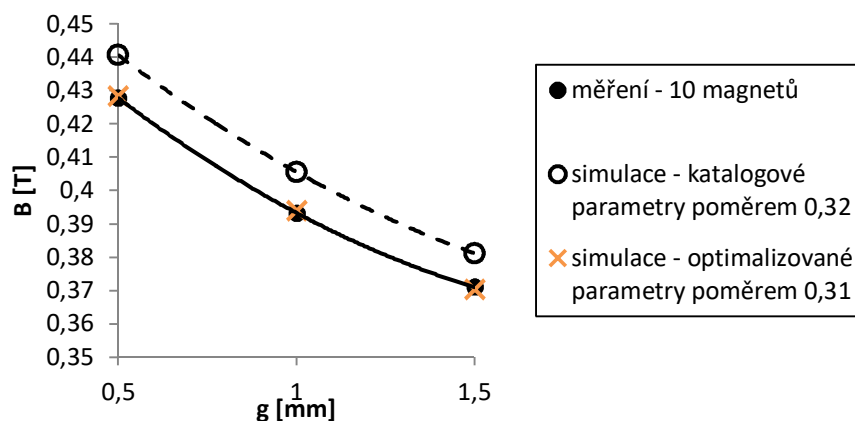


Obr. 5.7 Výsledky měření indukce na variantě 2, tedy s plným počtem 20 magnetů a zkosnými čely

Lze vidět, že hodnota indukce po obvodu v obou případech relativně silně kolísá. Nejpravděpodobnějším důvodem tohoto jevu je nedostatečná sousost statorové a rotorové části. A je to právě tentýž faktor nesousosti, který bude mít později také významný vliv i na experimentálně dosažené výsledky tlakové únosnosti ucpávky. Jeho negativní vliv v této fázi lze ovšem docela dobře eliminovat použitím průměrné hodnoty indukce pro jednotlivé šířky  $g$ , a tyto průměry použít jako cílovou hodnotu v mezeře mezi pólovým diskem a rotorem, na kterou budou laděny parametry modelu magnetu dříve zmíněným způsobem. Obr. 5.8 ilustruje zcela jasný trend klesající průměrné velikosti indukce v kontrolním místě s rostoucí velikostí spáry  $g$

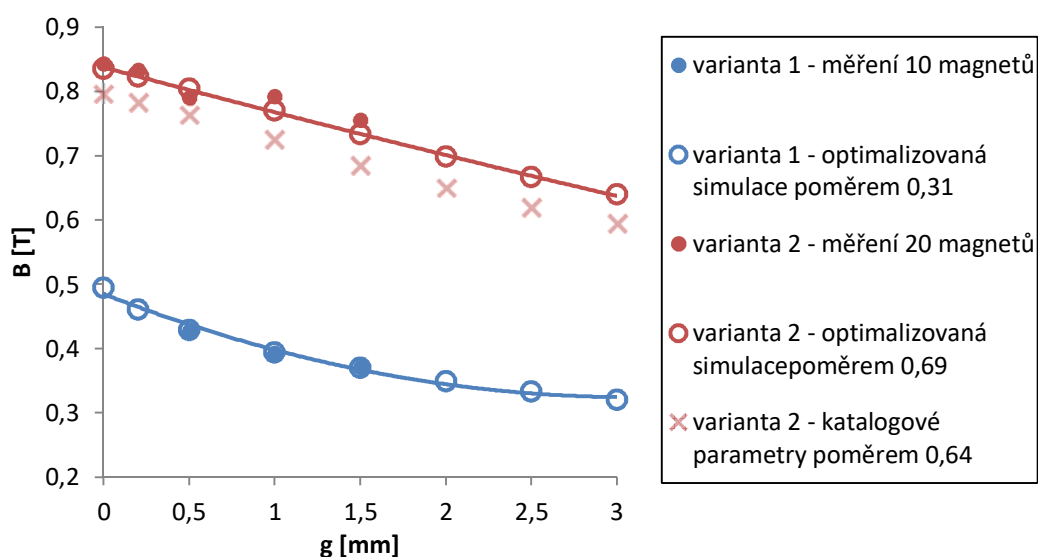


měřené varianty 1. Tento trend se podařilo takřka přesně zreprodukovat i simulačně - při zeslabení základních parametrů 2D modelu magnetu<sup>34</sup> v poměru 0,32 - a v podstatě přesného řešení bylo dosaženo při snížení v poměru 0,31.



Obr. 5.8 Ladění parametrů 2D modelu magnetu varianty 1

Obr. 5.9 srovnává výsledky měření i simulací obou variant. Parametry finální varianty 2 bylo potřeba optimalizovat o něco vyšším poměrem než bylo předpokládáno. Tento virtuální objem navíc lze připsat provedeným úpravám, jako např. zkrácení trubky rotoru ve snaze minimalizovat házení, a tudíž těžko definovatelné změně okrajových podmínek, či nepřesnosti měření.



Obr. 5.9 Srovnání výsledků měření a hledání optimálních parametrů 2D modelu magnetu pomocí simulací

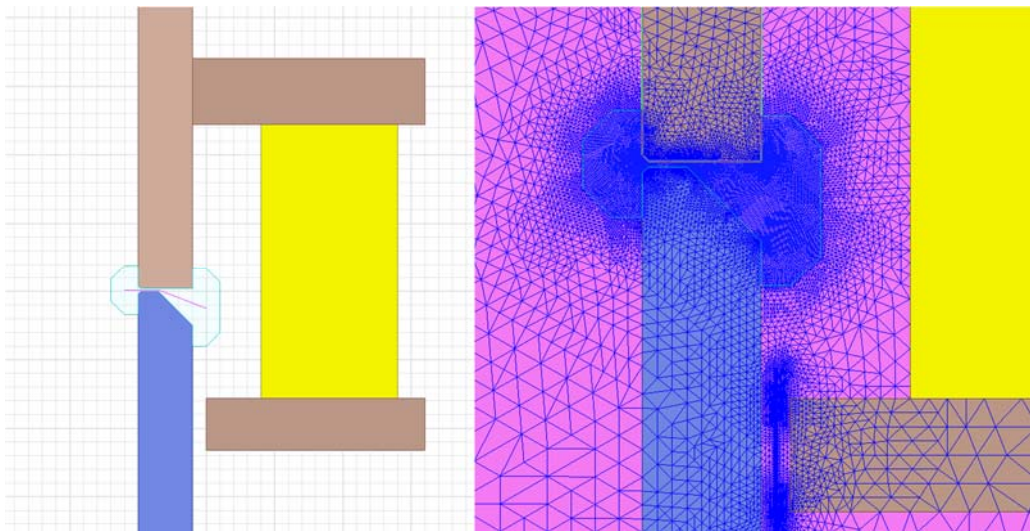
<sup>34</sup> Základní parametry materiálu NdFeB N42 reálně použitých magnetů byly oproti prvotním 3D simulacím, ověřujícím pouze hypotézu o objemovém přepočtu, stanoveny jako:  $B_r = 1,29\text{T}$ ,  $H_c = 836\text{kA/m}$ ,  $\mu_r = 1,228$ , což odpovídá minimálním zaručeným hodnotám dle výrobce.

Konečné hledané parametry 2D reprezentace prstence dvaceti tyčových magnetů reálného provedení zdroje magnetického pole prototypu finální varianty axiální ucpávky byly tedy stanoveny vynásobením základních zaručených parametrů materiálu NdFeB N42 poměrem 0,69 jako:  $B_r=0,89T$ ,  $H_c=576,84kA/m$ ,  $\mu_r=1,228$ .

### 5.1.3 Výpočtový model experimentální axiální ucpávky

Po určení všech potřebných vstupních parametrů můžeme přistoupit k simulacím magnetostatického pole v těsnici spáry  $g$ . Kompletně parametrická geometrie modelu finální varianty ucpávky dovoluje snadnou změnu jeho rozměrových poměrů a umožnila tak již dříve nalézt vhodnou podobu zkosení čel, v kapitole 4 již uvedenou. Proměnnými pro další práci tak zůstávají pouze šířka těsnicí spáry  $g$  a zvolený objem aplikovaného množství každé ze tří vybraných magnetických kapalin.

Obr. 5.10 *vlevo* zobrazuje detail použitého modelu, ne který bude soustředěna další pozornost: barvy označují klasicky *žlutě* – virtuální prsteneц plného permanentního magnetu s parametry určenými výše, *modře* – trubka rotoru (ocel S235), *hnědě* – trubka statoru a pólové disky<sup>35</sup> (ocel S235), *bledě modře* - oblast blízkého okolí štěrbin nemá přiřazen žádný materiál, jedná se pouze o prostor, na kterém je zadána generace extra jemné sítě (viz obr. 5.10 *vpravo*), kvůli přesnému určení rozhraní MF. Zbytek okolí má defaultně parametry vakua, potažmo vzduchu. Okrajové podmínky aplikované na vzdálené hranici řešené oblasti odpovídají nulovému vektorovému potenciálu.

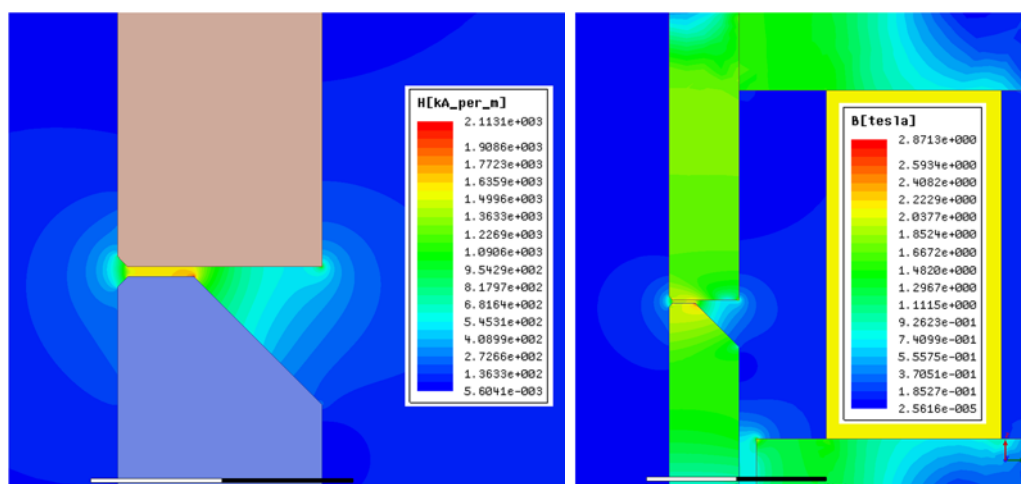


**Obr. 5.10** Detail zájmové oblasti modelu s naznačenou lomenou kontrolní čarou (*vlevo*) a v oblasti generovaná trojúhelníková výpočtová síť (*vpravo*) – zhuštění v prostoru těsnicí spáry i pod pólovým diskem bylo zadáno

Protože hodnota indukce bude po délce rozhraní saturované MF stejná, je možné ji prakticky vyhodnocovat v kterémkoliv místě. Lomená čára vedoucí skrz štěrbinu  $g$  tvoří linii, po jejíž délce bude vykreslována hodnota indukce. Její průběh mezi

<sup>35</sup> Tloušťka disků byla jedním z parametrů, které měly na skutečném prototypu nakonec mírně odlišné rozměry oproti návrhu na obr. 4.7. Tyto změny jsou do modelu z větší části zahrnuty.

dvěma body, které svou polohou odpovídají aktuálnímu rozhraní MF, není pro určení kapacity ucpávky podstatný. Pro rovnici (2-20) má význam pouze jejich rozdíl. Přejít z oblasti MF do okolního prostoru se projeví určitým skokem v hodnotě indukce, různě výrazným pro tu kterou konkrétní kapalinu. Zalomení kontrolní čáry eliminuje vliv blízkosti vnějšího rohu trubky statoru v případě, že by čára vedla přímo. V jeho těsném okolí totiž intenzita pole prudce narůstá, což zbytečně esteticky narušuje průběh grafu. Na obr. 5.11 *vlevo* lze ověřit, že provedené hlavní zkosení na vnější straně má za následek pozvolnější přechod intenzity od vyšších hodnot směrem k nižším a naopak na vnitřní straně je tento přechod prudký.



Obr. 5.11 Intenzita magnetického pole v těsnici spáře (*vlevo*) a průběh indukce v magnetickém obvodu (*vpravo*)

Díky tomu, že v takovéto konfiguraci je většina objemu aplikované MF akumulována v části s pozvolnějším přechodem, zvýšením působícího tlaku vyvolaný určitý posun vnitřního rozhraní směrem doprava a následný přesun určitého objemu MF směrem do prostoru s větším množstvím MF, vyvolá na pravé straně jen malý posun vnějšího rozhraní. Přírůstek intenzity (a tomu úměrně indukce dle B-H křivky aplikované MF) na vnitřním rozhraní vyrovná dle rovnice (2-20) přírůstek působícího tlakového diferenciálu, aniž by kvůli tomu docházelo k výrazným přesunům objemu MF (viz též obr. 5.17). Obr. 5.11 také potvrzuje předpoklad shodného průběhu izolinií indukce a intenzity pole ve volném prostoru.

Obr. 5.12 je kontrola dostatečné intenzity magnetického pole ( $H > H_{MS} \approx 300$  kA/m – *žlutá oblast*) v celém prostoru předpokládaného výskytu MF (*černá oblast* odpovídá v experimentu použitému maximálnímu množství 0,4ml aplikované MF, v teoretické poloze při působení kritického tlakového diferenciálu).



Obr. 5.12 Kontrola zajištění saturace MF

## 5.2 Výsledky simulací magnetického obvodu finální varianty

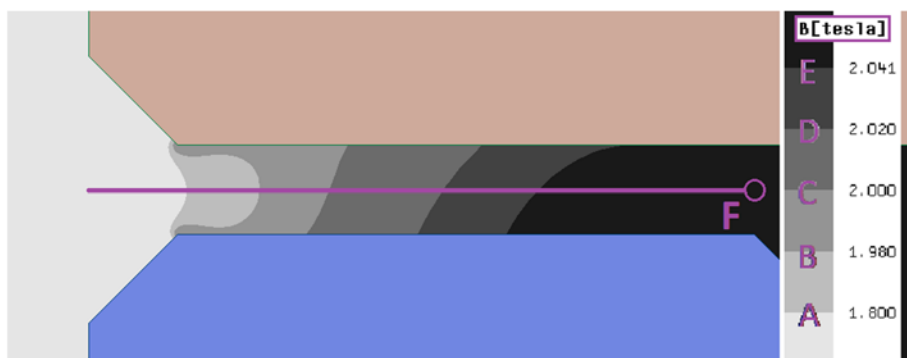
Ačkoliv samotná koncepce experimentu s využitím soustruhu umožňuje zkoumat vlastnosti ucpávky při různě nastavených šířkách spáry  $g$ , po prvotních pokusech byl tento původní záměr přehodnocen, a to především s ohledem na velkou časovou náročnost samotné experimentální činnosti a po většinu času nutnou obsluhu dvěma osobami. Pro další zkoumání proto byla vybrána jediná stálá hodnota šířky spáry  $g=0,2$  mm, která je výsledkem kompromisu mezi snahou o co nejvyšší parametry magnetického pole a rozumným chodem testovacího standu, vzhledem k poměrně obtížnému vymezení pracovní polohy částí ucpávky.

Dále byly určeny dvě konečné hodnoty aplikovaného objemu každé ze tří použitých magnetických kapalin, pro které bude vyhodnocena hodnota kritického tlakového spádu, a to: 0,2ml a 0,4ml. Stanovení odhadu jeho teoretické velikosti za idealizovaných podmínek přesně známé geometrie, klidného souosého chodu a de facto při zanedbání vlivu rotace a dalších faktorů - jak ovšem postupují také autoři, z nichž tato práce čerpá - lze provést ve třech krocích: nejdříve určit vnitřní rozhraní MF, které je shodné pro všechny objemy, následně při znalosti aplikovaného množství MF určit vnější rozhraní, a nakonec po zahrnutí vlivu magnetizační křivky kapaliny vyhodnotit z rozdílu indukci na rozhraních dle rovnice (2-20) kritický tlak.

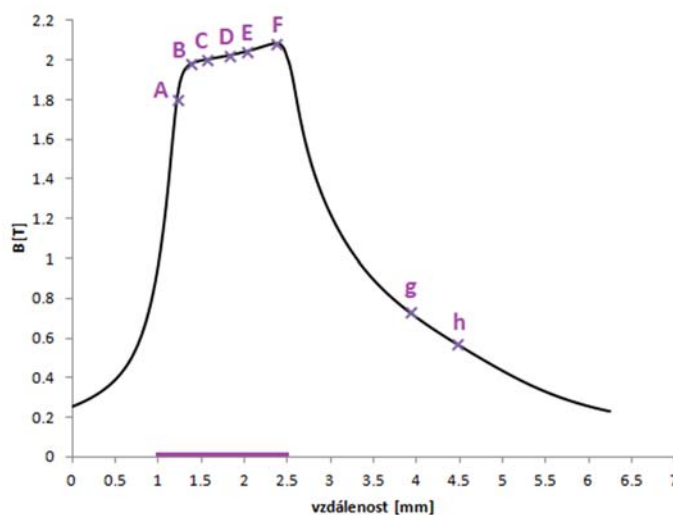
### 5.2.1 Určení polohy vnitřního rozhraní

V kapitole 2.3.5 bylo uvedeno, že ke ztrátě stability a selhání těsnění dochází ve chvíli: „kdy se objem MF zdeformuje působením vnějšího tlaku natolik, že bod kontaktu rozhraní kapaliny a hřídele se nachází v místě nejvyšší intenzity magnetického pole“ [111]. V téže kapitole, ale článku [114], určili autoři toto místo jako vrchol křivky průběhu indukce po délce kontrolní čáry ve štěrbině  $g$ . Podívejme se ale detailněji na situaci v nejužším místě naší experimentální ucpávky na obr. 5.13 a 5.14. Jednotlivé přechody či izolinie indukce odpovídají i potenciální kritické poloze vnitřního rozhraní. Pokud bychom za ni dle průběhu indukce štěrbinou  $g$  na obr. 5.14 označili místo vrcholu křivky  $F$ , zjistili bychom při bližším prozkoumání rozložení indukce napříč štěrbinou, že se bod  $F$  nachází sice v místě s nejvyšší indukcí zaznamenanou podél kontrolní čáry (a to díky blízkosti vrcholku zkosení), avšak tato izolinie již nedosáhne od stěny rotoru až ke stěně statoru. Kritické poloze rozhraní bude příslušet spíše tvar izolinie, který je ke stěně statoru právě tečný – tedy

přechodu značenému E. Rozdíl v hodnotě indukce je sice malý a vliv na kritický tlak také, ovšem pokud nás zajímá přesné určení polohy rozhraní, navržený přístup je přesnější.



Obr. 5.13 Určení kritické polohy vnitřního rozhraní

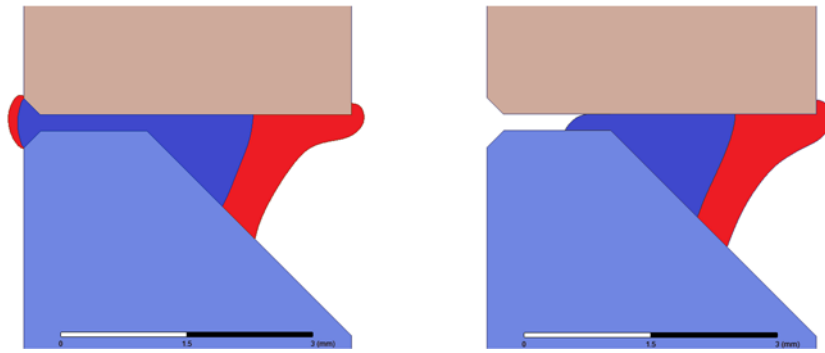


Obr. 5.14 Průběh indukce po délce kontrolní čáry ve spáře  $g$  (body  $g$ , resp.  $h$  odpovídají předpokládaným polohám vnějšího rozhraní odpovídajícímu 0,2ml, resp. 0,4ml MF)

### 5.2.2 Určení polohy vnějšího rozhraní

Poloha vnějšího rozhraní při známém objemu a známé poloze vnitřního rozhraní byla určena pomocí modelářských funkcí programu Maxwell postupným ručním iterováním: prvotní nástřel tvaru rozhraní podél odhadem zvolené izohodnoty indukce byl obkreslen pomocí splajny, vzniklý obrazec mezi vnitřním a vnějším rozhraním poté otáčován a pomocí funkce *measure* zjištěn objem vzniklého kroužku MF. Postupnými úpravami polohy splajny bylo možné získat hranici přibližně odpovídající aplikovanému množství MF. Obr. 5.15 vlevo zobrazuje polohu MF při  $\Delta p = 0$  (hodnoty indukce na obou rozhraních jsou totožné), vpravo při kritickém tlaku.

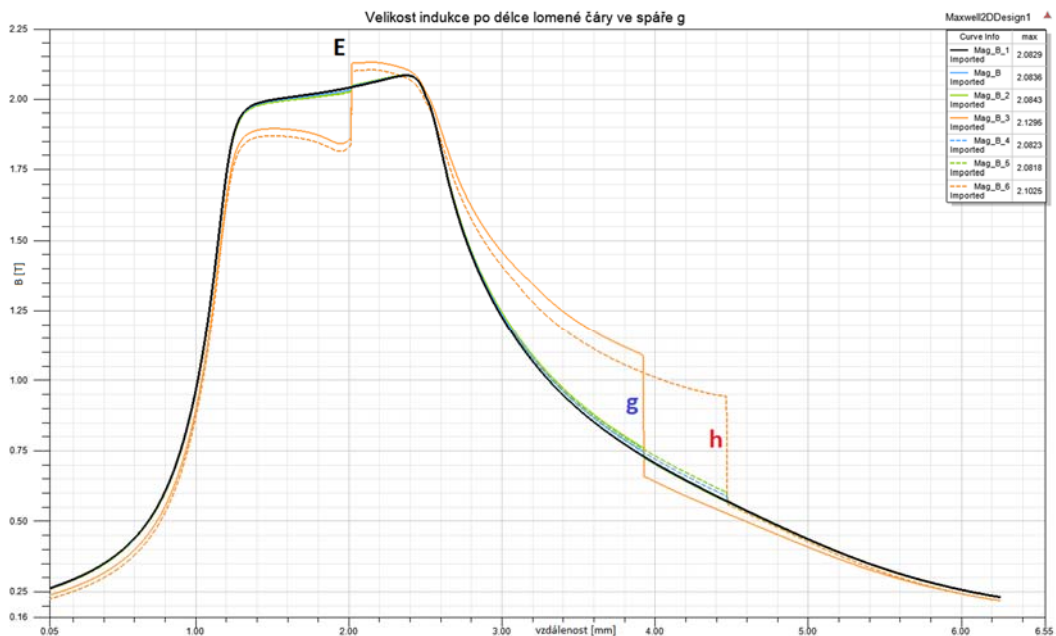
5.2.2



Obr. 5.15 Poloha zvoleného množství MF (0,2ml modře; 0,4ml navíc červeně) při  $\Delta p=0$  (vlevo) a při kritickém tlaku (vpravo)

### 5.2.3 Vyhodnocení kritických tlaků

Po přiřazení materiálových parametrů té které magnetické kapaliny vzniklému obrazci průřezu MF kroužkem v kritické poloze bylo možné určit skutečnou hodnotu indukce na rozhraní saturované kapaliny a z těchto údajů spočítat teoretickou kapacitu. Obr. 5.16 srovnává průběhy indukce pro jednotlivé kapaliny: černě je zvýrazněn průběh bez přítomnosti MF, modře pro APG1134, zeleně pro APGW10, oranžově pro MFR122EG – vždy plnou čarou pro objem 0,2ml a čárkovanou pro 0,4ml. Zlomy v jednotlivých průbězích odpovídají přechodu přes vnitřní rozhraní (*E*) a vnější rozhraní (*g*, resp. *h*) pro 0,2ml, resp. 0,4ml. Sotva znatelné změny průběhu v případě ferokapalin byly očekávané (viz [114]), značný rozdíl v případě MR kapaliny byl připsán řádově vyšší hodnotě její saturační magnetizace.



Obr. 5.16 Skutečný průběh indukce šterbinou bez a za přítomnosti testovaných magnetických kapalin



Teoretické hodnoty kritického tlaku jednotlivých zkoumaných variant shrnuje následující tabulka. Nikterak překvapivě má na jeho výslednou velikost nejvýraznější vliv hodnota saturační magnetizace použité kapaliny.

Tab. 5.2 Vyhodnocení kritického tlaku na základě simulací

druh MF	Objem [ml]	$B_1$ [T]	$B_0$ [T]	$\Delta B$ [T]	$M_S$ [kA/m]	$\Delta P_{krit}$ [kPa]
APG1134	0,2	2,045	0,749	1,297	17	22,041
	0,4	2,044	0,589	1,455	17	24,732
APGW10	0,2	2,048	0,762	1,286	32	41,152
	0,4	2,046	0,603	1,443	32	46,189
MRF122EG	0,2	2,125	1,089	1,037	361	374,285
	0,4	2,098	0,943	1,156	361	417,172

### 5.3 Vnitřní proudění v doméně magnetické kapaliny

5.3

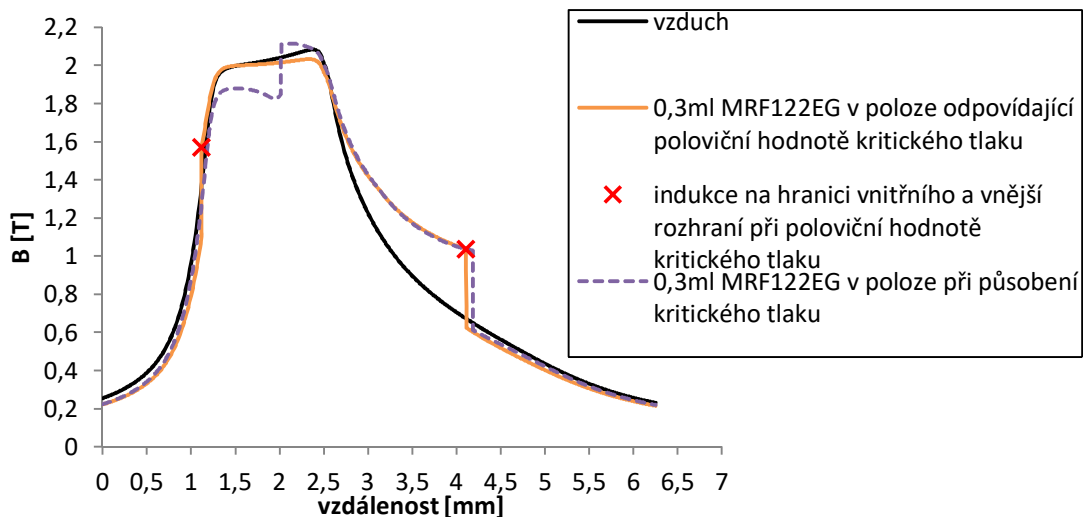
Ověření vzniku a podoby vnitřního proudění v zadané doméně těsnícího MF kroužku bylo nakonec provedeno pouze pro případ MR kapaliny. Rozhodnutí k tomuto omezení bylo učiněno na základě třech okolností:

- 1) Jak se v průběhu práce ukázalo, podoba sekundárního proudění nehraje v návrhovém procesu ucpávky nijak významnou roli pro případ využívající zjednodušujících předpokladů konstantního rozhraní saturované kapaliny v pracovní poloze, který byl využit pro ranou fázi vývoje, jíž se tato práce zabývá. Respektive je v ní možné toto proudění dokonce zcela ignorovat (větší důraz na hlubší pochopení vnitřních dějů by ovšem mohl být žádoucí v pozdějších fázích vývoje).
- 2) MR kapalina umožňuje díky velkému magnetoviskóznímu efektu korektní použití jednoduchého binghamského modelu, který v případě, kdy je kapalina saturovaná, nepotřebuje vstupní údaje o konkrétním rozložení indukce v doméně, na rozdíl od případu ferokapaliny při uvažování proměnlivé viskozity dle rovnice (2-16).
- 3) Podoba vnitřního proudění ve ferokapalině ucpávky je v literatuře již relativně dobře zdokumentována, což o MR kapalině říci nelze. V tomto ohledu tedy může být přínosné se o jeho modelování zde pokusit.

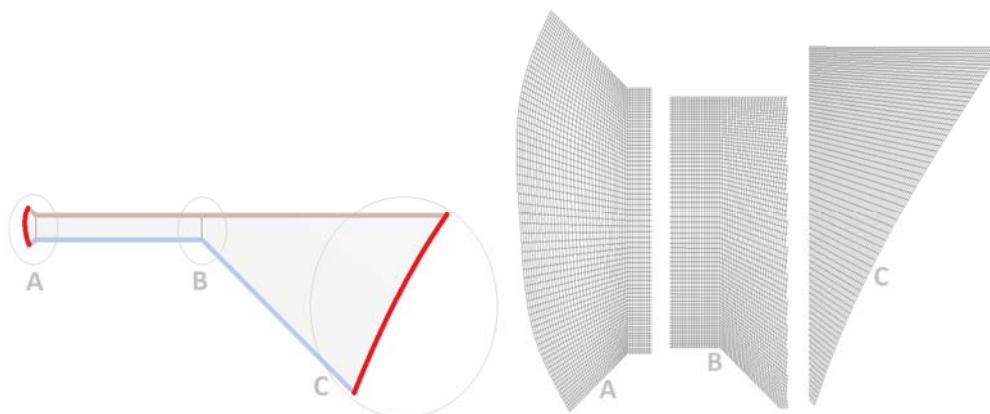
Tvar 2D výpočtové domény jednoho řešeného případu odpovídá množství 3ml MRF122EG aplikovanému do štěrbině konečné podoby experimentální ucpávky (varianta 2) při  $\Delta p = 0,5 \Delta p_{krit}$ . CFD výpočet byl proveden v programu Ansys Fluent 17.2 a preprocessing v nástrojích balíku Ansys Workbench 17.2 (DesignModeler, Mesh). Prvním krokem bylo vytvoření výpočtové domény v Maxwellu a nalezení polohy MF při  $\Delta p_{krit}$ , který byl určen jako součin rozdílu indukci na rozhraní a hodnoty  $M_S$  kapaliny. Při  $\Delta p = 0,5 \Delta p_{krit}$  musí tedy poloha rozhraní být taková, aby rozdíl hodnot indukci na vnitřní a vnější straně byl poloviční. Průběh indukce takto upravenou polohou lze zhodnotit na obrázku 5.17. V dalším kroku byla



geometrie této domény přenesena do prostředí Workbench, následovala její dekompozice a vytvoření strukturované ortogonální výpočtové sítě s vysokou jemností (70 buněk napříč mezerou  $g$ ) – obr. 5.18.



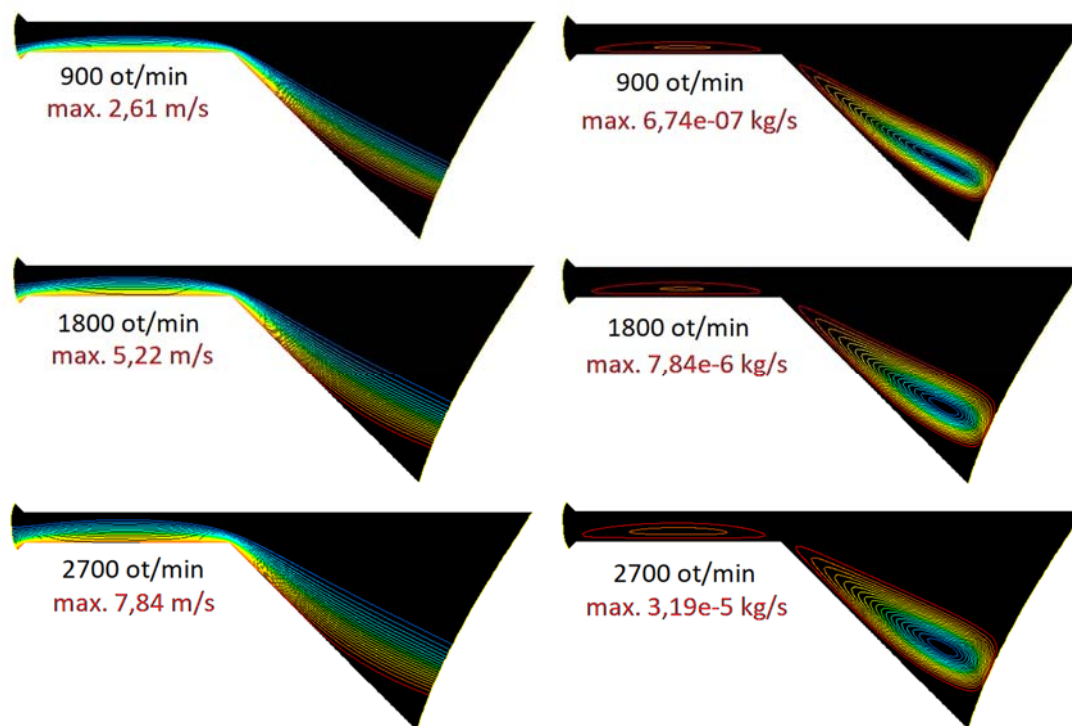
Obr. 5.17 Průběh indukce doménou 0,3ml MRF122EG ve dvou polohách



Obr. 5.18 Dekomponovaná výpočtová doména MR kapaliny s označením okrajových podmínek (vlevo): moving (rotating) wall – modře (stěna rotoru), stationary wall – hnědě (stěna statoru), symmetry – červeně (volné rozhraní MF); detaily strukturované ortogonální sítě 51 450 buněk (vpravo)

Úloha byla ve Fluentu řešena s pomocí *pressure-based steady* solveru na laminárním modelu jako *axisymmetric swirl flow*, s okrajovými podmínkami dle obr. 5.18, pro úhlové rychlosti 900, 1800 a 2700 ot/min. Byl použit Hershel-Bulkleyův model viskozity pro binghamskou kapalinu s parametry:  $k=0,042 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ,  $n=1$  a mezí toku 35 kPa. Následoval postup dle příručky Fluentu k řešení úloh s vysokým stupněm provázanosti pohybových rovnic, vznikajícím v důsledku přítomnosti rotace. Nejprve na prvním řádu přesnosti (*upwind scheme*) pro rovnice hybnosti a obvodové rychlosti bylo vždy na několika tisíci iteracích zvlášť ustaveno pole obvodových rychlostí, poté zvlášť pole rychlostí v rovině domény (meridiálním řezu) a nakonec bylo provedeno simultánní řešení všech rovnic. Proces byl zopakován i pro druhé řády přesnosti. Další nastavení schémat: *pressure-velocity*

*coupling* vždy *SIMPLE*, *pressure* vždy *Standard*. Pro zajištění konvergence začínal výpočet se sníženou úhlovou rychlostí (90 ot/min), která byla postupně zvyšována až na cílové hodnoty. Výsledné rozložení obvodových rychlostí a proudové funkce je na obr. 5.19:



**Obr. 5.19** Řešení pole obvodové rychlosti (vlevo) a proudové funkce (vpravo): barevná škála odpovídá nulovým (modrá) až maximálním (červená) hodnotám

Z výsledků lze usuzovat, že větší část MR kapaliny (vyplňující celý černý prostor, od horní stěny statoru, až po první modrou linii nulové obvodové rychlosti) se zřejmě během rotace nachází ve stavu pod mezí toku, tedy de facto v pevném skupenství, zatímco v úzkém pásmu v blízkosti stěny rotoru existuje obrovský rychlostní gradient. Průběh proudové funkce zase ukazuje vznik výrazného sekundárního vírového proudění v pravé oblasti a také menší vír v místě spáry *g*.

Ačkoliv by použitý postup bylo v zásadě možné využít i pro ferokapaliny a pokusit se simulovat proudění s proměnlivou viskozitou v závislosti na indukci v daném bodě magnetostatického pole, z důvodu velmi složité realizace provázání prostředí řešičů magnetického pole a CFD to z časových důvodů nebylo možné provést. Teoretický postup vyžaduje přenos hodnot indukce v doméně ferokapaliny, zjištěných v uzlových bodech trigonometrické sítě MKP, na síť použitou pro CFD. Takový postup by zahrnoval využití *uživatelsky zadaných funkcí* (UDF) ve Fluentu, konkrétně použití makra `DEFINE_PROPERTY`, pomocí kterého je možné definovat různou viskozitu v závislosti na souřadnicích té které buňky. Situaci ovšem výrazně komplikují mimo jiné i nekompatibilní formáty exportu a importu prostředí Maxwell a Workbench (pozn.: obě prostředí navíc pro řešení axisymetrických úloh uvažují jiné osy rotace – pro lepší přehlednost jsou proto zde uvedené grafické výstupy z Workbenche již orotovány do polohy, která odpovídá Maxwellu).

## 6 EXPERIMENT

Cílem experimentů bylo primárně ověření principu funkce navrhované axiální FHD ucpávky v použití s FF i MR kapalinou, a potažmo též prověření celého konceptu využití magnetických kapalin jako těsnicího média. Výsledky testování jsou tak odpovědí na otázku, zda je na základě teoretických poznatků z odborných zdrojů, a při využití relativně nenáročných technologií, možné vyrobit funkční prototyp, a zda má smysl se dále zabývat možnostmi využití této technologie i v náročnějších podmínkách těsnění kapalin.

Celý experiment probíhal v laboratoři OFI VK ve spolupráci a s velkou pomocí jejich technických pracovníků, panů Bronislava Kusého, Karla Večeři a inženýra Martina Hudce.

### 6.1 Příprava experimentu

#### 6.1.1 Postup a použité přístroje

První fáze testování byla zaměřená na obecné seznámení se s chováním magnetických kapalin v těsnicí spáře ucpávky, a to v závislosti na šířce spáry, otáčkách rotoru a přibližném množství aplikované MF, a probíhala převážně na variantě ucpávky č. 1 (10 magnetů, rovná čela) s otevřenou trubicí statoru, umožňující pozorování vnitřních dějů endoskopem (na obr. 6.2 *vlevo* lze vidět jeho trubičku, s objektivem vsunutým do blízkosti spáry).

Primárně sledovanou veličinou ve druhé fázi (probíhající na variantě ucpávky č. 2, tj. 20 magnetů, zkosená čela), s uzavřenou trubicí statoru, byla kritická hodnota přetlaku vzduchu, měřená původně budíkovým tlakoměrem, později kvůli jeho přílišnému rozsahu a malé citlivosti v nízkých hodnotách nahrazeného digitálním snímačem (BD Sensors, DMP 331, rozsah 0 až 6 bar abs.), umístěným na trubičce přívodu vzduchu se zpětným ventilem. Hodnota kritického přetlaku byla následně vždy snížena na polovinu, a poté bylo zkoumáno chování těsnění při zvyšování otáček. Tento přístup vychází z poznatků kapitol 2.3.5 a 2.3.6. Tlakování bylo prováděno připojenou ruční pumpou a otáčky měřeny digitálním fotootáčkoměrem. Celkový pohled na experimentální zařízení před výměnou tlakoměru je na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Celkový pohled na experimentální sestavu

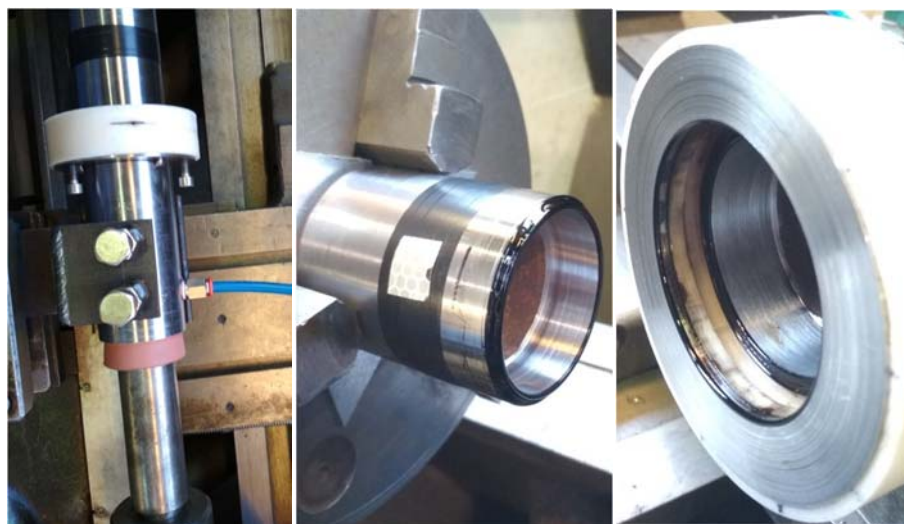
### 6.1.2 Úpravy prototypu

6.1.2

Na obr. 6.2 *vlevo* lze vidět přípravek, pomocí kterého bylo těleso statoru upnuto do opěrky soustruhu. Kapalina byla do spáry umisťována za pomoci injekční stříkačky s jehlou 18G, pro niž byla v matrici magnetů vyvrtána díra, vedoucí stěnou mezi dvěma otvory pro magnety. Během aplikování bylo množství odhadnuto dle stupnice stříkačky a přesně určeno až dodatečně, podle rozdílu hmotnosti stříkačky před a po aplikování. Matrice nabitá 20ks magnetů je na obr. 6.2 *vpravo*. Po vytištění bylo potřeba obrobit vnitřní průměr, aby mohla být přesně osazena na trubku statoru. Jednotlivé díry pro magnety bylo dále potřeba kvůli nedostatečné přesnosti 3D tisku a toleranci průměrů magnetů vystružit ručním výstružníkem 10H7. Magnety mohly být postupným pootáčením nabitě matrice postupně vysouvány za pomoci tří šroubů a průchozích závitů v pólovém disku – viz obr. 6.3 *vlevo*. Na něm lze vidět též připojení hadičky přívodu tlaku na boku válce statoru a finální způsob uzavření vnějších čel trubek statoru i rotoru, a to za pomoci gumových zátek. Zkrácená trubka rotoru s reflexní nálepkou pro snímání otáček byla upnutá ve sklíčidle (obr. 6.3 *uprostřed*).



Obr. 6.2 Detail upnutí ucpávky do opěrky soustruhu (*vlevo*), nabitá matrice magnetů (*vpravo*)



Obr. 6.3 Horní pohled na prototyp připravený k testování (*vlevo*); oddělený rotor (*uprostřed*) a stator (*vpravo*) se stopami ferrokapaliny po normálním ukončení testování



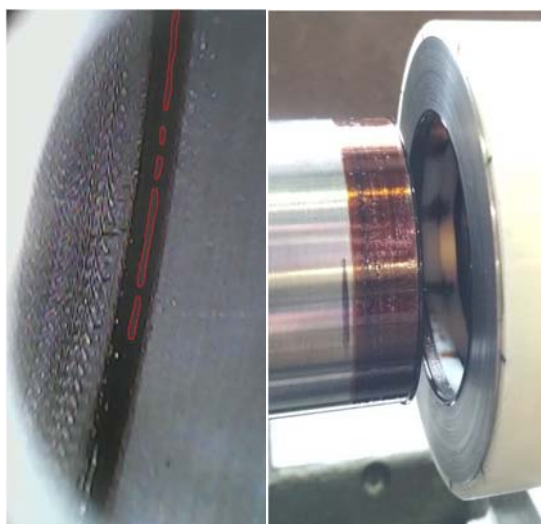
## 6.2 Průběh testování

### 6.2.1 Varianta 1 – první pokusy

První pokusy s polovinou magnetů, nezkosenými čely, s otevřeným statorem, větším množstvím APGW10 (cca 4,5ml) a pro několik nastavení šířky  $g$  prokázaly schopnost kapaliny udržet se v těsnici spáře i při poměrně vysokých otáčkách. Při  $g=0,5$  mm bylo bez problémů dosaženo otáček až 1600 1/min (tj. obvodová rychlost  $\sim 4,5$  m/s), což bylo takřka maximum daného převodového stupně soustruhu, na kterém mělo být celé měření prováděno.

Dále bylo endoskopem pozorováno chování kapaliny při změnách šířky spáry bez otáček rotoru. První trhliny v jinak jednoduše struktuře kapaliny byly zpozorovány přibližně při hodnotě  $g=1,4$  mm (zvýrazněno na obr. 6.4 *vlevo*), kdy byl objem volného prostoru mezery mezi čely trubek již výrazně větší, než aplikované množství ferokapaliny.

Zcela klidný chod varianty s polovičním počtem magnetů dovolil jít do vysokých otáček i při nastavené spáře  $g=0,2$  mm. Po dosažení maximálních otáček převodového stupně ale byly zpozorovány stopy ferokapaliny v mezeře pod pólovým diskem. Vytlačení velkého množství kapaliny na takto úzké spáře  $g$  do oblasti mimo saturační hodnoty intenzity pole mělo totiž v kombinaci s odstředivou silou za následek odtržení určitého objemu FF do sféry vlivu silnějšího pole pod mezerou disku – viz obr. 6.4 *vpravo* po oddělení rotoru a statoru (srovnej s obr. 6.3 *uprostřed* po normálním průběhu testu bez úniku kapaliny).



Obr. 6.4 Trhliny ve ferokapalině při velké šířce  $g$  (*vlevo*) a stopy ferokapaliny uniklé pod pólový disk (*vpravo*)

### 6.2.2 Varianta 2 – určení tlakové kapacity ucpávky

Na základě poznatků z testování první varianty o chování ferokapalin a celkové náročnosti práce s měřicím standem se přešlo rovnou k měření kritické tlakové únosnosti na navrženém zkosení čel, s plným počtem magnetů, pro konstantní šířku  $g=0,2$  mm, dva zvolené objemy MF (0,2ml a 0,4ml) a všechny tři magnetické kapaliny. Měření probíhalo dle následujícího schématu:

- 1) do spáry bylo aplikováno 0,2ml MF
- 2) šetrným ručním přidáváním tlaku byl určen okamžik, kdy došlo k úniku vzduchu (doprovázeného poklesem zaznamenávaného tlaku a charakteristickým zvukem), a hodnota maximálního přetlaku vůči atmosféře zaznamenána
- 3) přetlak byl nově nastaven na polovinu maximální hodnoty
- 4) při pomalém přidávání otáček byla sledována hodnota tlaku a podle aktuálního průběhu bylo v určitý moment měření ukončeno
- 5) do spáry byla doplněna MF do objemu 0,4ml a celý proces byl zopakován

Navržený postup byl dobře uplatnitelný zejména u ferokapalin. Průvodním jevem bodu 4 ovšem bylo i mírné zvyšování tlaku. Důvodem bylo zahřívání ucpávky a vzduchu v ní uzavřeného v případě takto těsné spáry.

Měření každé kapaliny probíhalo v jiný den a opakované vymezení polohy rotoru a statoru mělo za následek její kolísavou míru přesnosti. Ve spojení s jistou mírou házení trubky rotoru, kterou se zcela potlačit i přes různé úpravy nepodařilo, proto obecně nelze dosažené maximální otáčky považovat za skutečně maximální, tedy takové, při kterých ucpávka ztrácí schopnost těsnit. Naopak – experimenty poukázaly na zřejmě velmi malý vliv otáček na těsnicí schopnost této ucpávky při nižším než kritickém tlaku. Alespoň tedy v rozsahu rychlostí, dosažitelných na tomto standu.

Zajímavý jev nastal v případě použití MR kapaliny: v průběhu přidávání tlaku docházelo od určité nezřetelné hodnoty k jeho velmi mírnému poklesu, nikdy ale k jednoznačnému propadu hodnoty a k intenzivnímu úniku vzduchu jako v případě ferokapalin. Intenzita poklesu tlaku rostla s jeho přidáváním do vyšších hodnot. Kritický tlak určený pro MRF122EG tak má poněkud jiný charakter, než je tomu u ferokapalin: je to hodnota, nad kterou už dále tlak kvůli jeho okamžitému rapidnímu poklesu nešlo přidávat.

I průběh zvyšování otáček u těsnění s MR kapalinou měl jinak specifický závěr. Při nastaveném polovičním zátěžném tlaku oproti hodnotě popsaného pseudomaxima, při kterém byl jeho klidový pokles ještě velmi pomalý, začal tento tlak s postupným přidáváním otáček naopak vlivem zahřívání růst. Že toto zahřívání bylo velmi intenzivní se ukázalo záhy – při otáčkách cca 1200 1/min došlo k zastavení rotoru a prokluzu pohonu, neboť zřejmě došlo k odpaření většího množství nosné látky a tedy k prudkému nárůstu tření. Na obr. 6.5 je vidět stav MR kapaliny v místě spáry po této události.



Obr. 6.5 MR kapalina v místě spáry po odpaření určitého množství nosné látky

## 6.3 Výsledky a porovnání se simulací

### 6.3.1 Výsledky experimentu

Výsledky experimentu shrnuje tab. 6.1. Maximální otáčky odpovídající 0,2ml MRF122EG nebyly vyhodnoceny z důvodu chyby v postupu měření a z časových důvodů už je nebylo možné doplnit.

Rozdílnou přesnost ve skutečném množství MF v jednotlivých případech lze připsat použití primitivního způsobu aplikace, využívajícího běžné injekční stříkačky. Pro zajištění větší přesnosti by do budoucna bylo lepší využít speciální mikrostříkačku.

Nelehký úkol vyhodnocení výpovědní hodnoty zde získaných výsledků je blíže diskutován v kapitole 7. Z pohledu výchozích požadavků a očekávání od tohoto experimentu však lze celkově získané poznatky vyhodnotit jako jednoznačně užitečné a k dalšímu pokračování výzkumu tohoto směru spíše povzbudivé.

Tab. 6.1 Shrnutí výsledků experimentálního ověření funkce axiální ucpávky

druh MF	objem [ml]	$M_s$ [kA/m]	$\Delta p_{krit}$ [kPa]	Vstřední obvodová [m/s]	$n_{max}$ [1/min]	poznámka k měření $n_{max}$
APG1134	0,234	17	7,8	4,78	1692	klidný hod, bez výrazného zahřívání
	0,439	17	10,8	4,78	1692	klidný hod, bez výrazného zahřívání
APGW10	0,183	32	17,5	2,26	800	nad touto hodnotou příliš neklidný chod
	0,382	32	26,2	2,54	700	nad touto hodnotou příliš neklidný chod
MRF122EG	0,210	361	103,2	-	-	nebylo měřeno
	0,441	361	179,5	3,39	1200	odpaření části nosné kapaliny

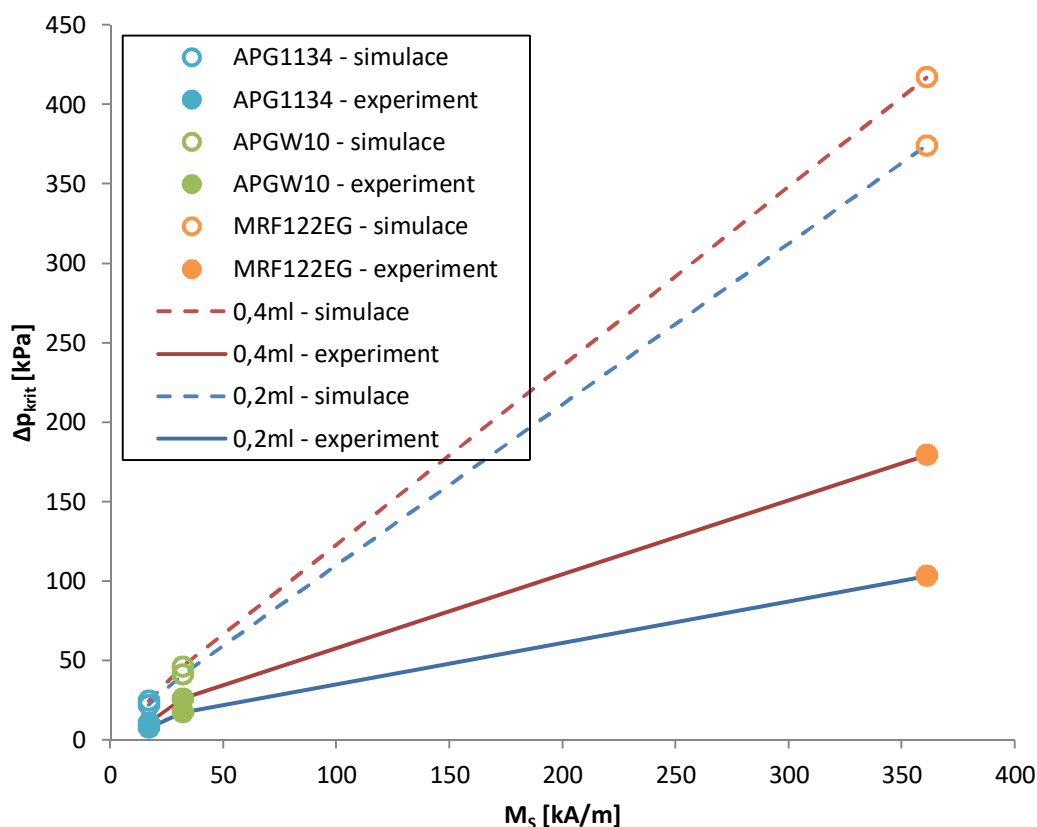
### 6.3.2 Srovnání se simulací a zhodnocení

Na základě srovnání výsledků experimentálního a výpočtového přístupu (viz obr. 6.6 a 6.7) můžeme prohlásit, že skutečná hodnota kritického tlaku je výrazně nižší, než by mohlo být očekáváno z pouhých simulací teoretických parametrů ucpávky. Vezmeme-li ovšem v potaz nejrůznější vlivy, které na rozdíl od případu idealizované varianty, kterou řešíme v simulacích, vstupují do skutečného problému, můžeme stejně tak dojít k závěru, že i jednoznačně zaznamenaný trend nejvýraznější souvislosti mezi hodnotou saturační magnetizace magnetické kapaliny a dosaženou hodnotou kritického tlaku je uspokojivým výsledkem simulací.

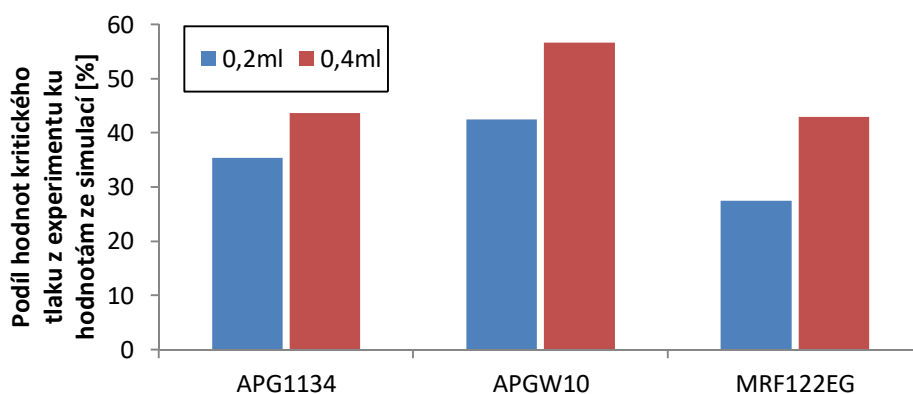
Jak ovšem ukázal experiment, ani v modelu zaznamenaný trend růstu kritického tlaku by pro jeho přibližný počáteční odhad skutečného neidealizovaného případu, v závislosti na okolnostech pohybujícího se v rozmezí cca 30÷50% hodnoty ze simulací, nebyl dostatečným. Například v případě MR kapaliny, u které je v simulacích předpokládána stejná absolutní neprostupnost pro těsněnou látku jako u ferrokapalin, praxe ukázala, že tento předpoklad v případě těsnění vzduchu vůbec



neplatí (situace by však mohla být zase jiná při těsnění kapalných látek). Srovnání je tak zároveň i obecným dokladem pokračující nezbytnosti experimentálního ověřování teoretických vlastností FHD ucpávek, založených na návrhu za zjednodušujících předpokladů, a to přinejmenším do doby, než bude možné většinu reálných vlivů do modelu zahrnout a uspokojivě tak simulovat skutečné provozní podmínky těsnicích aplikací magnetických kapalin. V tomto ohledu je tedy např. v rešerši zmíněné pokračující studium hlubších vnitřních dějů v magnetických kapalinách na mikroskopické úrovni dále nezbytné.



Obr. 6.6 Porovnání kritického tlaku z experimentu a simulací



Obr. 6.7 Procentuální podíl kritických tlaků z experimentu ku hodnotám ze simulací

## 7 DISKUZE

Tématem této práce bylo studium hydrodynamické ucpávky na principu magnetické kapaliny, v kontextu jejího potenciálního využití pro těsnění rotujících částí inovativního konceptu čerpadla s prstencovými motory. Široké rozpětí a mezioborový přesah řešené problematiky si kladl velké nároky na rešeršní část práce. Ta dané téma pokryla od hlubokých teoretických základů a principů využití magnetických kapalin jako těsnicího média, přes popis možných postupů a nutných předpokladů pro samotný návrh konkrétní aplikace, až po analýzu nejsoučasnejších poznatků o specifických aspektech výpočtového modelování magnetických kapalin. Podala také zprávu o stavu současného pokroku na poli využití MFs při těsnění kapalin, což je de facto také konečným cílem i v budoucnu snad nadále pokračujícího výzkumu, jehož příspěvkem mohou být i výstupy této práce.

Jejím hlavním cílem bylo zejména ověření celé prapůvodní idey využití FHD těsnění pro rotor prstencového motoru. Konkrétní zvolený postup byl kombinací numerického modelování a experimentálního testování vlastního prototypu specifické podoby ucpávky - s magnetickou kapalinou těsnící v *radiálním* směru mezi upravenými čely rotující a statické trubky (název konceptu této „*axiální ucpávky*“ odkazoval na převažující směr siločar magnetického pole, nikoli směr těsnění).

Z původního záměru využít zkonstruovaný prototyp pro experimentování s těsněním vody bylo ustoupeno - primárně z časových a kapacitních důvodů. I na testování se vzduchem se však ukázalo, že dříve, než se bude moci přistoupit k pokusům o náročnější způsoby využití FHD těsnící technologie, je potřeba ještě mnohem detailněji prozkoumat všechny aspekty a faktory, ovlivňující vůbec chod a spolehlivost vlastního zařízení. Zkonstruovat perfektně fungující testovací prototyp v relativně krátkém čase a v rámci dostupných výrobních možností se ukázalo jako vysoce náročný úkol, a v ohledu prvního jmenovaného požadavku jako v podstatě nesplnitelný. Přesto i výsledná realizovaná verze dokázala většinu zásadních požadavků splnit, a na ní jednoznačně ověřená funkčnost celého nápadu dokonce i naplnit určitá pozitivní očekávání.

Takto se například podařilo prokázat, že i s nízkou přesností dílů, s ne vždy klidným chodem, nedostatečnou sousostí a určitou mírou házení rotoru, lze dosáhnout přibližně 30÷50% hodnoty teoretické tlakové únosnosti za zcela idealizovaných podmínek naprosté přesnosti vzájemné polohy všech dílů, a dokonce zanedbání jakéhokoliv vlivu odstředivé síly, ačkoliv obvodové rychlosti ve skutečnosti dosahovaly v některých případech hodnoty téměř 5 m/s. Pokud by zde tedy měly být zodpovězeny otázky, položené na počátku kapitoly 4.3, pak odpovědi bude, že:

- Magnetická kapalina se v těsnicí spáře udrží velmi dobře, a to i při poměrně vysokých otáčkách vzhledem k použitému průměru rotoru 50mm. Konkrétně dosáhly až 1692 ot/min, což bylo maximum použitého převodového stupně soustruhu. Hlavním faktorem je zde použité množství kapaliny v kombinaci s nastavenou šířkou  $g$ .
- Tlaková kapacita ucpávky je silně spjata s hodnotou její saturační magnetizace. Nejvyšší jednoznačně udrženou hodnotou je přetlak pouze 26,2 kPa (FF kapalina s vyšší  $M_S$ ), což je 56,7% teoretické maximální

hodnoty. Vzhledem k uvedeným neduhům zařízení to ale lze považovat za poměrně dobrý výsledek, který v simulacích použitou metodu nemusí znedůvěřehodňovat. V případě MR kapaliny pak tato odolávala bez jednoznačného okamžiku ztráty stability až do přetlaku 179,5 kPa, ale vzhledem k současnému stálému postupnému poklesu drženého tlaku ji lze označit za nevhodnou pro těsnění vzduchu. Výsledky při těsnění kapaliny by ovšem mohly být zcela odlišné.

- Těsnicí schopnost jednotlivých kapalin se ukázala jako spíše méně závislá na provozních otáčkách, než bylo očekáváno. Překážkou pro přesné určení jednoznačné kritické hodnoty otáček byla již zmíněná nízká přesnost jak použitého standu (myšleno ve smyslu problematického vymezení přesné vzájemné polohy dílů na využívaném soustruhu s pomocí přípravku pro uchycení tělesa statoru), tak i jeho chodu a také s časem narůstající „vychozenost“ součástí samotného prototypu (především válcových ploch matrice magnetů), způsobená nutností opakované demontáže. Je však otázkou i pro případnou další studii, zda by při celkově vysoké přesnosti celého zařízení a v dostatečně silném magnetickém poli vůbec výrazná kritická rychlost nastala v rozmezí hodnot bezpečně měřitelných pro obsluhu soustruhu.
- Volba magnetické kapaliny hraje z celkového pohledu poměrně zásadní roli v získaných výsledcích. Měla zásadní vliv jak na dosaženou tlakovou únosnost (dle očekávání), tak ovšem i na samotnou schopnost prostor vůbec hermeticky uzavřít. Dále také na míru zahřívání, způsobenou zřejmě rozdílným třením, a na celkovou práci s ní. Vezmeme-li v potaz například už její samotnou aplikaci do štěrbin, kdy FF kapaliny vykazovaly víceméně konstantní a poměrně vysoký odpor proti stlačování stříkačky, nezávislý na přítomnosti či nepřítomnosti magnetického pole, tak MR kapalina, s její řádově nižší viskozitou, protékala stejnou jehlou bez vlivu pole jen s minimálním odporem, v přítomnosti pole však její výrazný magnetoviskózní efekt, způsobený až tisíckrát větší velikostí částic, extrémně ztěžoval aplikaci přesného množství. Pro vyčištění ucpávky po testování MR kapaliny bylo navíc nutné rozebrat matici (postupně vyšroubovat všechny magnety), protože na rozdíl od FF ji ve stratifikovaném stavu nebylo možné odstranit s pomocí ředidla.

V simulační/výpočtové rovině práce je jejím hlavním přínosem prověření funkčnosti návrhových postupů, odhalených v rešerši, a ověření jejich zřejmě dobré aplikovatelnosti v případě takovýchto nenáročných návrhů či pilotních studií, a to navzdory špatné absolutní přesnosti shody simulace a experimentu, neboť tato je zřejmě způsobena pouze nedodržením až příliš velké části předpokladů, na nichž je model postaven.

Zajistit lepší soulad modelu a skutečnosti by teoreticky mělo být možné:

- Dodržením přesné výroby a zcela přesně definovaných provozních podmínek, blížících se zjednodušujícím předpokladům, použitým v tomto

návrhu. A dále přesným experimentálním určením magnetických charakteristik použitých materiálů pro potřeby virtuálního modelu.

- Zpřesňováním výpočtového modelu zahrnutím do něj vícera vnějších faktorů, jako je v první řadě odstředivá síla, a v případě těsnění kapalin zcela zásadní výraznější interakce dvou kapalných látek. Dále by bylo vhodné ošetřit také možnost, že kapalina se nenachází v saturovaném stavu, a tím pádem již nezanedbatelným způsobem ovlivňuje samotné pole.

Řadu námětů, relevantních k diskusi o konkrétních problémech a jejich řešení v rámci druhého uvedeného přístupu, již uvedla samotná řešitelka. Některé z nich by bylo zřejmě možné zrealizovat již během případné navazující studie, neboť ani zde se nepodařilo plně vyčerpat řadu dostupných možností, jak o řešení úlože získat další informace z jiného úhlu. Situace by mohla být hlouběji řešena například z pohledu CFD, s použitím reálnějších okrajových podmínek na rozhraní magnetické kapaliny, či mohly být využity vyšší úrovně simulací magnetického pole, například 3D modelování osově nesymetrického magnetostatického problému, nebo časově proměnného pole způsobeného uzavíráním obvodu přes házející hřídel (ačkoli náročnost konkrétně takového problému již výrazně přesahuje možnosti, které tato práce měla).

Avšak pro jiný, o něco více přímý směr vývoje - s cílem reálných aplikací v pokud možno dohledné době - je experimentální činnost na odpovídající úrovni nadále naprosto nezbytná, a podmínky zmíněné v rámci prvního uvedeného přístupu možná o něco lépe splnitelné. Proto by pro další vývoj i výzkum bylo nezbytné zkonstruovat i vlastní speciální stand, uzpůsobený výlučně pro experimentování s FHD technologií ucpávek. Požadavky na takový stand, v jeho ideální podobě, by mohly v budoucnu například zahrnovat:

- Snadnou výměnu těsněného média, ideálně i o různém skupenství (kapalina/plyn)
- Snadnou a přesnou aplikaci zvoleného objemu MF do zvoleného místa
- Přizpůsobitelnost standu možnosti testování obou hlavních typů magnetických kapalin: FF i MR
- Snadnou výměnu (odstranění) již otestované MF bez nutnosti složité demontáže zařízení - provedení by zřejmě vyžadovalo nahrazení permanentního magnetu či magnetů elektromagnetem, s možností přerušení magnetického obvodu
- Snadné přestavení polohy a její přesné vymezení i při pohybu
- Možnost sledovat a v čase zaznamenávat širokou škálu veličin - od tlaku, teploty, indukce, přes rychlost a moment až po průsak těsněné látky

- Zajistit chlazení – zajímavým řešením například i pro vlastní aplikace FHD ucpávek by mohly být teplovodné trubice na principu odpařování a následné kondenzace tekutiny
- Variabilitu komponent – možnost jejich úpravy či výměny, aby testování nebylo omezeno nevratností zásahů do nich
- Snadnou možnost vizuální kontroly, ideálně i během provozu pro sledování kritických fází experimentu
- Dle aktuálního směřování výzkumu ve světě by byla pravděpodobně užitečná i možnost dlouhodobých (životnostních) testů těsnění

## 8 ZÁVĚR

Byla provedena studie hydrodynamické ucpávky, využívající princip těsnění za pomoci magnetické kapaliny, držené v požadovaném místě magnetickým polem permanentního magnetu. V jejím rámci byla provedena široká rešerše současného stavu poznání, která pokryla řešenou problematiku od hlubokých teoretických základů, až po konkrétní specifika nasazení FHD ucpávek při těsnění kapalných látek. Byl představen obecně využívaný zjednodušený postup pro návrh vlastního prototypu, spočívající primárně v návrhu magnetického obvodu s využitím numerického simulování. Dále byly definovány parametry vlastního specifického konceptu axiální ucpávky, těsnící mezi čely trubek, z nichž jedna rotuje a druhá je statická. Účelem podoby tohoto konceptu bylo simulování podmínek, které by mohly platit při provozu ucpávky, navržené speciálně pro prstencové motory, v budoucnu snad jako součásti tandemového axiálního krevního čerpadla. Materiálové charakteristiky zdroje magnetického pole, tvořeného v této prototypové verzi prstencem tyčových magnetů, byly pro potřeby návrhu konceptu s využitím 2D simulací experimentálně zajištěny a použitý způsob převedení striktně vzato prostorového charakteru úlohy na dvojdimenzionální byl ověřen. Navržený prototyp byl vyroben a byly na něm provedeny experimenty s těsněním vzduchu v dynamických podmínkách – s otáčkami rotoru. Byla určena tlaková kapacita této ucpávky pro tři typy použitých magnetických kapalin a tyto skutečné hodnoty srovnány s teoretickými, získanými simulacemi za idealizovaných podmínek. Výsledky experimentu prokázaly funkčnost navrženého konceptu a též reálnou použitelnost popsaného způsobu jeho návrhu. Tyto získané poznatky by měly být přenosné i pro obecnější problémy využití FHD technologie pro těsnění hřídelů. Možnosti navázání na tuto studii a další cesty pokračování tohoto výzkumu jsou diskutovány.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] These 7 Artificial Heart Facts Could Help Save Your Life. SynCardia Systems, LLC [online]. Tucson (Arizona): SynCardia, 2015 [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: <http://www.syncardia.com/2015-press-releases/these-7-artificial-heart-facts-could-help-save-your-life.html>
- [2] Transplant trends. UNOS [online]. Richmond (Virginia): UNOS, 2017 [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: [https://unos.org/data/transplant-trends/#waitlists\\_by\\_organ](https://unos.org/data/transplant-trends/#waitlists_by_organ)
- [3] Transplant trends. UNOS [online]. Richmond (Virginia): UNOS, 2017 [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: [https://unos.org/data/transplant-trends/#transplants\\_by\\_organ\\_type+year+2017](https://unos.org/data/transplant-trends/#transplants_by_organ_type+year+2017)
- [4] Number of patient deaths on the organ transplant waiting list in the United Kingdom (UK) in 2017, by organ. Statista[online]. New York: Statista, 2017 [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/519829/patient-deaths-on-organ-transplant-waiting-list-united-kingdom-uk/>
- [5] V IKEM na Dušičky odhalili pietní místo se jmény 2652 dárců orgánů. Novinky.cz [online]. Praha: Borgis, 2017 [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/domaci/453737-v-ikem-na-dusicky-odhalili-pietni-misto-se-jmeny-2652-darcu-organu.html>
- [6] FERRARI, Markus, Peter KRUZLIAK a Kyriakos SPILIOPOULOS. An insight into short- and long-term mechanical circulatory support systems. *Clinical Research in Cardiology* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, 104(2), 95-111 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1007/s00392-014-0771-6. ISSN 1861-0684.
- [7] Kardiogenní šok. In: *Velký lékařský slovník* [online]. Praha: Maxdorf, 1998 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <http://lekarske.slovníky.cz/lexikon-pojem/kardiogenni-sok>
- [8] VON RUDEN, Serena, MARGARET A MURRAY, Jennifer L GRICE, Amy K PROEBSTLE a Karen KOPACEK. The Pharmacotherapy Implications of Ventricular Assist Device in the Patient With End-Stage Heart Failure. *Journal of pharmacy practice* [online]. 2012, (25), 232-249 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/221890423\\_The\\_Pharmacotherapy\\_Implications\\_of\\_Ventricular\\_Assist\\_Device\\_in\\_the\\_Patient\\_With\\_End-Stage\\_Heart\\_Failure](https://www.researchgate.net/publication/221890423_The_Pharmacotherapy_Implications_of_Ventricular_Assist_Device_in_the_Patient_With_End-Stage_Heart_Failure)
- [9] CHENG, Allen, Christine A WILLIAMITIS a Mark S SLAUGHTER. Comparison of continuous-flow and pulsatile-flow left ventricular assist devices: is there an advantage to pulsatility? *Annals of cardiothoracic surgery* [online]. 1411, 3(6), 573 [cit. 2017-11-14]. DOI: 10.3978/j.issn.2225-319X.2014.08.24. ISSN 2225-319X.
- [10] Pulsatile Flow LVAD. In: R.E.B.E.L. EM [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://rebelem.com/wp-content/uploads/2014/05/Pulsatile-Flow-LVAD.png>
- [11] Continuous Flow LVAD. In: R.E.B.E.L. EM [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://rebelem.com/wp-content/uploads/2014/05/Continuous-Flow-LVAD.png>
- [12] FRASER, Katharine H., M. Ertan TASKIN, Bartley P. GRIFFITH a Zhongjun J. WU. The use of computational fluid dynamics in the development of ventricular assist devices. *Medical Engineering and Physics* [online]. Elsevier, 2011, 33(3), 263-280 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.medengphy.2010.10.014. ISSN 1350-4533.
- [13] The SynCardia Total Artificial Heart. In: UCLA Newsroom [online]. Los Angeles: University of California, 2015 [cit. 2017-11-17]. Dostupné z: [http://cms.ipressroom.com.s3.amazonaws.com/173/files/20155/559323366eafb57f0500bba4\\_Total+Artificial+Heart/Total+Artificial+Heart\\_mid.jpg](http://cms.ipressroom.com.s3.amazonaws.com/173/files/20155/559323366eafb57f0500bba4_Total+Artificial+Heart/Total+Artificial+Heart_mid.jpg)
- [14] STRUBER, M, AL MEYER, D MALEHSA, C KUGLER, Ar SIMON a A HAVERICH. The Current Status of Heart Transplantation and the Development of "Artificial Heart Systems". *Deutsches Arzteblatt International* [online]. DEUTSCHER AERZTE-VERLAG, 2009, 106(28-29), 471-477 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.3238/arztebl.2009.0471. ISSN 1866-0452.
- [15] PAVIE, Alain a P. LEGER. Physiology of univentricular versus biventricular support. *The Annals of Thoracic Surgery* [online]. Elsevier, 1996, 61(1), 347-349 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/0003-4975(95)01026-2. ISSN 0003-4975.
- [16] KIRKLIN, James K., David C. NAFTEL, Francis D. PAGANI, Robert L. KORMOS, Lynne STEVENSON, Marissa MILLER a James B. YOUNG. Long-term mechanical circulatory support (destination therapy): On track to compete with heart transplantation?. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* [online]. Mosby, 2012, 144(3), 584-603 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2012.05.044. ISSN 0022-5223.



- [17] MALLIDI, H.R., J. ANAND a S.K. SINGH. Long-term mechanical circulatory support: A new disease state?. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* [online]. Mosby, 2015, 150(1), e13-e14 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2015.04.049. ISSN 00225223.
- [18] Trombóza. In: *Velký lékařský slovník* [online]. Praha: Maxdorf, 1998 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://lekarske.slovniky.cz/pojem/tromboza>
- [19] Trombóza. In: *Wikipedia* [online]. Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Tromb%C3%B3za>
- [20] Hemolýza. In: *Wikiskripta* [online]. 2017 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/w/Hemol%C3%BDza>
- [21] URIEL, Nir, Kerry A. MORRISON, Arthur R. GARAN, et al. Development of a Novel Echocardiography Ramp Test for Speed Optimization and Diagnosis of Device Thrombosis in Continuous-Flow Left Ventricular Assist Devices: The Columbia Ramp Study. *Journal of the American College of Cardiology* [online]. Elsevier, 2012, 60(18), 1764-1775 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.jacc.2012.07.052. ISSN 0735-1097.
- [22] NUNES, Abraham J., Roderick G.G. MACARTHUR, Daniel KIM, Gurmeet SINGH, Holger BUCHHOLZ, Patricia CHATTERLEY a Scott W. KLARENBACH. A Systematic Review of the Cost-Effectiveness of Long-Term Mechanical Circulatory Support. *Value in Health* [online]. Elsevier, 2016, 19(4), 494-504 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.jval.2014.12.020. ISSN 1098-3015.
- [23] Embolie. In: *Velký lékařský slovník* [online]. Praha: Maxdorf, 1998 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <http://lekarske.slovniky.cz/pojem/embolie>
- [24] SANDICA, Eugen, Ute BLANZ, Lotfi Ben MIME, et al. Long-Term Mechanical Circulatory Support in Pediatric Patients. *Artificial Organs* [online]. 2016, 40(3), 225-232 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1111/aor.12552. ISSN 0160-564X.
- [25] GIRDHAR, G, M XENOS, Y ALEMU, et al. Device Thrombogenicity Emulation: A Novel Method for Optimizing Mechanical Circulatory Support Device Thromboresistance. *Plos One* [online]. PUBLIC LIBRARY SCIENCE, 2012, 7(3) [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1371/journal.pone.0032463. ISSN 1932-6203.
- [26] MITAMURA, Yoshinori a Christopher A. DURST. Miniature magnetic fluid seal working in liquid environments. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. Elsevier B.V, 2017, 431, 285-288 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.09.032. ISSN 0304-8853.
- [27] MITAMURA, Yoshinori, Sayaka TAKAHASHI, Shuichi AMARI, Eiji OKAMOTO, Shun MURABAYASHI a Ikuya NISHIMURA. A magnetic fluid seal for rotary blood pumps: effects of seal structure on long-term performance in liquid. *Journal of Artificial Organs* [online]. Japan: Springer Japan, 2011, 14(1), 23-30 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1007/s10047-010-0526-8. ISSN 1434-7229.
- [28] CARSWELL, D., D. MCBRIDE, T.N. CROFT, A.K. SLONE, M. CROSS a G. FOSTER. A CFD model for the prediction of haemolysis in micro axial left ventricular assist devices. *Applied Mathematical Modelling* [online]. Elsevier, 2013, 37(6), 4199-4207 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.apm.2012.09.020. ISSN 0307-904X.
- [29] KOSAKA, Ryo, Kazuya YASUI, Masahiro NISHIDA, Yasuo KAWAGUCHI, Osamu MARUYAMA a Takashi YAMANE. Optimal Bearing Gap of a Multiarc Radial Bearing in a Hydrodynamically Levitated Centrifugal Blood Pump for the Reduction of Hemolysis. *Artificial Organs* [online]. 2014, 38(9), 818-822 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1111/aor.12383. ISSN 0160-564X.
- [30] KANDA, K., H. SATO, T. MIYAKOSHI, T. KITANO, H. KANEBAKO a K. ADACHI. Friction control of mechanical seals in a ventricular assist device. *Biosurface and Biotribology* [online]. Elsevier B.V, 2015, 1(2), 135-143 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.bsbt.2015.06.004. ISSN 2405-4518.
- [31] TOMIOKA, Jun a Norifumi MIYANAGA. Blood sealing properties of magnetic fluid seals. *Tribology International* [online]. Elsevier, 2017, 113, 338-343 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.12.040. ISSN 0301-679X.
- [32] OKADA, Y., N. YAMASHIRO, K. OHMORI, T. MASUZAWA, T. YAMANE, Y. KONISHI a S. UENO. Mixed flow artificial heart pump with axial self-bearing motor. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2005, 10(6), 658-665 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1109/TMECH.2005.859827. ISSN 1083-4435.
- [33] Schottel Rim Driven Thruster. In: *Popular Science* [online]. New York: Popular Science, 2017 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z:

- [https://www.popsoci.com/sites/popsoci.com/files/styles/1000\\_1x\\_/public/images/2017/06/rim\\_driven\\_thruster.jpg?itok=\\_6jCXmuF&fc=50,50](https://www.popsoci.com/sites/popsoci.com/files/styles/1000_1x_/public/images/2017/06/rim_driven_thruster.jpg?itok=_6jCXmuF&fc=50,50)
- [34] ŠPAČEK, Kryštof. Princip a použití prstencových motorů v průmyslových aplikacích. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [35] KIM, S. H., S. HASHI a K. ISHIYAMA. Actuation of Novel Blood Pump by Direct Application of Rotating Magnetic Field. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2012, 48(5), 1869-1874 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2177527. ISSN 0018-9464.
- [36] HOON, S. R. a B. K. TANNER. Magnetic Fluids--Part 1. *Physics Education* [online]. 1985, 20(2), 61-65 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1088/0031-9120/20/2/307. ISSN 0031-9120.
- [37] HOON, S. B. a B. K. TANNER. Magnetic Fluids--Part 2. *Physics Education* [online]. 1985, 20(3), 120-23 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1088/0031-9120/20/3/310. ISSN 00319120.
- [38] MAYER, Daniel. Magnetické kapaliny a jejich použití: (1. část). *Elektro*. 2007, 2007(3), 78-79.
- [39] STANWAY, R. Smart fluids: current and future developments. *Materials Science and Technology* [online]. Taylor, 2004, 20(8), 931-939 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1179/026708304225019867. ISSN 0267-0836.
- [40] BARBER, Z. H., T. W. CLYNE a P. SITTNER. Smart materials. *Materials Science and Technology* [online]. Taylor, 2014, 30(13), 1515-1516 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1179/0267083614Z.000000000786. ISSN 0267-0836.
- [41] POTOCZNY, Marcin a Bolesław ZACHARA. Influence of Magnetorheological Fluid Volume onto Obtained Critical Pressures on Rotary Shaft Seals. *Key Engineering Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2012, 490-490, 119-127 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.490.119. ISSN 1013-9826.
- [42] POLCAR, Petr. Elektromechanický převodník s magnetickou kapalinou. Plzeň, 2012. Autoreferát disertační práce k získání akademického titulu "Doktor". Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [43] HORNG, H.E, Chin-Yih HONG, S.Y YANG a H.C YANG. Novel properties and applications in magnetic fluids. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* [online]. Elsevier, 2001, 62(9), 1749-1764 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/S0022-3697(01)00108-1. ISSN 0022-3697.
- [44] BLUMS, Elmars, A. O TTSSEBERS a M. M MAIOROV. *Magnetic Fluids*. Walter De Gruyter, 1997. ISBN 3110143909.
- [45] RESEARCH & DEVELOPMENT, S.C. Roseal S.A. *Odorheiu Secuiesc*, Rumunsko, 2015. Dostupné také z: <http://roseal.topnet.ro/images/rosealimages/produse/R&D%20Brochure%20Roseal.pdf>
- [46] Prototyp zařízení pro přípravu magneticky vodivých prášků s využitím kavitace - CavitPow 13-01. Vysoké učení technické v Brně [online]. Brno: VUT v Brně, 2013 [cit. 2018-01-26]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/vav/vysledky/detail?vav\\_id=120800#vysledek-120800](https://www.vutbr.cz/vav/vysledky/detail?vav_id=120800#vysledek-120800)
- [47] Experti z CEITECu VUT našli způsob, jak pomocí kavitace vyrobit ultrajemné prášky. CEITEC [online]. Brno: CEITEC, 2015 [cit. 2018-01-26]. Dostupné z: <https://www.ceitec.cz/experti-z-ceitecu-vut-nasli-zpusob-jak-pomoci-kavitace-vyrobit-ultrajemne-prasky/t2039>
- [48] Brownův pohyb. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-01-29]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Brown%C5%AFv\\_pohyb](https://cs.wikipedia.org/wiki/Brown%C5%AFv_pohyb)
- [49] ROSENWEIG, Ronald E. Basic Equations for Magnetic Fluids with Internal Rotations. ODENBACH, Stefan, ed. *Ferrofluids: Magnetically Controllable Fluids and Their Applications*. Berlin: Springer, 2002, s. 61-79. ISBN 3-540-43978-1.
- [50] ODENBACH, Stefan a Steffen THURM. Magnetoviscous Effects in Ferrofluids. ODENBACH, Stefan. *Ferrofluids: Magnetically Controllable Fluids and Their Applications*. Berlin: Springer, 2002, s. 185-201. ISBN 3-540-43978-1.
- [51] KOŘINEK, Radim. Měření relaxačních konstant technikami magnetické rezonance. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008.
- [52] Ponderomotive force. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-01-30]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ponderomotive\\_force](https://en.wikipedia.org/wiki/Ponderomotive_force)
- [53] SZANTÓ, Ladislav. *Maxwellovy rovnice*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2012, 123 s. : il., portréty. ISBN 978-80-7300-450-7.

- [54] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Elektřina a magnetismus. Vyd. 3., V nakl. Karolinum 2. Praha: Karolinum, 2012, 595 s. : il., příklady. ISBN 978-80-246-2198-2.
- [55] STEJSKAL, Jan. Proudění magnetické kapaliny s aplikací Binghamova modelu. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013.
- [56] MAYER, Daniel. Magnetické kapaliny a jejich použití: (2. část - dokončení). Elektro. 2007, 2007(4), 4-8.
- [57] ZUREK, Stan. Diagram of an air gap in a magnetic circuit. In: Encyclopedia Magnetica [online]. 2017 [cit. 2018-01-31]. Dostupné z: [http://www.encyclopedia-magnetica.com/lib/exe/fetch.php/air\\_gap\\_diagram.png](http://www.encyclopedia-magnetica.com/lib/exe/fetch.php/air_gap_diagram.png)
- [58] Comparison of B, H and M inside and outside a cylindrical bar magnet. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2018-01-31]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a7/VFPt\\_magnets\\_BHM.svg/333px-VFPt\\_magnets\\_BHM.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a7/VFPt_magnets_BHM.svg/333px-VFPt_magnets_BHM.svg.png)
- [59] YANG, G., B.F. SPENCER JR., J.D. CARLSON a M.K. SAIN. Large-scale MR fluid dampers: Modeling and dynamic performance considerations. Engineering Structures [online]. 2002, 24(3), 309-323 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/S0141-0296(01)00097-9. ISSN 01410296.
- [60] RADIONOV, A., A. PODOLTSEV a A. ZAHORULKO. Finite-Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic Fluid in the Core of Magnetic-Fluid Seal for Rotational Shaft. Procedia Engineering [online]. Elsevier, 2012, 39(C), 327-338 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.038. ISSN 1877-7058.
- [61] LÁN, Radek. Konstrukce nízkotlakého pístového reometru. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013.
- [62] MATUSZEWSKI, L a Z SZYDLO. The application of magnetic fluids in sealing nodes designed for operation in difficult conditions and in machines used in sea environment. Polish Maritime Research [online]. GDANSK UNIV TECHNOLOGY, 2008, 15(3), 49-58 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.2478/v10012-007-0083-0. ISSN 1233-2585.
- [63] SZCZĘCH, Marcin, Eduardoalberto DE SOUZA NETO a Eduardoalberto DE SOUZA NETO. A novel approach for estimating the magnetization curve of magnetic fluids. Engineering Computations [online]. 2017, , 00-00 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1108/EC-05-2016-0161. ISSN 0264-4401.
- [64] ŠOB, František. Hydromechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 9788021435780.
- [65] JANALÍK, J., ŠTÁVA, P.: Mechanika tekutin [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002, 125 s. [cit. 2013-03-10]. ISBN 80-248- 0038-1. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>
- [66] M. KCIUK a R. TURCZYN. Properties and application of magnetorheological fluids. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering [online]. 2006, 18(1-2), 127-130 [cit. 2016-05-22]. ISSN 1734-8412. Dostupné z: [http://www.journalamme.org/papers\\_amme06/1236.pdf](http://www.journalamme.org/papers_amme06/1236.pdf)
- [67] NASSAR, Waad. Pre-yield shearing regime of a magnetorheological fluid (MRF). Palaiseau, Francie, 2013. Disertační práce. École Polytechnique Palaiseau-France.
- [68] CLARACQ, Jérôme, Jérôme SARRAZIN a Jean-Pierre MONTFORT. Viscoelastic properties of magnetorheological fluids. Rheologica Acta [online]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2004, 43(1), 38-49 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1007/s00397-003-0318-7. ISSN 0035-4511.
- [69] YANG, Yongbo, Lin LI, Guang CHEN a Weihua LI. Magnetorheological Properties of Aqueous Ferrofluids. Nihon Reorji Gakkai Shi [online]. Kyoto-City: Japan Science and Technology Agency, 2006, 34(1), 25 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1678/rheology.34.25. ISSN 03871533.
- [70] RAO, M. Anandha. Flow and Functional Models for Rheological Properties of Fluid Foods. RAO, M. Anandha. Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods: Principles and Applications. Boston, Massachusetts: Springer, 2014, s. 27-61. ISBN 978-1-4614-9229-0.
- [71] A. SPAGGIARI. Properties and applications of Magnetorheological fluids. Frattura ed Integrità Strutturale [online]. Gruppo Italiano Frattura, 2013, 7(23), 57-61 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.3221/162. ISSN 1971-8993.
- [72] OCHONSKI, W. The attraction of FERROFLUID BEARINGS. Machine Design [online]. Cleveland: Informa, 2005, 77(21), 96 [cit. 2018-05-24]. ISSN 00249114.

- [73] T BORBÁTH. Magnetic nanofluids and magnetic composite fluids in rotating seal systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science [online]. 2010, 12(1), 012105 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1088/1755-1315/12/1/012105. ISSN 1755-1307.
- [74] WANG, J a G MENG. Magnetorheological fluid devices: Principles, characteristics and applications in mechanical engineering. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2001, 215(3), 165-174.
- [75] ZAMAN, Nazmul. DYNAMIC SEALS LOWER LIFE COSTS OF WASTEWATER PUMPS. WaterWorld [online]. Tulsa (Oklahoma): PennWell Corporation, 2018, 2004 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://www.waterworld.com/articles/print/volume-20/issue-6/editorial-focus/dynamic-seals-lower-life-costs-of-wastewater-pumps.html>
- [76] BORBATH, Tuende, Doina BICA, Iosif POTENCZ, Istvan BORBATH, Tibor BOROS, Ladislau VEKAS a Tuende BORBATH. Leakage-free Rotating Seal Systems with Magnetic Nanofluids and Magnetic Composite Fluids Designed for Various Applications. International Journal of Fluid Machinery and Systems [online]. 2011, 4(1), 67-75 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.5293/IJFMS.2011.4.1.067. ISSN 1882-9554.
- [77] LIU, Tonggang, Yusheng CHENG a Zhiyi YANG. Design optimization of seal structure for sealing liquid by magnetic fluids. Journal of Magnetism and Magnetic Materials [online]. Elsevier B.V, 2005, 289, 411-414 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.jmmm.2004.11.116. ISSN 0304-8853.
- [78] MATUSZEWSKI LESZEK. Failure of Magnetic Fluid Seals Operating in Water: Preliminary Conclusions. Polish Maritime Research [online]. De Gruyter Open, 2017, 24(2), 113-120 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1515/pomr-2017-0057. ISSN 2083-7429.
- [79] OCHONSKI, Włodzimierz. New designs of magnetic fluid exclusion seals for rolling bearings. Industrial Lubrication and Tribology [online]. Emerald Group Publishing Limited, 2005, 57(3), 107-115 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1108/00368790510595075. ISSN 0036-8792.
- [80] OCHONSKI, W. Magnetic fluids tackle tough sealing jobs. Machine Design [online]. 2005, 77(4), 118-124 [cit. 2018-05-24]. ISSN 00249114.
- [81] RAJ, K., B. MOSKOWITZ a R. CASCIARI. Advances in ferrofluid technology. Journal of Magnetism and Magnetic Materials [online]. Elsevier B.V, 1995, 149(1), 174-180 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/0304-8853(95)00365-7. ISSN 0304-8853.
- [82] GERTZOS, K.P., P.G. NIKOLAKOPOULOS a C.A. PAPADOPOULOS. CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant. Tribology International [online]. Elsevier, 2008, 41(12), 1190-1204 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.triboint.2008.03.002. ISSN 0301-679X.
- [83] OSMAN, T.A., G.S. NADA a Z.S. SAFAR. Static and dynamic characteristics of magnetized journal bearings lubricated with ferrofluid. Tribology International [online]. Elsevier, 2001, 34(6), 369-380 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/S0301-679X(01)00017-2. ISSN 0301-679X.
- [84] WALOWIT, Jed A. a Oscar PINKUS. Analysis of Magnetic-Fluid Seals. ASLE Transactions. 1981, 24(4), 533-541.
- [85] MELICHAR, Jan, Karel BRADA a Jaroslav BLÁHA. Hydraulické stroje: konstrukce a provoz. Vydání první. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 378 stran : ilustrace. ISBN 80-01-02657-4.
- [86] FLITNEY, Robert K. Seals and Sealing Handbook (5). Kidlington: Elsevier Science, 2007. ISBN 9780080549262.
- [87] [Gufero]. In: Windpower [online]. Cleveland (Ohio): WTWH Media, 2018 [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <https://www.windpowerengineering.com/wp-content/uploads/2012/05/crps-section.jpg>
- [88] [Ultra-X Packing]. In: Pacific Marine & Industrial [online]. Richmond (California): Quality Pacific Manufacturing, 2017 [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://www.pacificmarine.net/images/marine-stuffing-box/stuffing-box-packing-marine.jpg>
- [89] Role of Ferrofluid in a Seal. Liquids Research Limited [online]. Bangor (UK), 2011 [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: [http://liquidsresearch.co.uk/en-GB/for\\_sealing\\_applications-52.aspx](http://liquidsresearch.co.uk/en-GB/for_sealing_applications-52.aspx)
- [90] Ferrofluidic Seals and Vacuum Feedthroughs. FerroTec [online]. 2018 [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <https://seals.ferrotec.com/>
- [91] Lord MR Store. Mid Atlantic Rubber [online]. 2015 [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products>
- [92] ODENBACH, S. Ferrofluids: magnetically controllable liquids. PAMM [online]. Berlin: WILEY-VCH Verlag Berlin, 2002, 1(1), 28-32 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1002/1617-7061(200203)1:1<28::AID-PAMM28>3.0.CO;2-8. ISSN 1617-7061.



- [93] TECHNICKÝ KATALOG GRUNDFOS: Hřidelové ucpávky. In: MARCOMPLET [online]. Praha, 2018 [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: [http://marcomplet.cz/docs/Grundfos/hridelove\\_ucpavky.pdf](http://marcomplet.cz/docs/Grundfos/hridelove_ucpavky.pdf)
- [94] Magnetic Fluid Seals. EKK [online]. Eagle Industry Co. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://www.ekkeagle.com/en/wp-content/uploads/2014/09/EKK-Magnetic-fluid-seal-CAT-N004E-11122.pdf>
- [95] SZCZECH, Marcin a Wojciech HORAK. Tightness testing of rotary ferromagnetic fluid seal working in water environment. *Industrial Lubrication and Tribology* [online]. Emerald Group Publishing Limited, 2015, 67(5), 455-459 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1108/ILT-02-2015-0014. ISSN 0036-8792.
- [96] WANG, Zhongzhong, Decai LI a Jing ZHOU. On-uniform Distribution of Magnetic Fluid in Multistage Magnetic Fluid Seals. *Journal of Magnetism*. 2017, 22(2), 299-305.
- [97] AGRAWAL, Ashish, Prashant KULKARNI, Sheila L. VIEIRA a Nagi G. NAGANATHAN. An Overview of Magneto- and Electro-Rheological Fluids and their Applications in Fluid Power Systems. *International Journal of Fluid Power* [online]. Taylor, 2001, 2(2), 5-41 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1080/14399776.2001.10781106. ISSN 1439-9776.
- [98] Saturation curves for soft magnetic materials. Field Precision LLC [online]. 2018 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.fieldp.com/magneticproperties.html>
- [99] JIBIN ZOU, JIMING ZOU a JIANHUI HU. Design and pressure control of high-pressure differential magnetic fluid seals. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2003, 39(5), 2651-2653 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1109/TMAG.2003.815543. ISSN 0018-9464.
- [100] ZOU JIBIN a LU YONGPING. Numerical calculations for ferrofluid seals. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1992, 28(6), 3367-3371 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1109/20.179812. ISSN 0018-9464.
- [101] MING CONG a HUILI SHI. A Study of Magnetic Fluid Rotary Seals for Wafer Handling Robot. In: *Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2008. M2VIP 2008. 15th International Conference on* [online]. IEEE, 2008, s. 269-273 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1109/MMVIP.2008.4749545. ISBN 978-1-4244-3779-5.
- [102] WANG, H., D. LI, S. WANG, X. HE a S. ZHEN. Effect of seal gap on the seal life when sealing liquids with magnetic fluid. *Revista de la Facultad de Ingeniería* [online]. Universidad Central de Venezuela, 2016, 31(12), 83-88 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.21311/002.31.12.11. ISSN 07984065.
- [103] XING, Fei Fei, De Cai LI a Xiao Long YANG. Experimental Study of Large Gap Magnetic Fluid Static Sealing. *Key Engineering Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2012, 492-492, 283-286 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.492.283. ISSN 1013-9826.
- [104] GWAN SOO PARK a SANG HO PARK. Determination of the curvature of the magnetic fluid under the external forces. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2002, 38(2), 957-960 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1109/20.996246. ISSN 0018-9464.
- [105] Hydrodynamic journal bearing lubricated with a ferrofluid. *Industrial Lubrication and Tribology* [online]. Emerald Publishing Limited, 2017, 69(5), 754-760 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1108/ILT-08-2016-0179. ISSN 0036-8792.
- [106] MITKOVA, Teodora a Lutz TOBISKA. *Numerical Simulation of the Flow in Magnetic Fluid Rotary Shaft Seals*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. ISBN 978-3-540-24588-9.
- [107] ZHANG, Y., Y. CHEN, D. LI, Z. YANG a Y. YANG. Experimental validation and numerical simulation of static pressure in multi-stage ferrofluid seals. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, , <xocs:firstpage xmlns:xocs= [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2744606. ISSN 00189464.
- [108] YANG, XiaoLong, ZhiLi ZHANG a DeCai LI. Numerical and experimental study of magnetic fluid seal with large sealing gap and multiple magnetic sources. *Science China Technological Sciences* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, 56(11), 2865-2869 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1007/s11431-013-5365-4. ISSN 1674-7321.
- [109] RAVAUD, R., G. LEMARQUAND a V. LEMARQUAND. Mechanical properties of ferrofluid applications: Centering effect and capacity of a seal. *Tribology International* [online]. Elsevier, 2010, 43(1), 76-82 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.04.050. ISSN 0301-679X.

- [110] POLEVIKOV, V. a L. TOBISKA. Modeling of a Dynamic Magneto-Fluid Seal in the Presence of a Pressure Drop. *Fluid Dynamics* [online]. New York: Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, 2001, 36(6), 890-898 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1023/A:1017906408433. ISSN 0015-4628.
- [111] LAVROVA, O, G MATTHIES, T MITKOVA, V POLEVIKOV a L TOBISKA. Numerical treatment of free surface problems in ferrohydrodynamics. *Journal of Physics: Condensed Matter*[online]. 2006, 18(38), S2657-S2669 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1088/0953-8984/18/38/S09. ISSN 0953-8984.
- [112] KRAKOV, M. a I. NIKIFOROV. Influence of the meridional flow and thermomagnetic convection on characteristics of magnetic fluid seal. *Technical Physics* [online]. Dordrecht: SP MAIK Nauka/Interperiodica, 2011, 56(12), 1745-1753 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1134/S1063784211120103. ISSN 1063-7842.
- [113] LIU, Jun. Numerical Analysis of Secondary Flow in the Narrow Gap of Magnetic Fluid Shaft Seal, Using a Spectral Finite Difference Method. *Tribology Transactions* [online]. Taylor, 2015, 59(2), 1-27 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1080/10402004.2015.1077408. ISSN 1040-2004.
- [114] SZCZECH, Marcin a Wojciech HORAK. Numerical Simulation and Experimental Validation of the Critical Pressure Value in Ferromagnetic Fluid Seals. *Magnetics, IEEE Transactions on*[online]. USA: IEEE, 2017, 53(7), 1-5 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2672922. ISSN 0018-9464.
- [115] SUN, Mingli, Bin WANG, Shuang LU, Jinfu DING a Hairong CUI. Numerical Simulation and Optimization Design for Magnetic Fluid Sealing Device. In: *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference on* [online]. IEEE Publishing, 2010, 2, s. 821-824 [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1109/ICICTA.2010.412. ISBN 978-1-4244-7279-6.
- [116] XING, Fei Fei, De Cai LI a Wen Ming YANG. The Analysis of Pressure Capability of Different Teeth Structures in Ferrofluid Seal. *Advanced Materials Research* [online]. Trans Tech Publications, 2011, 146-147, 1278-1284 [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.146-147.1278. ISSN 1022-6680.
- [117] KRAKOV, M.S. a I.V. NIKIFOROV. Regarding the influence of heating and the Soret effect on a magnetic fluid seal. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. Elsevier B.V, 2017, 431, 255-261 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.07.054. ISSN 0304-8853.
- [118] SZYDŁO, Zbigniew a Marcin SZCZECH. Investigation of Dynamic Magnetic Fluid Seal Wear Process in Utility Water Environment. *Key Engineering Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2012, 490-490, 143-155 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.490.143. ISSN 1013-9826.
- [119] MATUSZEWSKI, L. Multi-stage magnetic-fluid seals for operating in water - life test procedure, test stand and research results Part II Results of life tests of multi-stage magnetic-fluid seal operating in water. *Polish Maritime Research* [online]. GDANSK UNIV TECHNOLOGY, 2013, 20(1), 39-47 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.2478/pomr-2013-0005. ISSN 1233-2585.
- [120] ZHAO, Chang-fa, Rong-hua SUN a Jin-xing ZHENG. Experimental study on a magnetofluid sealing liquid for propeller shaft. *Journal of Marine Science and Application* [online]. Harbin: Harbin Engineering University, 2003, 2(1), 66-70 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.1007/BF02935579. ISSN 1671-9433.
- [121] YANG, En Xia, He Ping LIU, Chuan Bo YI a Yan DONG. Design and Experimental Research on Ester Ferrofluid Seal for Stern. *Key Engineering Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2010, 419-420, 209-212 [cit. 2018-05-24]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.419-420.209. ISSN 1013-9826.
- [122] MRF-122EG Magneto-Rheological Fluid. In: LORD [online]. Cary, Severní Karolína, USA: LORD Corporation, 2018 [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7027.pdf>
- [123] POLCAR, Petr, Daniel MAYER a David PÁNEK. A Novel Approach to Magnetic Fluids Permeability Measurement. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. 2012, 88(7), 1-2.
- [124] PAVLÍČEK, Dušan. Studium magnetoreologického hřídelového těsnění. *Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství*, 2017.

---

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

CFD	-	(z anglického <i>computational fluid dynamics</i> ) výpočtové modelování proudění
ER	-	elektroreologický
FF	-	(z anglického <i>ferrofluids</i> ) feromagnetické kapaliny, fero kapaliny
FHD	-	ferohydrodynamický
FSI	-	Fakulta strojního inženýrství
MCSSs	-	(z anglického <i>mechanical circulatory support systems</i> ) mechanické oběhové podpůrné systémy
MFs	-	(z anglického <i>magnetic fluids</i> ) magnetické kapaliny
MFSs	-	(z anglického <i>magnetic fluid seals</i> ) ucpávky s magnetickou kapalinou
MKP	-	metoda konečných prvků
MNFs	-	(z anglického <i>magnetic nanofluids</i> ) magnetické nanokapaliny
MR	-	magnetoreologický
OFI VK	-	Odbor fluidního inženýrství Victora Kaplana
ÚK	-	Ústav konstruování
ÚVSSR	-	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
VADs	-	(z anglického <i>ventricular assist devices</i> ) ventikulární asistenční zařízení
VUT v Brně	-	Vysoké učení technické v Brně



## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

<b>Obr. 2.1</b> Možné konstrukční provedení LVAD s pulzujícím proudem (1. generace VADs) [10, upraveno].....	15
<b>Obr. 2.2</b> Možné konstrukční provedení LVAD s kontinuálním proudem (2. generace VADs) [11, upraveno].....	15
<b>Obr. 2.3</b> Trombotický útvar na rotoru explantovaného hydrodynamického LVAD [21].....	17
<b>Obr. 2.4</b> Způsoby pohonu oběžného kola VADs [27, upraveno] .....	18
<b>Obr. 2.5</b> Schottel Rim-Driven Thruster [33] .....	19
<b>Obr. 2.6</b> Magnetická kapalina s volnou hladinou pod vlivem magnetického pole permanentního magnetu [56].....	20
<b>Obr. 2.7</b> Magnetoviskózní jev: magnetická (resp. magnetoreologická) kapalina bez ovlivnění magnetickým polem (intenzita magnetického pole $H=0$ ) se navenek jeví jako nemagnetická ( <i>vlevo</i> ), pod jeho vlivem ( $H \neq 0$ ) se však částice polarizují a formují do řetězců ( <i>vpravo</i> ) [41, upraveno] .....	22
<b>Obr. 2.8</b> Schéma jednoduchého elektromagnetu tvořeného cívkou (budícím vinutím) a feromagnetickým jádrem pro ovlivňování magnetické kapaliny ve štěrbině [57, upraveno].....	24
<b>Obr. 2.9</b> Magnetoviskózní jev v závislosti na velikosti [50, upraveno].....	25
<b>Obr. 2.10</b> Porovnání siločar $B$ , $H$ a $M$ uvnitř a vně válcového permanentního magnetu [58].....	27
<b>Obr. 2.11</b> Závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole v případě: feromagnetické kapaliny - s nanočásticemi (1), magnetoreologické kapaliny - s mikročásticemi (2) [62, upraveno].....	28
<b>Obr. 2.12</b> Idealizovaný reogram newtonské a binghamské kapaliny [39, upraveno] 30	
<b>Obr. 2.13</b> Cassonův model ( <i>vlevo</i> ) a Hershel-Bulkleyův model pro různé hodnoty exponentu nenewtonského toku $n$ ( <i>vpravo</i> ) [67] .....	31
<b>Obr. 2.14</b> Experimentálně zjištěný reogram MR kapaliny z článku [68, upraveno] (čtverečky), a jeho aproximace modelem dle Binghamu (čárkovane) a Crosse (plná čára); $\eta_\infty$ zde označuje binghamskou viskozitu $\eta_B$ .....	32
<b>Obr. 2.15</b> Uložení provazců v ucpávkovém prostoru [x107] .....	36
<b>Obr. 2.16</b> Těsnění hřídele pomocí gufera s prachovkou [x106] .....	36
<b>Obr. 2.17</b> Ilustrace vlivu tlakové diference na tvar magnetické kapaliny v mezeře [80, upraveno].....	37
<b>Obr. 2.18a</b> Schéma principu jedno-stupňového FHD těsnění [94, upraveno] .....	37
<b>Obr. 2.19</b> Vliv tvaru pólových nástavců na rozložení magnetického pole v mezeře. [80, upraveno].....	38
<b>Obr. 2.20</b> Schéma vícepólové vícestupňové FHD ucpávky [99, upraveno] .....	39
<b>Obr. 2.21</b> Element magnetické kapaliny mezi opačnými póly dvou magnetů teoretického jednostupňového těsnění [84, upraveno].....	40
<b>Obr. 2.22</b> Experimentální statické těsnění ( <i>vlevo</i> ); izobary z numerického řešení, kde křivkám s rostoucím označením 1-1', 2-2', ..., 8-8', 9, 10 zároveň přísluší rostoucí hodnoty konstantního tlaku ( <i>vpravo</i> ) [100, upraveno] .....	41
<b>Obr. 2.23</b> Zachycení tvaru MF kroužku na základě fotodokumentace experimentu se statickým těsněním [100, upraveno].....	41
<b>Obr. 2.24</b> Závislost kapacity ucpávky na velikosti těsnicí štěrbině [101, upraveno] 42	
<b>Obr. 2.25</b> Valivé ložisko s integrovanou FHD ucpávkou [80, upraveno].....	42

<b>Obr. 2.26</b> Montážní celek vícestupňového FHD těsnění pro vakuum [94, upraveno] .....	43
<b>Obr. 2.27</b> Různé varianty konstrukčního uspořádání FHD ucpávek: 1 – permanentní magnet, 2 – magnetická kapalina, 3 – pólový nástavec, 4 – O-kroužek, 5 – stacionární objímka, 6 – manžetové těsnění, 7 – distanční kroužek, $\delta$ – šířka těsnicí MF spáry. [79, upraveno] .....	44
<b>Obr. 2.28</b> Algoritmus numerického řešení tvaru povrchu magnetické kapaliny pod vlivem externích sil [104, upraveno].....	45
<b>Obr. 2.29</b> tvaru MF ve statickém FHD těsnění na základě: výpočtu ( <i>vlevo</i> ), experimentu ( <i>vpravo</i> ) [104, upraveno].....	46
<b>Obr. 2.30</b> Sekundární proudění ferokapaliny v FHD ucpávce při nenulových otáčkách a tlakovém diferenciálu [110, upraveno] .....	47
<b>Obr. 2.31</b> Numerické řešení hydrodynamické úlohy na doméně $\Omega$ : diskretizace problému na 2. úrovni jemnosti sítě ( <i>a</i> ); izolinie obvodové rychlosti ( <i>b</i> ), tlaku ( <i>c</i> ) a proudové funkce ( <i>d</i> ) po dvou iteracích pro 6. úroveň jemnosti sítě [106, upraveno] .....	48
<b>Obr. 2.32</b> Geometrické uspořádání řešeného problému ( <i>vlevo</i> ): šířka těsnicí spáry $g$ , vrcholový úhel $2\beta$ ; znázornění sekundárního proudění: bez zahrnutí termomagnetické konvekce ( <i>vpravo nahoře</i> ), se zahrnutím termomagnetické konvekce ( <i>vpravo dole</i> ) [112, upraveno].....	49
<b>Obr. 2.33</b> Vysítovaný magnetický obvod ucpávky ( <i>vlevo</i> ): permanentní magnet (1), pólový nástavec (2), hřídel (3), ferokapalina (4); izolinie magnetické indukce v oblasti těsnicí štěrbin, s prostorem obsazeným různými objemy saturované ferokapaliny ( <i>vpravo</i> ) [60, upraveno] .....	50
<b>Obr. 2.34</b> Rozložení vektorů měrné magnetické síly ( <i>nahoře</i> ), úhlové rychlosti ( <i>uprostřed</i> ) a sekundárního proudění ( <i>dole</i> ) [60, upraveno] .....	51
<b>Obr. 2.35</b> Schéma jednostupňové experimentální ucpávky ( <i>vlevo</i> ): pólový nástavec (1), permanentní magnet s proměnlivým objemem (2), siločáry uzavřeného magnetického obvodu (3), vzduchová mezera (4), rotující hřídel (5); realizace proměnlivého objemu pomocí mnoha diskových magnetů ( <i>vpravo</i> ) [114, upraveno] .....	52
<b>Obr. 2.36</b> magnetické indukce po délce těsnicí mezery bez a za přítomnosti ferokapaliny [114, upraveno].....	52
<b>Obr. 2.37</b> Schéma navržené podoby nové FHD ucpávky [77, upraveno] .....	53
<b>Obr. 2.38</b> Schéma umístění pohonu námořního plavidla a jeho těsnicího uzlu ( <i>vlevo</i> ), FHD ucpávka hřídele lodního šroubu (detail <i>vpravo</i> ): 1 – hřídel, 2 – tělo, 3 – kluzné ložisko, 4 – skříň těsnění, 5 – nemagnetický nákrůžek, 6, 7 – permanentní magnety, 8, 9 – drážkované pólové nástavce, 10 – magnetická kapalina [62, upraveno].....	54
<b>Obr. 2.39</b> Příklad srovnání teoretického průběhu závislosti $v=f(\log(N),p)$ (černá plocha) a experimentálních dat (kolorovaná plocha) [x94, upraveno].....	56
<b>Obr. 4.1</b> Koncept tandemového axiálního krevního čerpadla s prstencovými motory: rotující prvky zvýrazněny modře (kromě ložisek); červeně označena poloha zamýšlených těsnicích uzlů č. 1 až 4 [Trlica, 2018] .....	59
<b>Obr. 4.2</b> Základní varianty přístupu k utěsnění duté hřídele prstencového motoru: radiální ( <i>vlevo</i> ), axiální ( <i>vpravo</i> ).....	60
<b>Obr. 4.3</b> Varianty uspořádání permanentních magnetů v FHD ucpávce: (1) prstenc, (2, 3) tyčové magnety, (4) segmenty.....	61

<b>Obr. 4.4</b> Axiální ucpávka s radiální polarizací magnetu - magnetický obvod je uzavírán: přes ložisko ( <i>vlevo</i> ), mimo ložisko ( <i>vpravo</i> ).....	62
<b>Obr. 4.5</b> Axiální ucpávka s axiální polarizací magnetu - magnetický obvod je uzavírán: přes ložisko ( <i>vlevo</i> ), mimo ložisko ( <i>vpravo</i> ).....	62
<b>Obr. 4.6</b> Sestava testovacího prototypu axiální ucpávky – 3D model.....	64
<b>Obr. 4.7</b> Sestava testovacího prototypu axiální ucpávky – kótovaný řez .....	65
<b>Obr. 5.1</b> M-H křivky ferokapalin Ferrotec s naznačením saturační intenzity magnetického pole a body jejich přepočtu na B-H křivky: změřená APGS21 odpovídá experimentálně použité APG1134, analogicky APGW05 odpovídá použité APGW10 [63, upraveno].....	67
<b>Obr. 5.2</b> $\tau_0$ -H křivka kapaliny MRF122EG s určenou hodnotou saturační intenzity magnetického pole [122, upraveno].....	68
<b>Obr. 5.3</b> Srovnávací 3D výpočtové modely s využitím symetrie – varianty magnetů: plný prstenec $V_{1,00}$ ( <i>vlevo</i> ), hranoly $V_{0,50}$ ( <i>uprostřed</i> ), tyče $V_{0,64}$ ( <i>vpravo</i> ) .....	69
<b>Obr. 5.4</b> Hranice výpočtové oblasti varianty $V_{0,32}$ ( <i>vlevo</i> ); vyhodnocení indukce v kontrolním místě se zobrazením siločar ( <i>vpravo</i> ).....	70
<b>Obr. 5.5</b> Měření indukce po obvodu vnější mezery mezi pólovým diskem a rotorem na finální verzi ucpávky (varianta 2) .....	71
<b>Obr. 5.6</b> Výsledky měření indukce na variantě 1, tedy s polovinou magnetů a nezkosenými čely.....	72
<b>Obr. 5.7</b> Výsledky měření indukce na variantě 2, tedy s plným počtem 20 magnetů a zkosnými čely .....	72
<b>Obr. 5.8</b> Ladění parametrů 2D modelu magnetu varianty 1 .....	73
<b>Obr. 5.9</b> Srovnání výsledků měření a hledání optimálních parametrů 2D modelu magnetu pomocí simulací.....	73
<b>Obr. 5.10</b> Detail zájmové oblasti modelu s naznačenou lomenou kontrolní čarou ( <i>vlevo</i> ) a v oblasti generovaná trojúhelníková výpočtová síť ( <i>vpravo</i> ) – zhuštění v prostoru těsnicí spáry i pod pólovým diskem bylo zadáno .....	74
<b>Obr. 5.11</b> Intenzita magnetického pole v těsnicí spáře ( <i>vlevo</i> ) a průběh indukce v magnetickém obvodu ( <i>vpravo</i> ).....	75
<b>Obr. 5.12</b> Kontrola zajištění saturace MF .....	76
<b>Obr. 5.13</b> Určení kritické polohy vnitřního rozhraní .....	77
<b>Obr. 5.14</b> Průběh indukce po délce kontrolní čáry ve spáře $g$ (body $g$ , resp. $h$ odpovídají předpokládaným polohám vnějšího rozhraní odpovídajícímu 0,2ml, resp. 0,4ml MF).....	77
<b>Obr. 5.15</b> Poloha zvoleného množství MF (0,2ml modře; 0,4ml navíc červeně) při $\Delta p=0$ ( <i>vlevo</i> ) a při kritickém tlaku ( <i>vpravo</i> ).....	78
<b>Obr. 5.16</b> Skutečný průběh indukce štěrbinou bez a za přítomnosti testovaných magnetických kapalin .....	78
<b>Obr. 5.17</b> Průběh indukce doménou 0,3ml MRF122EG ve dvou polohách .....	80
<b>Obr. 5.18</b> Dekomponovaná výpočtová doména MR kapaliny s označením okrajových podmínek ( <i>vlevo</i> ): moving (rotating) wall – modře (stěna rotoru), stationary wall – hnědě (stěna statoru), symmetry – červeně (volné rozhraní MF); detaily strukturované ortogonální síť 51 450 buněk ( <i>vpravo</i> ).....	80
<b>Obr. 5.19</b> Řešení pole obvodové rychlosti ( <i>vlevo</i> ) a proudové funkce ( <i>vpravo</i> ): barevná škála odpovídá nulovým (modrá) až maximálním (červená) hodnotám .....	81
<b>Obr. 6.1</b> Celkový pohled na experimentální sestavu .....	82

---

<b>Obr. 6.2</b> Detail upnutí ucpávky do opěrky soustruhu ( <i>vlevo</i> ), nabitá matrice magnetů ( <i>vpravo</i> ) .....	83
<b>Obr. 6.3</b> Horní pohled na prototyp připravený k testování ( <i>vlevo</i> ); oddělený rotor ( <i>uprostřed</i> ) a stator ( <i>vpravo</i> ) se stopami ferokapaliny po normálním ukončení testování.....	83
<b>Obr. 6.4</b> Trhliny ve ferokapalině při velké šířce $g$ ( <i>vlevo</i> ) a stopy ferokapaliny uniklé pod pólový disk ( <i>vpravo</i> ) .....	84
<b>Obr. 6.5</b> MR kapalina v místě spáry po odpaření určitého množství nosné látky ....	85
<b>Obr. 6.6</b> Porovnání kritického tlaku z experimentu a simulací.....	87
<b>Obr. 6.7</b> Procentuální podíl kritických tlaků z experimentu ku hodnotám ze simulací .....	87
<b>Tab. 2.1</b> Srovnání vlastností vybraných FF a MR kapalin [63, upraveno] .....	29
<b>Tab. 5.1</b> Srovnání vlastností FF a MR kapalin vybraných pro experiment .....	67
<b>Tab. 5.2</b> Vyhodnocení kritického tlaku na základě simulací .....	79
<b>Tab. 6.1</b> Shrnutí výsledků experimentálního ověření funkce axiální ucpávky .....	86