

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TEORETICKÉ

ELEKTROTECHNIKY

DISERTAČNÍ PRÁCE

Elektromechanický systém s magnetickou kapalinou

Školitel: Prof. Ing. Daniel Mayer, DrSc. 2013

Autor: Ing. Petr Polcar

Anotace

Tato práce se zabývá možností využití magnetických kapalin pro vyplnění vzduchové mezery elektromechanických systémů za účelem snížení magnetické reluktance. V úvodní části obsahuje kritický přehled pro problematiku podstatných fyzikálních vlastností těchto moderních materiálů. V následujících kapitolách jsou navrženy, modelovány a ověřovány vlastní originální aplikace včetně inovativní metodiky pro měření klíčového materiálového parametru nutného pro návrh elektromechanických systémů s magnetickou kapalinou.

Klíčová slova

magnetická kapalina, fero kapalina, magnetoreologická kapalina, elektromechanický systém, měření permeability, statická charakteristika, dynamická charakteristika

Abstract

This thesis deals with the usage of magnetic fluids in air gaps of electromechanical systems. The opening part includes critical overview of the key physical properties of magnetic fluids. The following chapters contain designs of original applications and innovative approach to measurement of the key material parameter vital for the design of electromechanical systems with magnetic fluid.

Keywords

Magnetic liquid, ferrofluid, magnetorheological fluid, electromechanical system, permeability measurement, static characteristics, dynamic characteristics

Annotation

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Nutzung der magnetischen Flüssigkeiten in elektromechanischen Systemen. Der erste Teil enthält einen kritischen Überblick gegenwärtiger bekannten physikalischen Eigenschaften magnetischer Flüssigkeiten. Die folgenden Kapitel enthalten Vorschläge originaler Applikationen und eine innovative Einstellung für die Messung von Schlüsselparameter für elektromechanische Systeme mit den magnetischen Flüssigkeiten.

Schlagwörter

Magnetische Flüssigkeit, Ferroflüssigkeit, magnetorheologische Flüssigkeit, elektromechanisches System, Messung der Permeabilität, statische Charakteristik, dynamische Charakteristik

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou na závěr doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci na téma **Elektromechanický systém s magnetickou kapalinou** vypracoval samostatně pod vedením prof. Daniela Mayera, DrSc. s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury, který je součástí této práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této disertační práce je legální.

V Plzni dne 15. 9. 2013

Petr Polcar

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval zejména **prof. Ing. Danielu Mayerovi, DrSc.**, který byl mým školitelem během doktorského studia. Jeho připomínky a cenné odborné rady značnou měrou přispěly k výsledné podobě práce.

Rovněž děkuji **prof. Ing. Ivo Doleželovi, CSc., Doc. Ing. Pavlu Karbanovi, Ph.D.** a dále všem kolegům z Katedry teoretické elektrotechniky FEL ZČU v Plzni, kteří mi poskytli pevné zázemí pro psaní předkládané práce.

Zároveň patří můj dík i všem, kteří mi umožnili průběžně prezentovat dílčí odborné výsledky.

Petr Polcar

Obsah

ÚVOD	12
1 CÍLE PRÁCE	13
2 VLASTNOSTI A APLIKACE SOUČASNÝCH MAGNETICKÝCH KAPALIN	14
2.1.1 Složení magnetických kapalin	14
2.1.2 Dělení magnetických kapalin: ferokapaliny a magneto-reologické kapalin	15
2.1.3 Magnetoviskózní jev magnetoreologických kapalin	16
2.1.4 Brownův pohyb feročástek ferokapalin	17
2.2 Současné způsoby výroby magnetických kapalin	18
2.3 Elektromagnetické vlastnosti magnetických kapalin	18
2.3.1 Elektrická vodivost magnetických kapalin	18
2.3.2 Elektrická pevnost magnetických kapalin	19
2.3.3 Magnetizační charakteristika magnetických kapalin	19
2.3.4 Hystereze magnetických kapalin	21
2.3.5 Curieova teplota magnetických kapalin.....	22
2.3.6 Zhodnocení elektromagnetických vlastností magnetických kapalin	22
2.4 Elektrické motory a aktuátory s ferokapalinou	25
3 ELEKTROMECHANICKÉ SYSTÉMY VYUŽÍVAJÍCÍ FEROKAPALINU KE ZVÝŠENÍ SILOVÉHO PŮSOBENÍ	26
3.1 Silové poměry v elektromechanickém systému s ferokapalinami.....	26
3.2 Magnetický obvod elektromechanického systému s ferokapalinou.....	28
3.3 Analýza elektromechanického systému s ferokapalinou s pomocí MKP	30
3.4 Krokový transduktor s ferokapalinou	39
3.4.1 Studie sil v krokovém transduktoru	41
4 METODIKA PRO MĚŘENÍ PERMEABILITY MAGNETICKÝCH KAPALIN	44
4.1 Specifikace problému	44

4.2	Princip měření permeability kapalin.....	45
4.3	Možné měřicí konfigurace	46
4.3.1	Toroidní tvar měřeného vzorku kapaliny.....	47
4.3.2	Cylindrický tvar měřeného vzorku kapaliny.....	48
4.3.3	Měřicí sonda ponořená ve vzorku měřené kapaliny.....	48
4.4	Určení výsledné indukčnosti s užitím RLC můstku	49
4.5	Příklad - užití metody pro rychlé operativní průmyslové měření permeability magnetických kapalin	50
5	PŘECHODNÉ JEVY V ELEKTROMECHANICKÝCH SYSTÉMECH S MAGNETICKOU KAPALINOU.....	53
5.1	Způsoby řešení elektromechanických systémů.....	53
5.2	Prvky elektromechanických systémů.....	55
5.3	Dynamická analýza aktuátoru s magnetickou kapalinou	56
5.3.1	Formulace rovnic aktuátoru s ferokapalinou metodou stavových proměnných.....	56
5.3.2	Matematický model aktuátoru	64
5.3.3	Příklad - řešení soustavy rovnic popisující dynamické charakteristiky aktuátoru	67
6	EXPERIMENTÁLNÍ VYŠETŘENÍ VLIVU MAGNETICKÉ KAPALINY NA PRŮBĚH CHARAKTERISTIK ELEKTROMECHANICKÉHO AKTUÁTORU	70
6.1	Konstrukce modelu experimentálního elektromechanického aktuátoru	70
6.2	Experimentální ověření statické charakteristiky.....	74
6.3	Experimentální ověření dynamické charakteristiky	77
6.4	Vyhodnocení naměřených charakteristik	80
6.5	Vyhodnocení experimentu	83
	ZÁVĚR.....	84
	POUŽITÁ LITERATURA.....	86

SEZNAM AUTOROVÝCH PRACÍ	91
PŘÍLOHA: ZÁVĚRY PLYNOUCÍ Z PRAKTICKÝCH ZKUŠENOSTÍ Z PRÁCE S MAGNETICKÝMI KAPALINAMI	95
P.1 Velikost molekul ferokapalin	95
P.2 Koloidní nestabilita MR kapalin	95
P.3 Povrchový jev a migrace magnetických kapalin	96
P.4 Práce s kapalinami a permanentními magnety	97
P.5 Čištění objektů od magnetických kapalin	98

Seznam symbolů a zkratek

Použitý systém značení:

\vec{a}	tenzor
\mathbf{a}	vektor
a	skalár

Seznam symbolů:

zkratka	název veličiny	rozměr
\mathcal{G}	lagrangián	[J]
τ	funkcionál	[J]
μ	permeabilita	[H·m ⁻¹]
μ_0	permeabilita vakua ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$)	[H·m ⁻¹]
μ_r	relativní permeabilita	[-]
A	magnetický vektorový potenciál	[Wb·m ⁻¹]
a	zrychlení	[m·s ⁻²]
B	magnetická indukce	[T]
B_{mech}	činitel mechanického tlumení	[N·s·m ⁻¹]
B_v	činitel tlumení vířivými proudy	[N·s·m ⁻¹]
C	kapacita	[F]
D	průměr	[m]
F_g	gravitační síla	[N]
F_m	magnetická síla	[N]
f_m	hustota magnetických objemových sil	[N·m ⁻³]
f_T	součinitel smykového tření	[-]
$F_{\text{víř}}$	síla vyvolaná vířivými proudy	[N]
g	gravitační zrychlení ($g = 9.823 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)	[m·s ⁻²]
H	intenzita magnetického pole	[A·m ⁻¹]
I	elektrický proud	[A]
J	proudová hustota	[A·m ⁻²]
k	elasticita pružiny	[N·m ⁻¹]
k_B	Boltzmannova konstanta ($k_B = 1,3806488 \cdot 10^{-23}$)	[J·K ⁻¹]
k_v	součinitel valivého tření	[-]
l	délka	[m]
L	indukčnost	[H]
m	hmotnost	[kg]
M	magnetizace	[A·m]
m_m	magnetický moment částic	[A·m ²]
M_s	saturační magnetizace	[A·m]
\mathbf{n}	jednotkový normálový vektor	[-]

N	počet závitů	[-]
q_i	zobecněné souřadnice	[-]
r	charakteristický rozměr tělesa	[m]
R	elektrický odpor	[Ω]
R_m	magnetická reluktance	[H^{-1}]
S	povrch	[m^2]
T	teplota	[$^{\circ}C, K$]
v	rychlost	[$m \cdot s^{-1}$]
W_k	pohybová energie	[J]
W_m	energie magnetického pole	[J]
W_p	potenciální energie	[J]
x, y, z	souřadnice prostoru	[m]
α	Langevinův parametr	[-]
δ	šířka mezery	[m]
η	dynamická viskozita	[Pa·s]
Φ	magnetický tok	[Wb]
χ_m	magnetická susceptibilita	[-]

Seznam zkratk:

ČR	Česká republika
KTE	Katedra teoretické elektrotechniky
MKP	metoda konečných prvků
MR	magnetoreologický
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni

ÚVOD

Přestože jsou výjimečné vlastnosti některých magnetických kapalin sledovány již od 40. let 20. století, zažívají tyto materiály v posledním desetiletí nový boom. Intenzivní rozvoj v oblasti nanotechnologií umožnil syntézu nových typů stabilních magnetických kapalin se stále lepšími užitnými vlastnostmi umožňující široké aplikační využití. Přes tento fakt je informovanost o těchto materiálech a jejich aplikacích v České republice nízká a elektrotechnický průmysl je přes zřejmou výhodnost nepoužívá.

Již v 19. století mnozí fyzikové (M. Faraday, T. J. Seebeck a další [1]) předpovídali a zároveň ověřovali výjimečné vlastnosti kapalin obsahujících jemné feromagnetické částičky pod vlivem magnetického pole. Tyto první experimenty ovšem poukázaly na značnou nestabilitu tehdy používaných magnetických kapalin a jejich využití bylo z tohoto důvodu omezeno na studium chování domén pevných látek pod vlivem magnetického pole. Chemikům a materiálovým inženýrům trvalo dalších 100 let, než vyvinuli stabilní magnetické kapaliny. V roce 1938 popsal Elmore přípravu stabilní magnetické kapaliny [2], v roce 1940 si nechal Jacob Rabinow patentovat první zařízení využívající ferokapalinu [3], nicméně cílem intenzivního výzkumu se tyto látky stávají až v 60tých letech 20. století. Od té doby jsou neustále vyvíjeny další a další typy kapalin různých složení a vlastností. K nejvýznamnějším současným producentům a distributorům patří německá společnost Ferrotec GmbH a britské laboratoře Liquids Research Limited. V zemích bývalého východního bloku magnetické kapaliny vyrábí laboratoře při technické univerzitě v Timisoare v Rumunsku a laboratoře Ivanovské Státní Energetické Univerzity V.I. Lenina v Ruské Federaci.

Magnetické kapaliny představují jediný dostupný feromagnetický materiál kapalného skupenství. Jedná se o látky, které zesilují působící magnetické pole a přitom umožňují pohyb ponořených těles. Tato vlastnost vede k myšlence použití magnetických kapalin jako plniva vzduchových mezer v elektromechanických systémech za účelem snížení magnetické reluktance. Tato práce se zabývá právě touto teoretickou aplikací magnetických kapalin.

1 CÍLE PRÁCE

Předkládaná práce se zabývá možností využití magnetických kapalin ve vzduchových mezerách elektromechanických systémů za účelem zlepšení chodu zařízení. Hlavní a dílčí cíle předkládané práce jsou:

- Kritická studie vlastností současných magnetických kapalin souvisejících se zkoumanou s problematikou
- Teoretická analýza elektromechanických systémů s magnetickými kapalinami

Zhodnocení možnosti zlepšení provozních parametrů elektromechanických systémů s magnetickou kapalinou snížením jejich magnetické reaktance s využitím matematického modelu zkoumaného zařízení.

Ideový návrh transduktorů s ferokapalinou a stanovení možností jejich dalšího vývoje

- Experimentální vyšetření vlastností systémů s magnetickou kapalinou

Experimentální vyšetření chodu elektromechanického systému s magnetickou kapalinou.

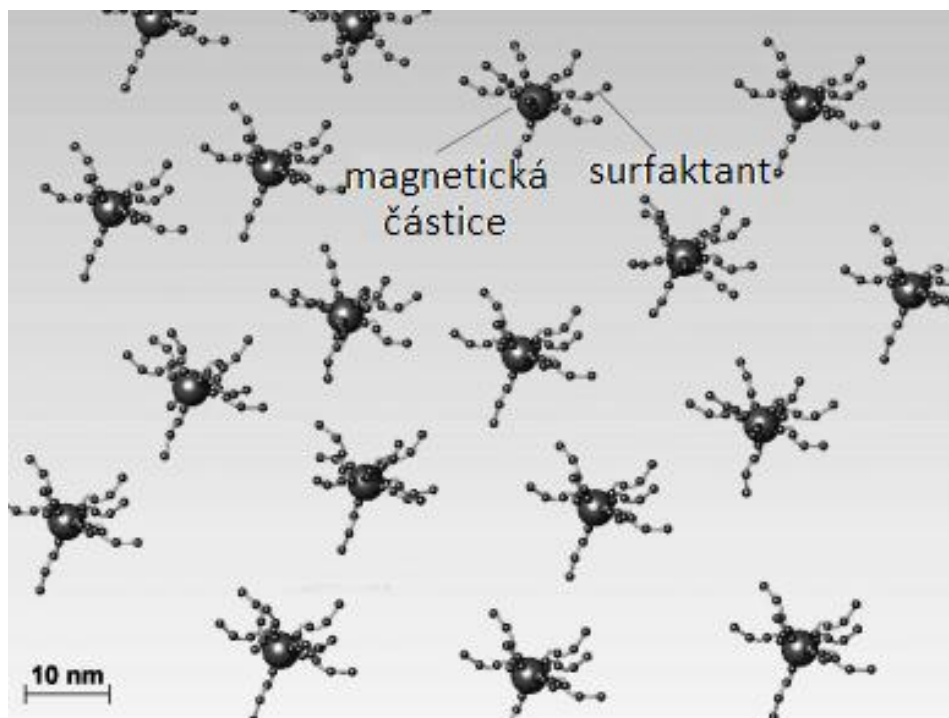
- Vypracování metodiky pro orientační měření permeability magnetických kapalin jakožto klíčového materiálového parametru ovlivňujícího zkoumanou technologii

2 Vlastnosti a aplikace současných magnetických kapalin

2.1.1 Složení magnetických kapalin

První typy magnetických kapalin byly vyráběny mletím magnetitu s heptanem nebo polymerních uhlovodíků a mlecí přísady, např. kyseliny olejové. Běžně používané kapaliny jsou sraženiny železnatých a železitých vodných roztoků (např. Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, MnFe_2O_4 a jiné), pro speciální použití lze ovšem syntetizovat i kapaliny na bázi jiných látek (např. i přechodných prvků jako dysprosium). Tyto částičky jsou pokryty kyselinou olejovou a rozptýleny v nosné kapalině. Nosnou kapalinou může být voda, minerální či rostlinný olej, parafin, petrolej i další. Přestože se chemické složení kapalin může lišit, hlavní vliv na jejich elektromagnetické a mechanické materiálové vlastnosti má velikost částic a četnost jednotlivých velikostí těchto částic obsažených v kapalině. Tato velikost je zároveň kritériem pro jejich dělení. Na základě těchto velikostí lze magnetické kapaliny dělit na fero kapaliny a magnetoreologické (zkráceně MR) kapaliny [4].

Současné magnetické kapaliny jsou dle výrobců koloidně stabilní, tzn. nedochází k shlukování jejich feromagnetických částic, a to ani vlivem magnetických sil. Toho se docílí při výrobě tak, že na každou pevnou částici je chemicky navázán řetězec povrchově aktivního ochranného polymeru (tzv. detergent či surfaktant), který zabraňuje dotyku jednotlivých částic. Surfaktant je tvořen dlouhými řetězci polárních molekul, každý řetězec je jedním koncem pevně vázán s magnetickou částicí a druhým koncem volně přitahován molekulami nosné kapaliny. Vrstva detergentu o šířce 1-2 nm vyvolá odpudivé síly mezi jednotlivými částicemi, pokud by se na tuto vzdálenost přiblížily. Koloidní stabilita má zásadní vliv na fyzikální vlastnosti magnetických kapalin, pokud je porušena, nelze tyto vlastnosti garantovat.



Obr. 2.1.: Struktura typické ferokapaliny [5]

2.1.2 Dělení magnetických kapalin: ferokapaliny a magnetoreologické kapaliny

Jak již bylo zmíněno, hlavním kritériem pro dělení magnetických kapalin je velikost jejich feročástic. Tzv. ferokapaliny dosahují velikosti částic v řádu nanometrů (3-15 nm), magnetoreologické (MR) kapaliny mají velikost částic v řádu mikrometrů (1-20 μm) [6]. S těmito velikostmi souvisí další fyzikální vlastnosti. Přestože jsou obě skupiny magnetických kapalin kapalným feromagnetickým materiálem, velikost částic v řádu mikrometrů umožňuje MR kapalinám vynikat magnetoreologickým (také nazývaným magnetoviskózním) jevem, velikost částic v řádu nanometrů u ferokapalin je příliš malá na to, aby tento jev vznikal. Tím se zcela jasně vymezuje praktické využití jednotlivých kapalin. Na druhou stranu se pevné částičky ve ferokapalinách díky svým nízkým rozměrům a hmotnosti neustále termicky pohybují vlivem Brownova pohybu a vykazují stálý magnetický dipól. Magnetický moment částiček MR kapalin je zcela závislý na působícím magnetickém poli a jejich Brownův pohyb je díky hmotnosti jejich částic zanedbatelný. Těmito fyzikálními vlastnostem se budeme věnovat v dalších kapitolách, ve stručnosti je shrnuje tabulka 2.1.

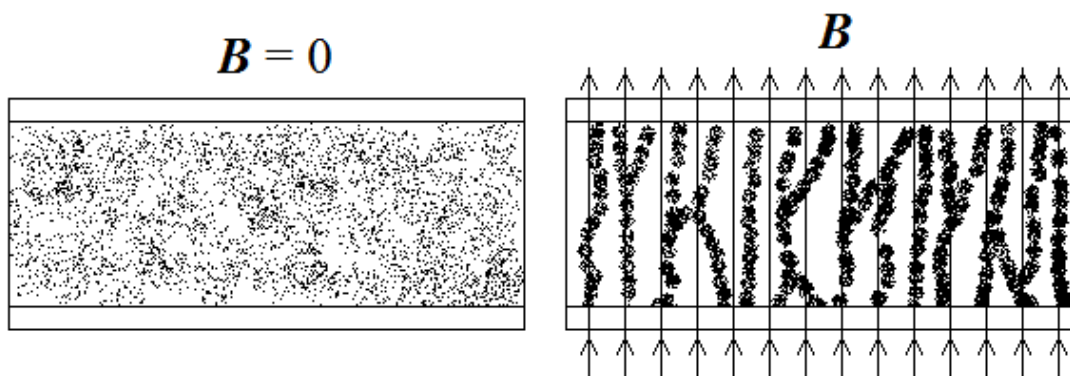
Tabulka 2.1.: Základní rozdíly mezi feroKapalinami a MR kapalinami

	velikost částic	MR jev	Brownův pohyb částic
feroKapaliny	3-15nm	ne	nezanedbatelný
MR kapaliny	1-20 μ m	ano	zanedbatelný

2.1.3 Magnetoviskózní jev magnetoreologických kapalin

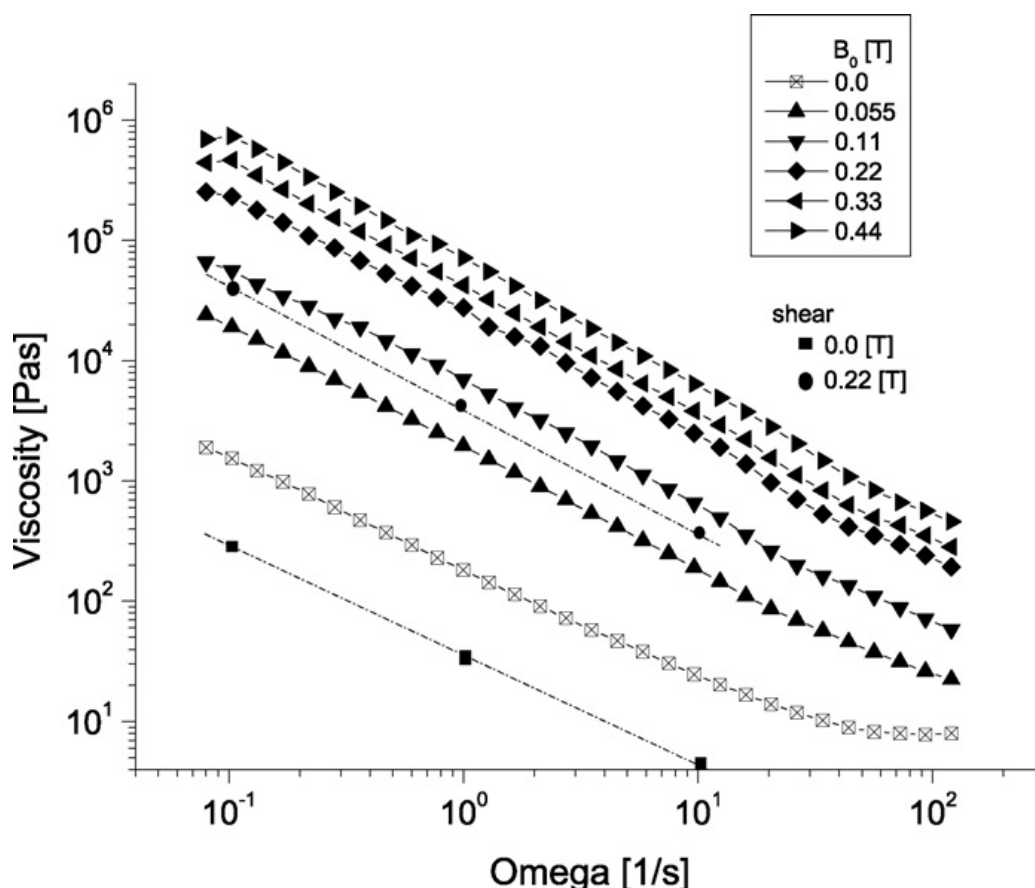
Magnetoreologické kapaliny se vyznačují tzv. magnetoviskózním jevem, jejich viskozita je závislá na působícím magnetickém poli. Podmínkou pro vznik tohoto jevu je dostatečná velikost a koncentrace feročástec v nosné kapalině, feroKapaliny s drobnými, řídce koncentrovanými částicemi jsou druhem magnetických kapalin, který se magnetoviskózním jevem nevyznačuje a jejich viskozitu lze tedy považovat za nezávislou na magnetickém poli.

Změnu viskozity kapaliny vysvětlíme na obr. 2.2. Bez působícího magnetického pole se magnetické částice chaoticky pohybují v nosné kapalině. Při působícím magnetickém poli dojde k uskupení částic ve směru působení tohoto pole. Tato seskupení brání v pohybu kolmém na směr siločar, v případě vysoké koncentrace částic dokonce dochází ke změně skupenství kapaliny na pevné. Řetězce omezují mezimolekulární pohyby. Je zřejmé, že fyzikální vlastnosti kapaliny s takto uskupenými částicemi budou silně anizotropní, nejvyšší viskozita je právě ve směru kolmém na směr siločar.



Obr. 2.2.: Vlevo - Magnetické částice rozptýlené v nosné kapalině, vpravo – agregace částic při působení magnetického pole

Vliv magnetoviskózního jevu může být pozitivní i negativní, záleží na konkrétní aplikaci. Mnohé aplikace s výhodou využívají změnu viskozity s magnetickým polem (magnetická brzda, magnetoreologický řízený tlumič, magnetická kapalinová ucpávka aj.), pro jiné aplikace se jedná naopak o jev negativní, kdy vznikají díky magnetoviskóznímu jevu vyšší viskózní ztráty.



Obr. 2.3.: Viskozita magnetoreologické kapaliny MRHCCS4-B jako funkce otáček rotačního viskozimetru pro různé hodnoty aplikovaného magnetického pole [7].

2.1.4 Brownův pohyb feročástiček ferokapalin

Brownův pohyb je náhodný pohyb mikroskopických částiček rozptýlených v tekutině. Molekuly v roztoku se vlivem tepelného pohybu neustále srážejí, směr a síla těchto srážek jsou náhodné a zároveň i poloha částic je náhodná. Nanorozměry a tedy i nízké hmotnosti nosných částic ve ferokapalinách znamenají, že tyto částice podléhají vlivu Brownova pohybu. Z makroskopického hlediska je kapalina navenek statická, jednotlivé chaotické pohyby se vyrovnávají, v případných mikro- či nanoaplikacích

(například v lékařských aplikacích) ovšem nelze Brownův pohyb zanedbat a jeho vliv je potřeba započítat při návrhu těchto aplikací [6].

2.2 Současné způsoby výroby magnetických kapalin

Vzhledem k rozličným velikostem pevných částic ve fero kapalinách a MR kapalinách se způsoby jejich výroby liší. Hlavním úskalím výroby fero kapalin je velikost nosných částic v řádu nanometrů. Tato velikost velmi znesnadňuje mechanické způsoby výroby a omezuje přípravu na metody využívající chemických reakcí. Mechanicky lze magnetické kapaliny vyrábět tzv. mokřím mletím (blíže viz např. [8]), mezi chemické postupy výroby těchto látek se řadí tzv. srážecí metoda (blíže viz [9]), chemická substituce (blíže viz [10]), mikroemulzní technika (viz např. [11]) a dekompozice organických sloučenin kovů [12]. Převážně se zde jedná o nanotechnologické výrobní postupy.

2.3 Elektromagnetické vlastnosti magnetických kapalin

Fyzikální vlastnosti magnetických kapalin jsou rozdílné pro každý konkrétní druh kapaliny. Obecně lze říct, že závisí na nosné kapalině, dále na látce, ze které jsou vyrobeny pevné částice, a také na velikosti a koncentraci těchto částic v nosné kapalině.

Obecně jsou navíc fyzikální vlastnosti těchto látek silně anizotropní, závisí na působícím externím magnetickém poli. Řetězení částic při působení magnetického pole navíc může způsobovat lokální nehomogenity. Při porušení koloidní stability magnetických kapalin navíc dochází ke shlukování feročástiček, tyto shluky způsobují velmi výrazné lokální nehomogenity.

V následující části práce se zaměříme na významné elektromagnetické fyzikální vlastnosti definující aplikační možnosti magnetických kapalin.

2.3.1 Elektrická vodivost magnetických kapalin

Přestože nano- a mikročástice obsažené v magnetických kapalinách mohou být tvořeny vodivým materiálem, díky jejich miniaturním rozměrům a zamezení spojování částic surfaktantem je výsledná vodivost magnetické kapaliny dána vodivostí její nosné kapaliny. S využitím různých nosných kapalin lze tedy připravit jak vodivé, tak

nevodivé magnetické kapaliny [13]. U nevodivých kapalin se díky malým rozměrům jejich nosných částic do nich nemohou indukovat vířivé proudy [17].

2.3.2 Elektrická pevnost magnetických kapalin

Elektrická pevnost magnetických kapalin je dána převážně elektrickou pevností nosné kapaliny, s růstem koncentrace pevných částic klesá. Experimenty ukázaly [např. 15], že pokud je magnetická kapalina koloidně stabilní, způsobí přítomnost vhodných nanočástic zvýšení hodnoty jejího průrazného napětí až o 50 %. Ferokapaliny na bázi transformátorových olejů si přitom průkazně zachovávají své elektroizolační vlastnosti až do teploty kolem 185 °C. Shlukování pevných částic elektrickou pevnost lokálně snižuje a může dojít k průrazu - je potřeba používat kapaliny, které si zachovávají koloidní stabilitu za takových podmínek, které v konkrétní aplikaci předpokládáme. Magnetické kapaliny na bázi oleje teoreticky lze [dle např. 16] použít jako chladiwa transformátorů, působením magnetického pole je zajištěna jejich cirkulace a lépe se chladí .

2.3.3 Magnetizační charakteristika magnetických kapalin

V elektrotechnických aplikacích předpokládáme využití magneto-viskózních či feromagnetických vlastností magnetických kapalin, znalost těchto vlastností je tedy stěžejní. Obecně lze tyto kapaliny považovat za tekutý feromagnetický materiál, zesilují působící magnetické pole. Jako u všech feromagnetik je jejich magnetizační charakteristika nelineární a dochází k saturaci, konkrétní hodnoty závisí na složení, velikosti a koncentraci feromagnetických částic dané kapaliny. Výrobci kapalin mnohdy nedodávají magnetizační charakteristiky, omezují se pouze na hodnotu saturační magnetizace, tj. takovou hodnotu magnetizace, při které magnetické kapaliny ztrácí svoje feromagnetické vlastnosti.

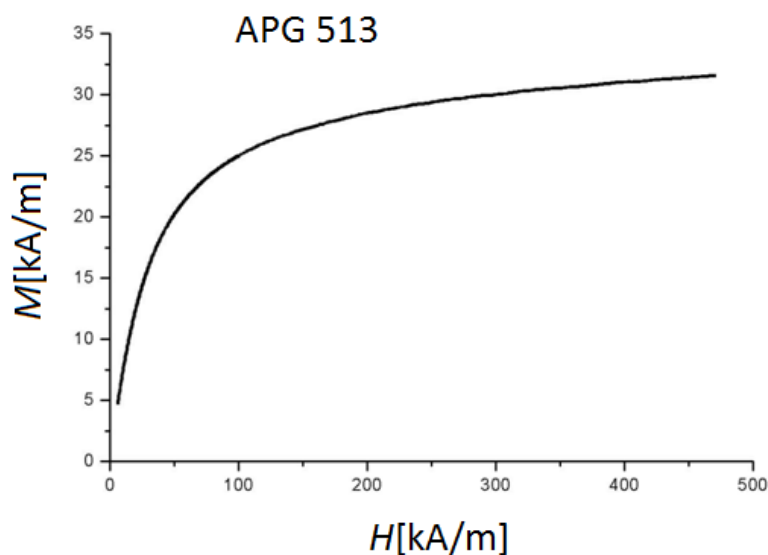
Magnetická kapalina je systém malých kulových částic o velikosti nanometrů (ferokapalina) nebo mikrometrů (MR kapalina). Feromagnetické vlastnosti tohoto systému jako celku se popisují pomocí konceptu používaného pro popis paramagnetických systémů [17], ale velikosti použitých jednotek jsou několikanásobně vyšší. K těm-

to účelům se používá Langevinova funkce popisující závislost magnetizace na působícím magnetickém poli:

$$M = M_s \left(\coth \alpha - \frac{1}{\alpha} \right) \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{\mu_0 m_m H}{k_B T} \quad (2.2)$$

kde M_s značí tzv. saturační magnetizaci, tedy takovou hodnotu intenzity magnetického pole, pro kterou již materiál ztrácí feromagnetické vlastnosti, tedy jeho relativní permeabilita μ_r se blíží jedné. Právě pomocí této hodnoty saturační magnetizace výrobci definují feromagnetické vlastnosti jimi dodávaných kapalin. Tato saturační hodnota závisí na koncentraci feročástek v kapalině a její hodnota je poměrně nízká - dosahuje řádově desetin T. V blízké budoucnosti se předpokládá vývoj nových magnetických kapalin s vyššími hodnotami saturační magnetizace, nicméně v současnosti je potřeba s těmito poměrně nízkými hodnotami počítat. Na obr. 2.4 vidíme příklad magnetizační charakteristiky dodané výrobcem.



Obr. 2.4.: Magnetizační křivka ferokapaliny APG 513 výrobce Ferrotec GmbH [18]

Popis feromagnetických vlastností pomocí hodnoty saturační magnetizace a výrobci dodávané magnetizační charakteristiky mohou být nezvyklé, přepokládáme spíše data ve formě B - H závislosti, ze které lze vyčíst závislost permeability materiálu na působícím

cím magnetickém poli. Zároveň jsou výrobci většinou chemické společnosti a udávají data v starších jednotkách nespádajících do SI soustavy, například velikost intenzity magnetického pole H je často udávána v Oerstedech. Mnohdy je tedy nutný přepočít nejen pro zjištění permeability, ale i mezi fyzikálními jednotkami. Pro tyto účely uvádím přepočít dle vztahů platných pro magnetické vlastnosti materiálů (např. [19]).

Magnetizace M je v soustavě SI definována pomocí magnetické indukce B a intenzity H jako:

$$M = \frac{1}{\mu_0} B - H \quad (2.3)$$

Poměr magnetizace a intenzity magnetického pole se nazývá magnetická susceptibilita:

$$\chi_m = \frac{M}{H}, \quad (2.4)$$

již lze tedy snadno přepočítat na relativní permeabilitu materiálu:

$$\mu_r = \chi_m + 1 \quad (2.5)$$

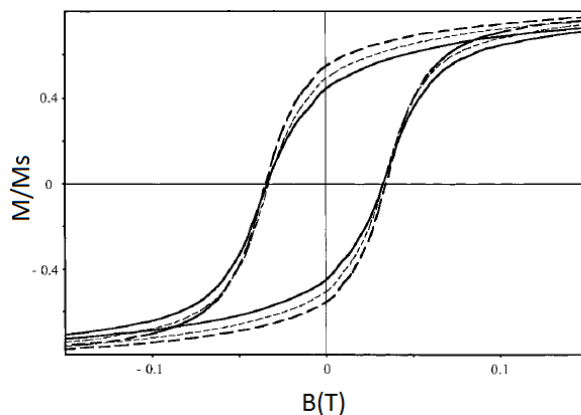
Magnetizační M - H charakteristiku dodávanou výrobcem lze tedy snadno přepočít na B - H charakteristiku, případně odečíst relativní permeabilitu pro libovolnou hodnotu intenzity magnetického pole dle vztahu:

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi_m)H \quad (2.6)$$

2.3.4 Hystereze magnetických kapalin

Jako feromagnetický materiál mají i magnetické kapaliny hysterezní magnetické vlastnosti. Hysterezní smyčku kapaliny lze získat provedením jednoho cyklu magnetování. Pro získání této křivky postačí některá z metod pro měření statické hysterezní smyčky, rozdíly mezi statickou a dynamickou hysterezní křivkou jsou v magnetických kapalinách malé, jedním z důvodů je absence ztrát vířivými proudy díky příliš malé

velikosti feročástic. Hysterezní křivky magnetických kapalin výrobci opět dodávají pouze výjimečně, konstruktéři zařízení využívajících magnetickou kapalinou jsou tedy povětšinou odkázáni na vlastní měření (viz např. [9])



Obr.2.5.: Příklady hysterezních smyček různých vzorků ferokapaliny [9]

2.3.5 Curieova teplota magnetických kapalin

Pro konstruktéra elektrotechnických zařízení je podstatnou hodnotou velikost Curieovy teploty, při které kapalina ztrácí své feromagnetické vlastnosti. Ta je dána pevnými částicemi [20], nicméně zároveň je nutné brát v potaz teplotu varu nosné kapaliny - již před dosažením Curieovy teploty může zkoumaná látka ztratit své kapalné skupenství. Dle pevných částic obsažených v kapalině se hodnoty Curieovy teploty pohybují v rozmezí $-185\text{ }^{\circ}\text{C}$ (částičky na bázi dysprosia) až $1120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (částičky na bázi kobaltu). Nejběžněji používané magnetické kapaliny s částicemi na bázi železa mají Curieovu teplotu okolo $600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.3.6 Zhodnocení elektromagnetických vlastností magnetických kapalin

Magnetizační vlastnosti magnetických kapalin nabízí unikátní elektrotechnický materiál - kapalné feromagnetikum. Přestože je permeabilita magnetických kapalin o několik řádů nižší než permeabilita pevných feromagnetik, stále zesilují působící magnetické pole a nabízí široké aplikační možnosti. Relativní permeabilita současných

magnetických kapalin se pohybuje dle složení, velikosti a koncentrace částic v rozmezí $\mu_r = 1 \sim 5$.

Curieova teplota magnetických kapalin je srovnatelná s Curieovou teplotou pevných feromagnetik, při použití magnetických kapalin s vhodnou tepelnou chemickou stabilitou tedy nerostou nároky na chlazení zařízení. Zároveň se v typických magnetických kapalinách z důvodu velmi nízké konduktivity nevyskytují ztráty způsobené vířivými proudy, systémy s těmito kapalinami mají tedy potenciál vysoké účinnosti.

Magnetoreologický jev u MR kapalin umožňuje konstrukci relativně snadno říditelných přímých elektromechanických převodníků, jako jsou řízené tlumiče (viz např. [21, 22, 23], pro seismické MR tlumiče viz [24]), brzdy (viz [25]) a ucpávky či těsnění rotujících částí [26, 27, 28]). Zároveň ovšem mají tyto systémy na rozdíl od klasických mechanických systémů zvýšené nároky na těsnost, soudržnost a pevnost, protože jejich klíčovou součástí je kapalina.

Vysoká elektrická pevnost feroKapalin v kombinaci s feromagnetickými vlastnostmi se jeví jako vhodná pro použití těchto materiálů jako kapalných izolantů, u kterých lze aplikací vhodného magnetického pole vyvolat proudění. Proudící kapalina se poté lépe chladí. Zájemce o tyto aplikace může vyhledat více informací např. v [15, 16, 29].

Magnetické kapaliny umožňují levitaci diamagnetických těles. Toho lze teoreticky využít ke konstrukci separátorů, praktická aplikace ovšem naráží na vysokou pořizovací cenu magnetických kapalin (více o levitaci v magnetických kapalinách a její aplikaci viz např. [26, 30]).

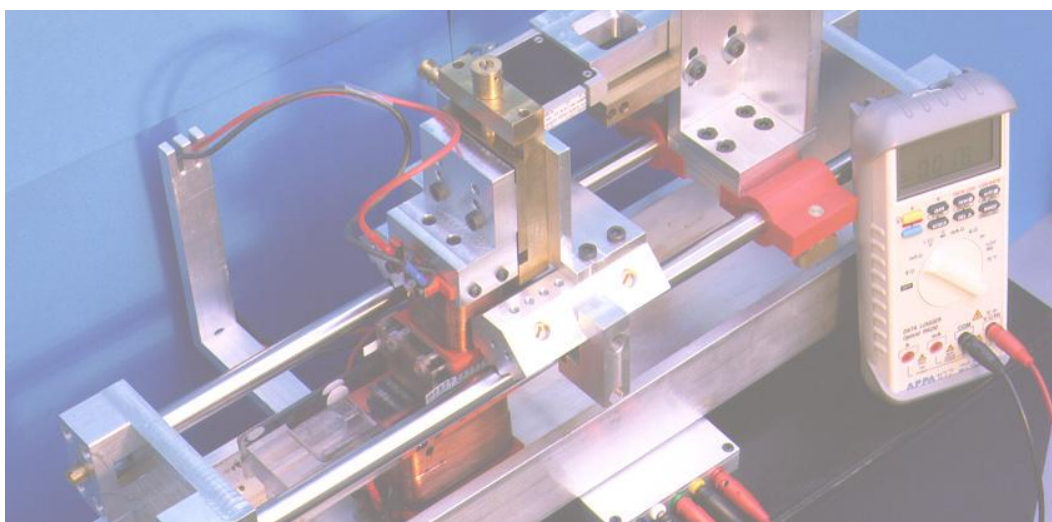
Vhodnou kombinací nosné látky a pevné částice o dané velikosti lze docílit zajímavých kombinací a hodnot elektromagnetických vlastností. FeroKapaliny se díky těmto vlastnostem, velikosti svých molekul a možnosti navázat na ně chemicky další látky zdají perspektivním materiálem pro použití v lékařské technice. Využití magnetických kapalin teoreticky umožňuje několik typů lokální chemoterapie [31, 32], hypertermie a termoablace [33, 34, 35] a magnerelaxometrie [36].

Určitou komplikací je nemožnost aplikovat na magnetické kapaliny řadu metod pro určování materiálových vlastností používaných na pevná feromagnetika. Hlavními důvody znemožňujícími užití těchto metod jsou kapalná skupenství, silná anizotropie a relativně nízké hodnoty permeability ve srovnání s pevnými feromagnetiky. Pro zkou-

mání materiálových parametrů je tedy nutný vývoj speciálních měřících metod respektujících tyto vlastnosti.

2.4 Elektrické motory a aktuátory s ferokapalinou

Feromagnetické vlastnosti při kapalném skupenství ferokapalin vedou k myšlence zlepšení magnetických obvodů elektromechanických systémů vyplněním jejich vzduchové mezery ferokapalinou. Relativní permeabilita ferokapalin $\mu_r > 1$ sníží celkovou magnetickou reluktanci těchto obvodů, a tím roste výsledná magnetická síla. Nevýhodou této technologie jsou viskózní ztráty při pohybu v ferokapalině a s nimi související problémy stability a bezpečnosti, které se výrazně projevují v rychloběžných elektromechanických systémech, např. při potenciálním použití v točivých elektrických strojích. Při rešerši zjišťujeme že výzkum na toto téma probíhá na univerzitě v německém Cottbusu [např. 37, 38, 39, 40] a na našem pracovišti, nicméně tato problematika zatím není dostatečně prozkoumaná a v současné době není známá praktická aplikace tohoto principu.



Obr. 2.6.: Experimentální lineární aktuátor s vzduchovou mezerou vyplněnou ferokapalinou sestavený na univerzitě v Cottbusu [40]

Uvedené publikace pracují s možností využití ferokapaliny v vzduchových mezerách elektromechanických systémů převážně experimentálně a jejich závěry jsou poměrně strohé - při použití magnetické kapaliny může dojít ke zvýšení generovaných sil, její použití se zdá být vhodné v pomaloběžných systémech, kapalinu je potřeba dostatečně utěsnit. Teoretická analýza zkoumaných zařízení chybí, při pokusech o ni je využívána metoda vycházející z teorie magnetických obvodů.

3 Elektromechanické systémy využívající ferokapalinu ke zvýšení silového působení

Ferokapaliny představují tekutý feromagnetický materiál, tj. jejich relativní permeabilita $\mu_r > 1$, a přitom na rozdíl od pevných feromagnetik díky kapalnému skupenství umožňují pohyb v prostředí, které vyplňují. Tato skutečnost vede k myšlence využít je jako výplně vzduchových mezer mezi pevnou a pohyblivou částí elektromechanických systémů za účelem snížení magnetické reluktance zařízení. V této aplikaci nelze využít MR kapaliny, protože nárůst jejich viskozity při aplikaci magnetického pole zabrání případnému pohybu jednotlivých částí.

3.1 Silové poměry v elektromechanickém systému s ferokapalinami

Soudobý elektrotechnický průmysl využívá ve svých zařízeních značné množství různých elektromechanických převodníků, tyto převodníky bývají nazývány elektromechanické aktuátory či transduktory. Konstrukteři těchto zařízení mají k dispozici celou škálu transduktorů s rozdílnými statickými i dynamickými charakteristikami, založených na různých fyzikálních principech, viz např. [41]. Společným požadavkem na tyto prvky bývá mimo jiné nízká hmotnost, malé rozměry a vysoká účinnost. Využití ferokapaliny nabízí zajímavé možnosti pro naplnění těchto požadavků.

Mechanická síla transduktoru je obvykle způsobena stejnosměrným nebo střídavým magnetickým polem působícím na pohyblivou část zařízení. Ta sestává buď z železné kotvy, nebo cívky napájené elektrickým proudem. Kotva, resp. cívka, je částí magnetického obvodu, která může konat pohyb, ať už lineární či rotační. Tento pohyb představuje mechanický výstup transduktoru. Velikost síly způsobující tento pohyb závisí mimo jiné na magnetické indukci; ta očividně roste s poklesem magnetické reluktance procházejícího magnetického toku. Vyplnění vzduchové mezery přítomné v magnetickém obvodu ferokapalinou s permeabilitou $\mu_r > 1$ způsobí pokles celkové reluktance. Nabídka současných ferokapalin je široká, proto odvození výhodnosti tohoto principu provedu výběrem vhodné kapaliny za následujících předpokladů:

Lineární a izotropická permeabilita ferrokapalin.

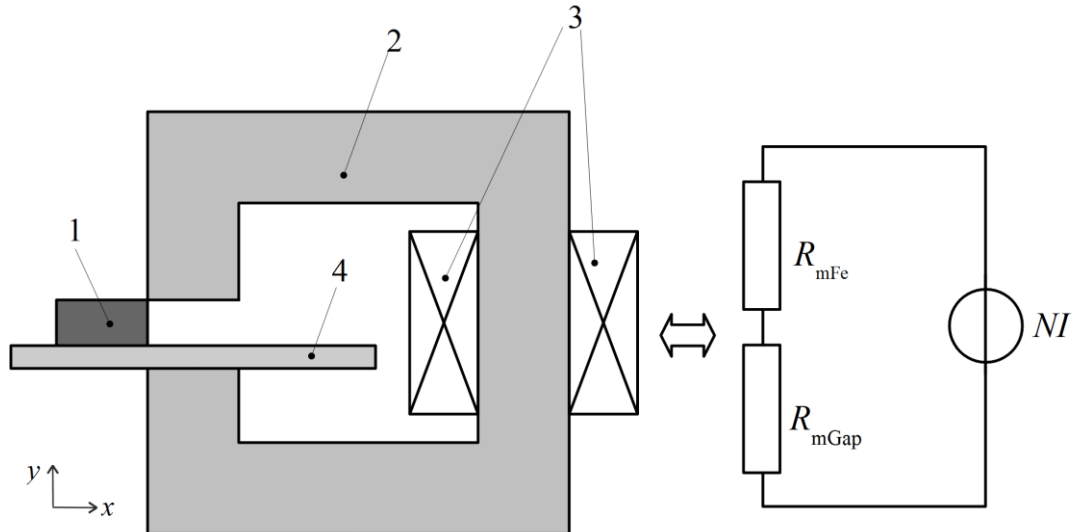
Permeabilita ferrokapalin je obecně nelineární díky magnetické saturaci a obecně funkcí prostoru díky anizotropickým vlastnostem závislejícím na směru působícího magnetického pole, $\mu_r = \mu_r(x, y, z, B)$. Předpokládáme funkci zařízení při relativně nízkých hodnotách magnetické indukce ($B < 0,6$ T), tj. v lineární oblasti magnetizační křivky použité kapaliny. Zároveň předpokládáme, že vektory magnetické indukce \mathbf{B} a magnetické intenzity \mathbf{H} působící na kapalinu a způsobujícího pohyb zařízení procházejícího kapalinou jsou kolineární či s malou odchylkou kolineární, čili anizotropické změny permeability jsou velice nízké, a tedy zanedbatelné. Budeme tedy pracovat s konstantními hodnotami permeability. Tento předpoklad je fyzikálně realizovatelný.

- **Neviskózní kapaliny a statická silová charakteristika.**

Ferokapaliny jsou tekutiny s viskózními vlastnostmi. Pohyb zařízení v oblasti vyplněné ferrokapalinou je tedy brzděn díky viskózním ztrátám. Ferokapaliny v současnosti nabízené na trhu mají dle konkrétního typu dynamickou viskozitu v rozsahu $\eta = 5 \sim 10000$ mPa·s. Omezíme se na výstupní statické charakteristiky elektromechanických systémů s ferrokapalinou, dynamické charakteristiky prozatím nebudou diskutovány. Uvažujeme neviskózní kapaliny, ukážeme pouze možnosti navýšení magnetických sil působících v elektromechanických převodnicích nabízené využitím ferrokapaliny, tj. bez počítání viskózních ztrát. Jelikož je viskozita kapalin dynamickou veličinou a závisí na rychlosti částic kapaliny, tento předpoklad je fyzikálně realizovatelný u relativně pomaloběžných zařízení.

3.2 Magnetický obvod elektromechanického systému s ferokapalinou

Představme si jednoduchý elektromechanický transduktor znázorněný na obr. 3.1.



Obr. 3.1.: Elektromechanický transduktor a jeho náhradní magnetický obvod; 1 - pohyblivá část, 2 - magnetický obvod, 3 - budicí vinutí, 4 - vzduchová mezera mezi pevnou a pohyblivou částí, lze ji vyplnit ferokapalinou

Magnetický obvod vyrobený z feromagnetického materiálu je opatřen budícím vinutím napájeným ze stejnosměrného zdroje. Mezi póly magnetického obvodu je umístěno těleso z téhož feromagnetického materiálu, je-li obvod vybuzen, toto těleso bude vtaženo mezi póly obvodu do takové pozice, kdy bude výsledná energie magnetického pole minimální. Mezi pevnou a pohyblivou částí zařízení je vyžadována vzduchová mezera, aby byl umožněn pohyb. Takové zařízení lze matematicky modelovat s využitím teorie magnetických obvodů (např. [19]).

Celkový magnetický tok, který se uzavírá magnetickým obvodem, je dán celkovým proudem budícím cívku a magnetickým odporem (reluktancí) obvodu:

$$\Phi = \frac{NI}{R_m} = \frac{NI}{R_{m1} + R_{m2}}, \quad (3.1)$$

kde R_{m1} a R_{m2} představují magnetické reluktance feromagnetického materiálu a vzduchové mezery

$$R_{m1} = \frac{l_1}{\mu_1 S}, \quad (3.2)$$

$$R_{m2} = \frac{l_2}{\mu_2 S} = f\left(\frac{1}{\mu_2}\right). \quad (3.3)$$

Výslednou magnetickou sílu působící na pohyblivé těleso ve směru pohybu x lze určit například z celkové energie magnetického pole pomocí vztahu

$$F_x = -\frac{dW_m}{dx}, \quad (3.4)$$

kde

$$W_m = \Phi I. \quad (3.5)$$

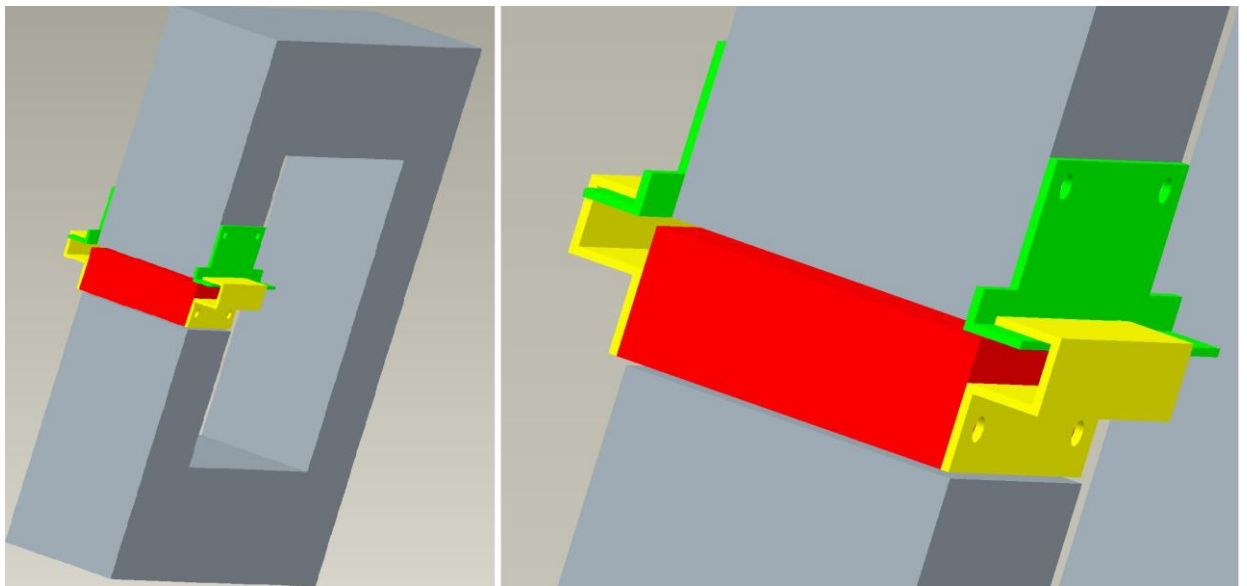
Pro určení této síly lze využít i Maxwellův tenzor pnutí či Lorentz-Korteweg-Helmholtzovy vztahy, viz např. [19].

Je zřejmé, že velikost výsledného magnetického toku (a s ním i velikost působící síly) závisí mimo jiné na magnetické reluktanci vzduchové mezery. Pokud je tato mezera vyplněna ferokapalinou s relativní permeabilitou $\mu_r > 1$, celková magnetická reluktance obvodu klesá a působící síla roste. Víme, že relativní permeabilita v současnosti dostupných kapalin je $\mu_r = 1 \sim 5$ v lineární části jejich magnetizační charakteristiky, použití ferokapaliny tedy teoreticky umožňuje zvýšení působící síly v důsledku snížení magnetické reluktance.

3.3 Analýza elektromechanického systému s ferokapalinou s pomocí MKP

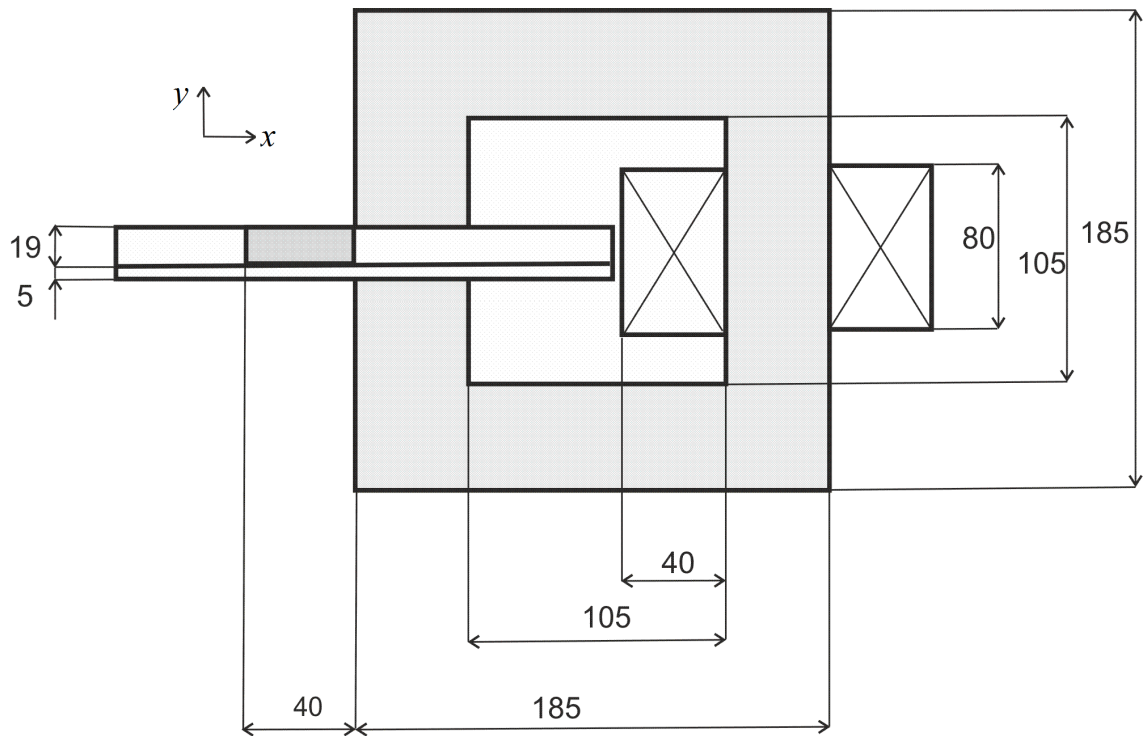
Přestože teorie magnetických obvodů nabízí snadné vysvětlení principu zvýšení magnetických sil, předpokládaný matematický model je příliš jednoduchý a nerespektuje geometrii zařízení, počítá pouze se střední délkou siločáry. Proto bude vytvořen sofistikovanější model problému a numericky řešen s využitím metody konečných prvků. Výsledky buď potvrdí, vyvrátí nebo specifikují kritéria principu zvýšení magnetických sil s využitím ferokapaliny.

Uvažujeme transduktor z obr. 3.1. Pohyblivé těleso vtahované mezi póly magnetického obvodu bude vybaveno lineárním mechanickým vedením (tedy ližinami či lineárním ložiskem) tak, aby bylo zamezeno pohybu tělesa ve vertikálním směru. Toto vedení je umístěno z boku zařízení a vyrobeno z nevodivého nemagnetického materiálu (viz. obr. 3.2.).



Obr. 3.2.: Pohyblivá část transduktoru (červeně) vtahovaná mezi póly magnetického obvodu (šedě) je z boku opatřena lineárním vedením (žlutě a zeleně) tak, aby bylo zamezeno pohybu ve vertikální části.

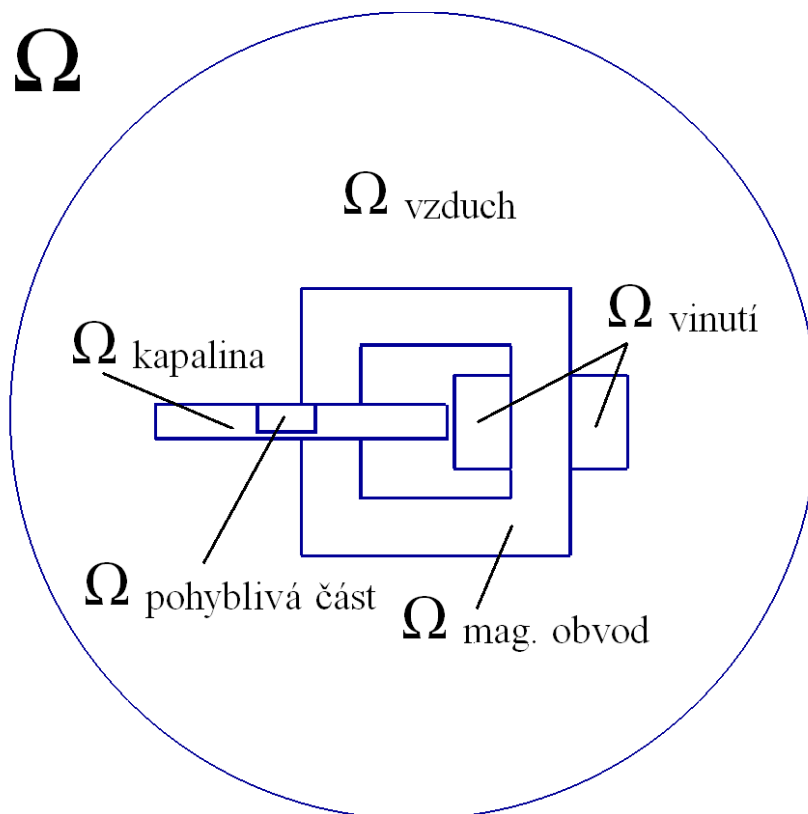
Pro pohyb tělesa je vyžadována mezera mezi pohyblivou a statickou částí zařízení, jak tato mezera, tak celá komora, v které se koná pohyb, mohou být vyplněny ferokapalinou. Uvažovaný transduktor je navržen pro využití v mechanických spínacích procesech a je tedy relativně malý, jeho rozměry lze vidět na obr. 3.3.



Obr. 3.3.: Rozměry uvažovaného elektromechanického transduktoru určeného pro spínací procesy

Magnetický obvod je buzen tak, aby velikost magnetické indukce v jeho mezeře nepřesáhla hodnotu $B = 0,6$ T, což odpovídá proudové hustotě v budicích cívkách $J = 5 \cdot 10^6$ A/m². Jak použitá ferokapalina, tak železo tedy nejsou v saturovaném stavu, relativní permeabilita železa je uvažována $\mu_r = 1000$.

Vzhledem ke geometrickému uspořádání zařízení lze pro jeho simulaci použít 2D model, kdy je magnetické pole indukováno proudem $\mathbf{J} = \mathbf{k} J_z$ a magnetický vektorový potenciál má opět pouze složku $\mathbf{A} = \mathbf{k} A_z$. Zvolíme definiční oblast kruhového tvaru Ω (viz. obr. 3.4), velikost této oblasti později upravíme na základě konvergence jednotlivých řešení. Tato definiční oblast je složena z suboblastí Ω_i obsahujících materiály o různých permeabilitách μ_i (vinutí, magnetický obvod, vzduch, magnetická kapalina). Pro zjištění sil generovaných zařízením bude numericky analyzováno rozložení magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} v oblasti Ω .



Obr. 3.4.: Definiční oblast a suboblasti modelu uvažovaného systému

V našem případě platí v podoblasti budícího vinutí první Maxwellova rovnice, která má v diferenciálním tvaru po dosazení vektorového magnetického potenciálu a následné úpravě tvar

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right)=\mathbf{J}_{\text{ext}}. \quad (3.6)$$

Ve zbylých podoblastech je proudová hustota rovna nule, rovnice tedy nabývá tvar:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right)=\mathbf{0}. \quad (3.7)$$

Pro přesnou formulaci matematického modelu řešeného problému je dále nutné stanovit podmínky, které platí na hranicích definiční oblasti, přičemž obecně je možné volit mezi Dirichletovou podmínkou (okrajová podmínka 1. druhu, na hranici je známa

hodnota potenciálu), Neumannovou podmínkou (okrajová podmínka 2. druhu, na hranici je známa hodnota derivace potenciálu podle vnější normály) nebo smíšenou okrajovou podmínkou (tj. jejich vzájemnou kombinací) [19].

Hranice použité definiční oblasti je siločárou a platí na ní tedy Dirichletova okrajová podmínka:

$$\mathbf{A} = \mathbf{0}. \quad (3.8)$$

Řešením této okrajové úlohy je rozložení magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} na oblasti Ω . Toto řešení lze obecně provést analyticky, nebo s využitím některé numerické metody (v současnosti nejčastěji metodou konečných prvků).

Magnetickou indukci v libovolném bodě oblasti lze při znalosti rozložení magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} určit z jejího definičního vztahu:

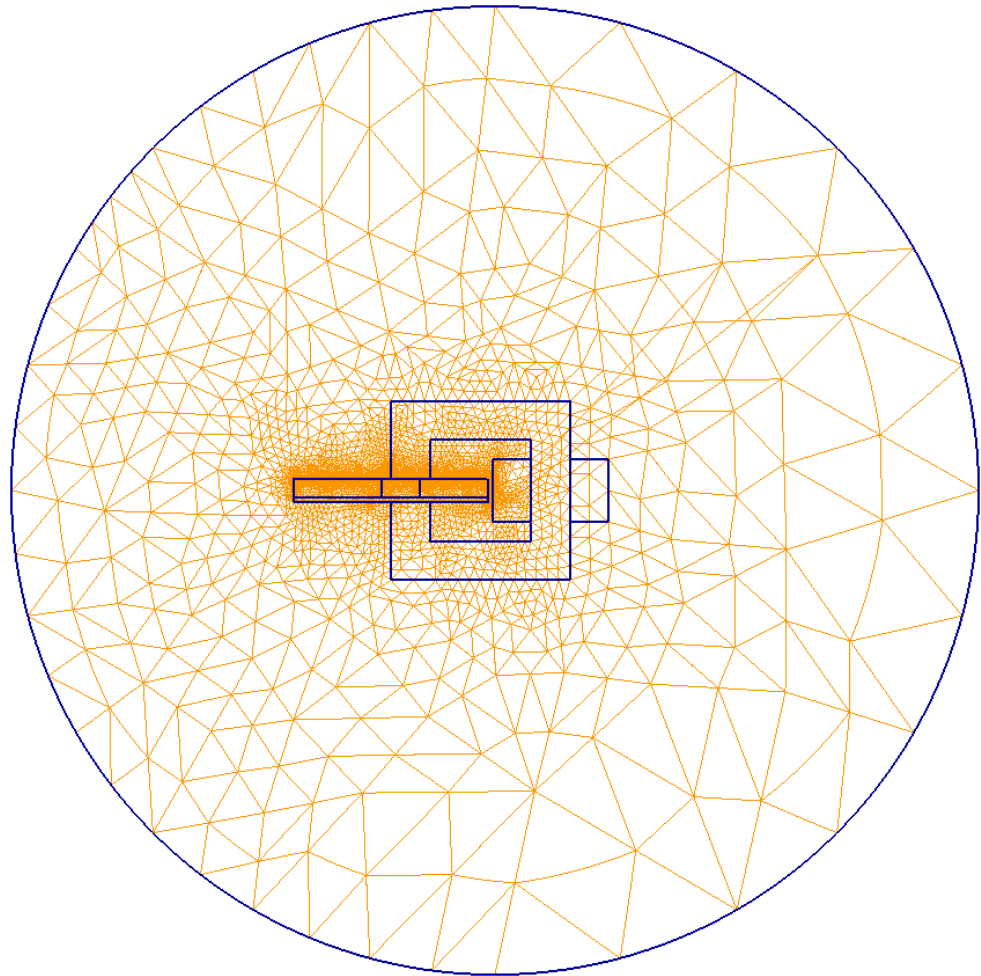
$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A}. \quad (3.9)$$

Magnetická síla působící na pohyblivou část bude určena s použitím známého vztahu pro Maxwellův tenzor pnutí:

$$\mathbf{F}_m = \frac{1}{2} \oint_S [\mathbf{H}(\mathbf{nB}) + \mathbf{B}(\mathbf{nH}) - \mathbf{n}(\mathbf{HB})] dS. \quad (3.10)$$

Cílem našeho zájmu je velikost působící magnetické síly v horizontálním směru, která způsobuje pohyb tělesa. Funkce popisující velikost této síly v závislosti na poloze pohyblivé části vzhledem k stabilní poloze je statickou charakteristikou uvažovaného elektromechanického transduktoru $F_x(l)$.

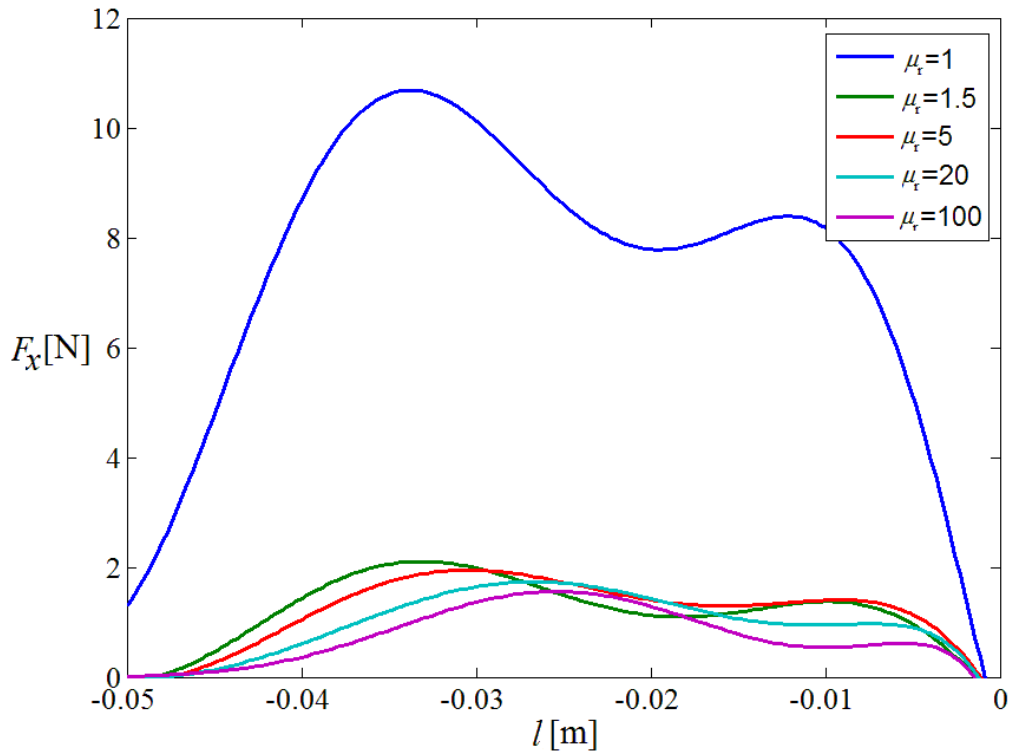
Pro řešení modelu byl použit software Agros2D založený na knihovně Hermes [42] vyvíjený na KTE ZČU s vlastními uživatelskými skripty vytvořenými v jazyku Python. Výstupem simulace je statická charakteristika zařízení, tj. funkce $F_x(l)$. Byla sledována konvergence řešení v závislosti na velikosti definiční oblasti, počtu uzlů a stupni použitého polynomu. Model s 26661 uzly a 11180 elementy 2. řádu byl shledán dostatečně přesným a rychlým, tento model a užitou síť lze vidět na obr. 3.5.



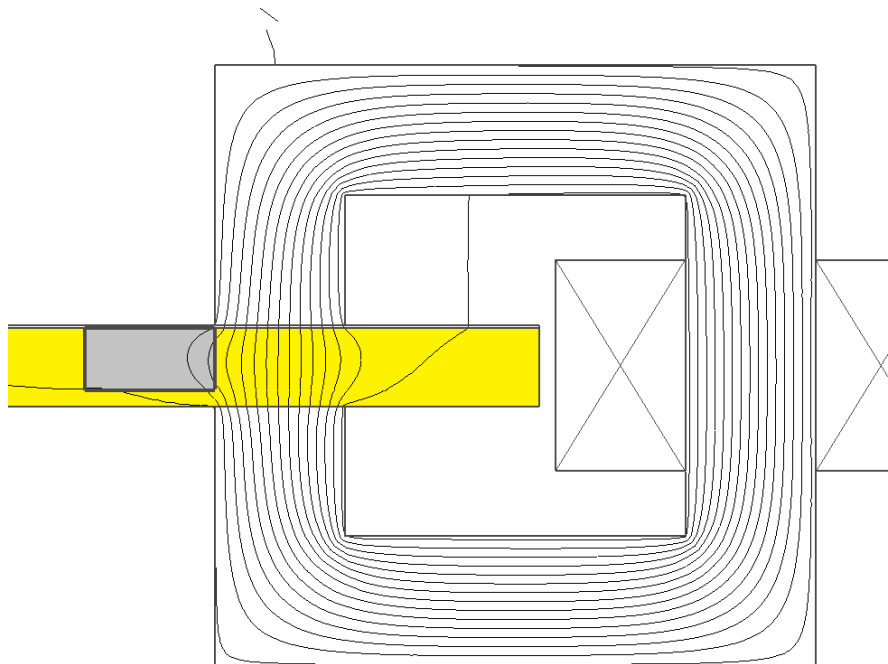
Obr. 3.5.: *Matematický model řešeného transduktoru - definiční oblast a síť*

Celá pracovní komora, tj. oblast mezi póly magnetického obvodu, v které pracuje pohyblivá část, byly vyplněny ferokapalinou. Byla uvažována řada různých typů ferokapalin, dokonce byl sledován i vliv kapalin s vyšší permeabilitou, než $\mu_r = 5$, předpokládá, že v budoucnosti by teoreticky mohlo dojít k vývoji nových typů ferokapalin s vyšší permeabilitou. Výslednou statickou charakteristiku $F_x(I)$ uvažovaného zařízení lze vidět na obr. 3.6.

Na rozdíl od předpokladů daných matematickým modelem založeným na magnetickém obvodu, přítomnost ferokapaliny způsobí značný pokles výsledné působící síly. Důvodem je skutečnost, že výsledný magnetický tok Φ se neuzavírá pouze přes pohyblivou část zařízení, ale také přes ferokapalinu. Tento jev lze sledovat na obr. 3.7.



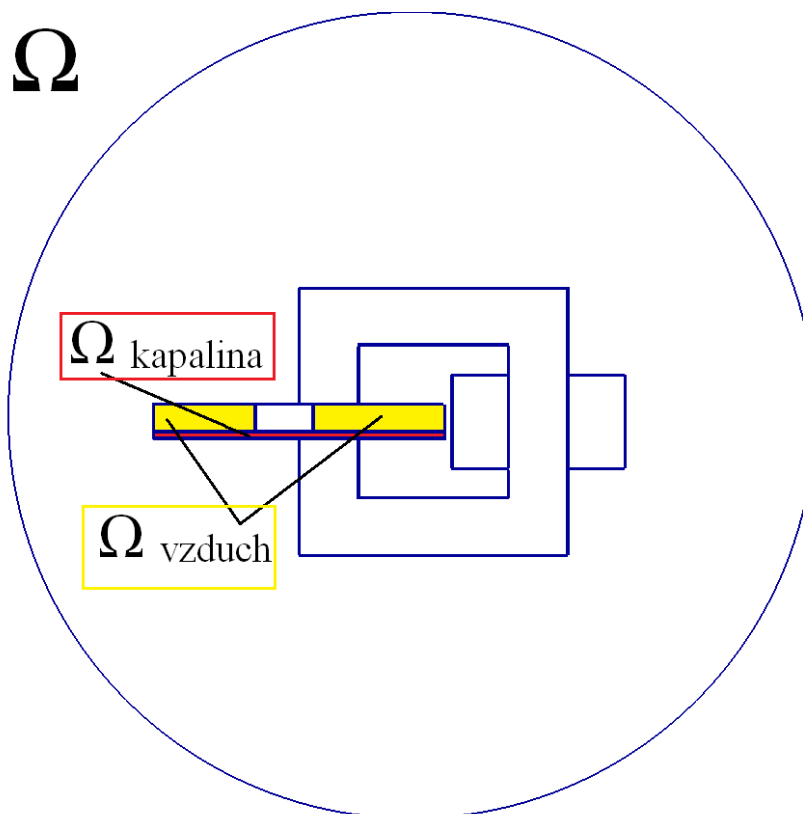
Obr. 3.6.: Statická charakteristika síly v horizontálním směru řešeného transduktoru pro kapaliny s různou permeabilitou, celá pracovní oblast vyplněna ferokapalinou



Obr. 3.7.: Výsledek numerické simulace zobrazující magnetické siločáry. Magnetický tok se neuzavírá pouze přes pohyblivou část (vybarvena šedě), ale i přes ferokapalinu přítomnou v pracovní komoře transduktoru (žlutě), v tomto případě v modelu použita kapalina s permeabilitou $\mu_r = 500$ pro zvýraznění jevu

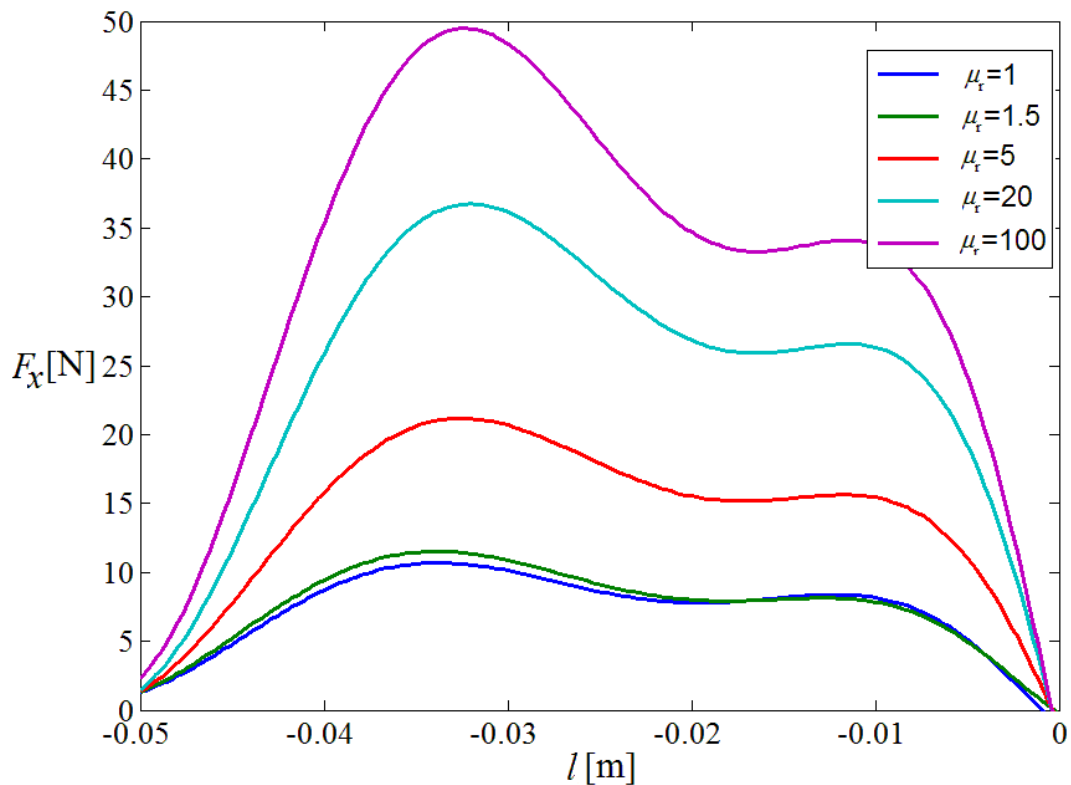
Je zřejmé, že geometrické uspořádání zařízení a oblasti vyplněné ferokapalinou mají zásadní vliv na výslednou sílu a funkčnost zařízení. Model založený na magnetickém obvodu je tedy v řadě případů nedostačující, protože při návrhu zařízení využívajícího ferokapalinu je potřeba brát ohled na prostorovou konfiguraci systému.

V našem případě lze problém vyřešit tak, že kapalina vyplní pouze oblast vzduchové mezery mezi pevnou a pohyblivou částí zařízení, nesmí být přítomna v jiných oblastech. Lineární vedení zajistí, že se pohyblivá část nepotopí do kapaliny. Zabránit tomu, aby kapalina natekla jinam, lze např. tak, že se čela pohyblivé části opatří nástavci z nemagnetického materiálu s permeabilitou $\mu_r = 1$, lze užít např. bloky z plastu. V matematickém modelu dojde k rozdělení definiční suboblasti Ω_{kapalina} na dvě suboblasti, jak ukazuje obr. 3.8.



Obr. 3.8.: Úprava matematického modelu rozdělením suboblasti Ω_{kapalina} na dvě dílčí suboblasti

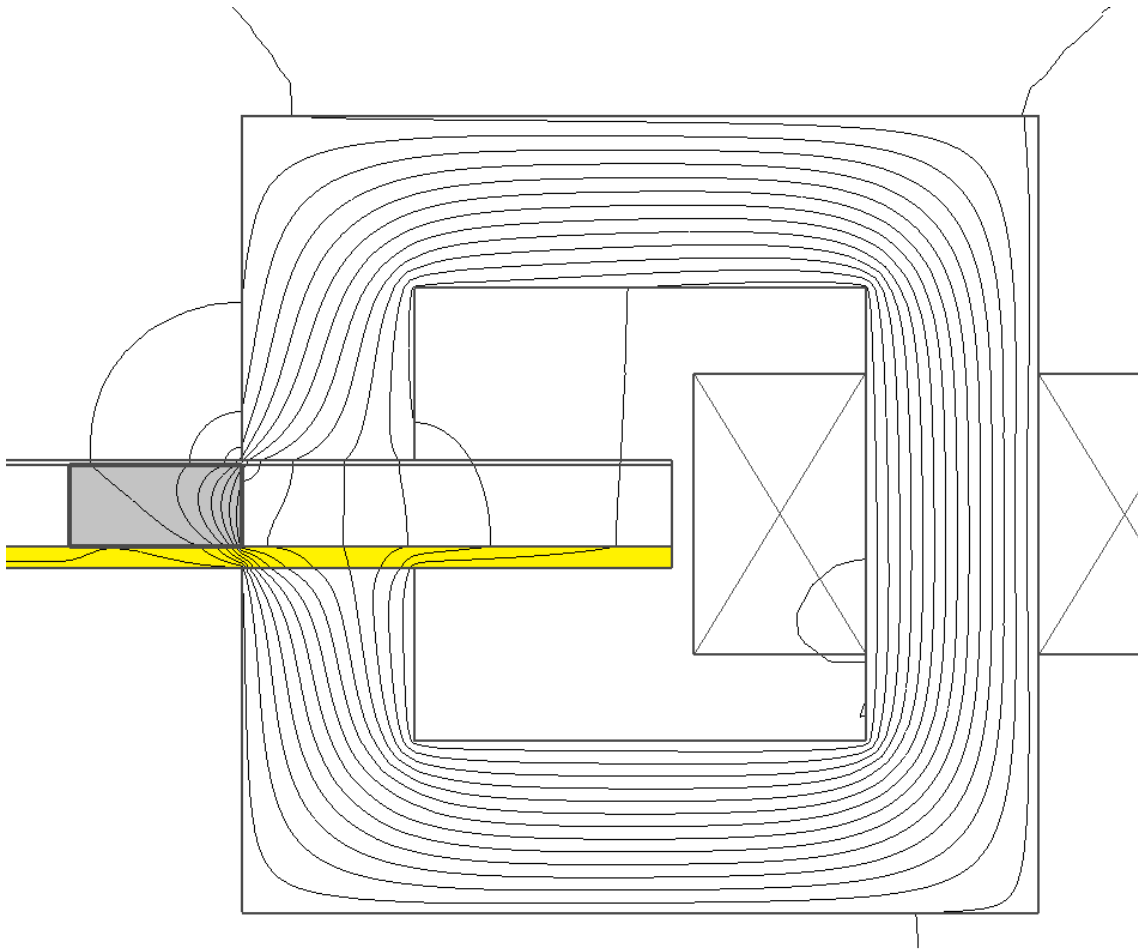
Výslednou statickou charakteristiku získanou numerickým modelem takto upraveného zařízení lze vidět na obr. 3.9.



Obr. 3.9.: Statické charakteristiky síly v horizontálním směru řešeného transduktoru pro kapalinu s různou permeabilitou, pouze vzduchová mezera mezi pevnou a pohyblivou částí je vyplněna ferokapalinou

Lze sledovat znatelné zvýšení sledované působící síly. Na rozdíl od předchozí konfigurace, magnetický tok Φ se uzavírá téměř pouze přes pohyblivou část zařízení, viz. obr. 3.10.

Výhodnost užití ferokapaliny v mezeře elektromechanického systému tedy byla potvrzena i numerickou simulací s využitím MKP. Byla ale objevena geometrická podmínka růstu magnetických sil, která musí být brána v potaz při návrhu zařízení využívajících ferokapalinu ke zlepšení magnetického obvodu.



Obr. 3.10.: Výsledek numerické simulace zobrazující magnetické siločáry. Magnetický tok se uzavírá téměř pouze přes pohyblivou část (vybarvena šedě), v tomto případě v modelu použita kapalina (žlutě) s permeabilitou $\mu_r = 500$ pro zvýraznění jevu

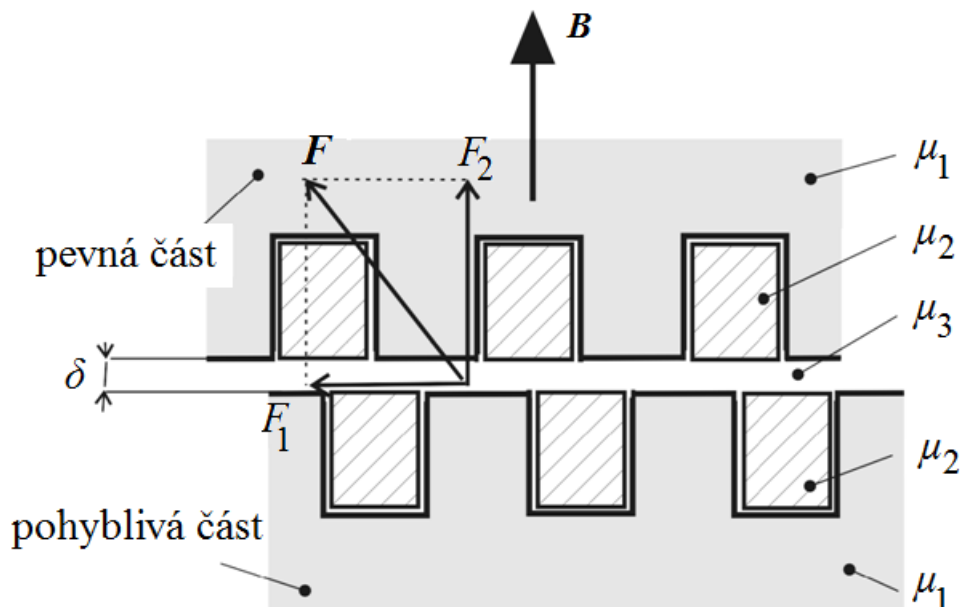
Pro zlepšení funkce zařízení je ve směru působící síly nutná výrazná změna permeabilit. Toho lze dosáhnout použitím různých materiálů. Tento závěr je v souladu s Lorentz-Korteweg-Helmholtzovou teorií definující hustotu magnetických sil jako [3]

$$\mathbf{f}_m = \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \frac{1}{2} \mathbf{H}^2 \text{grad} \mu. \quad (3.11)$$

3.4 Krokový transduktor s ferokapalinou

V předchozí části jsme došli k závěru, že přítomnost ferokapaliny ve vzduchové mezeře působí pozitivně na velikost generované magnetické síly při dodržení geometrické podmínky změny permeabilit ve směru předpokládaného pohybu. Zkoumaný elektro-mechanický systém byl ale poměrně primitivní, v další části bude provedena analýza sofistikovanějšího elektromechanického systému za účelem potvrzení či vyvrácení pozitivního vlivu ferokapaliny ve složitějších zařízeních.

Předpokládáme využití ferokapaliny ve vzduchové mezeře krokového elektro-mechanického transduktoru, jehož konstrukce je znázorněna na obr. 3.11. Tento transduktor lze využít všude tam, kde je vyžadováno přesné lineární polohování.

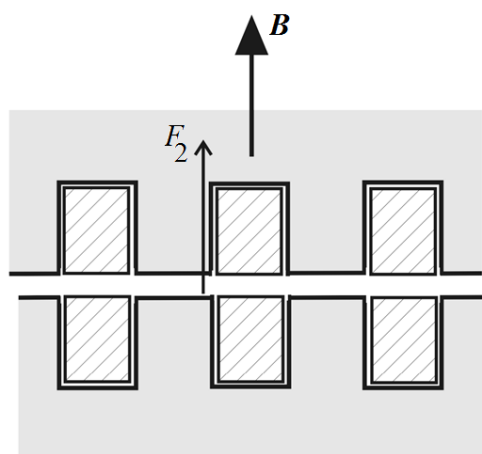


Obr. 3.11.: Princip funkce krokového transduktoru využívajícího ferokapalinu

Jak pevná, tak pohyblivá část transduktoru jsou vyrobeny z feromagnetického materiálu. Obě části jsou opatřeny drážkami vyplněnými nemagnetickým materiálem s permeabilitou $\mu_r = 1$ (např. pryskyřicí či plastem). Pokud na tyto části působí magnetická indukce B , působí mezi nimi síla F . Tato síla má tangenciální složku F_1 a normálovou složku F_2 , jak lze vidět na obr. 3.11. Působící síla uvede pohyblivou část do pohybu, ta

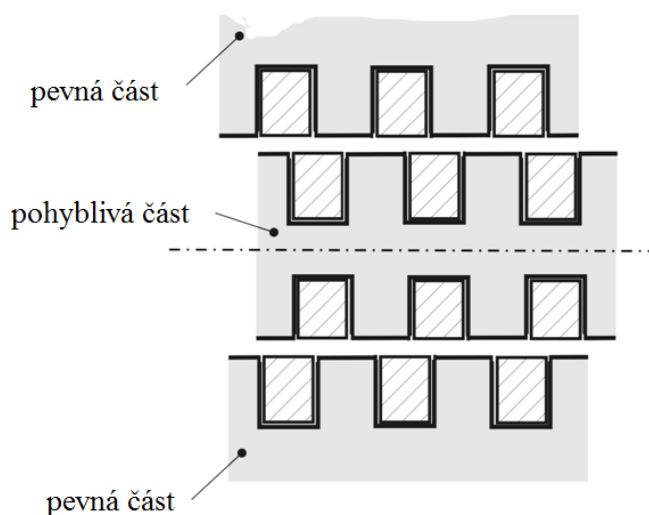
se pohybuje až do polohy s drážkami proti sobě. V této pozici síla F_1 zmizí, zatímco síla F_2 dosahuje svého maxima, viz obr. 3.12.

Další pohyb je docílen zrušením magnetické indukce B_1 a vytvořením magnetické indukce B_2 v jiné části identického transduktoru, která je mechanicky spojena s předchozí částí a geometricky posunuta o požadovanou vzdálenost nižší než délka jedné drážky. Poté dojde k posunu o další krok a celý proces se může opakovat.



Obr. 3.12.: Transduktor v pozici drážka proti drážce, působí pouze vertikální síla

Síla F_2 nemá vliv na výstupní sílu transduktoru, ale může být rušivá. Tuto sílu lze vyrušit symetrickým spojením dvojice transduktorů, viz. obr. 3.13.



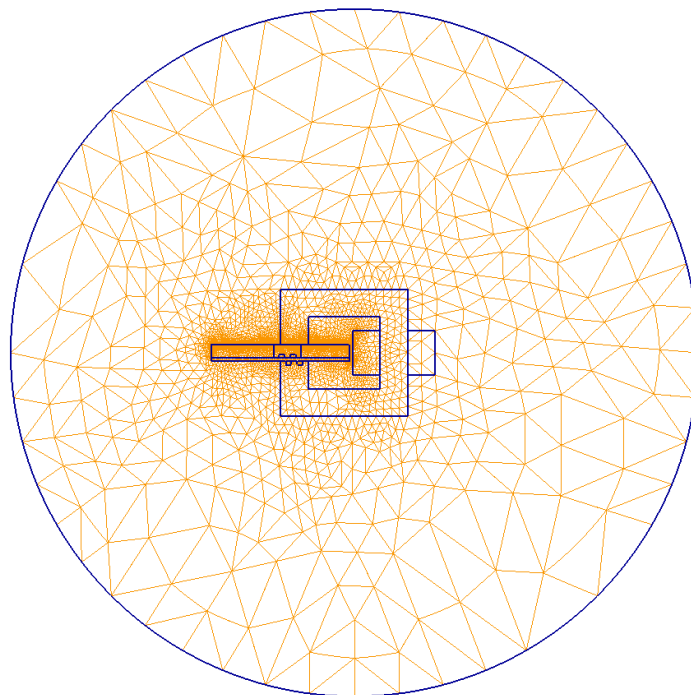
Obr. 3.13.: Symetrické spojení dvou krokových transduktorů za účelem potlačení vertikální síly

3.4.1 Studie sil v krokovém transduktoru

Statická charakteristika navrhovaného krokového transduktoru je závislost horizontální síly na poloze pohyblivé části $F_1=F_1(x)$. Závisí na následujících parametrech:

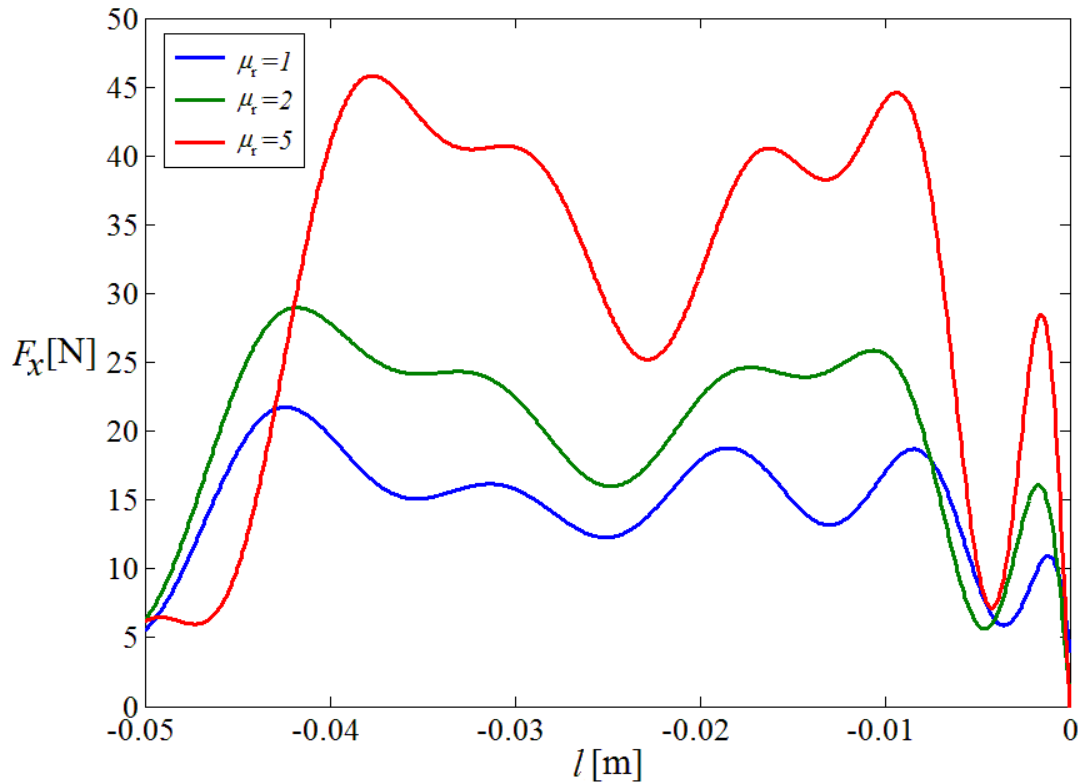
- geometrické rozměry drážek a vzduchové mezery, jejich tvar,
- permeability použitých materiálů: magnetický obvod z feromagnetika $\mu_{r1} \rightarrow \infty$, drážky vyplněné diamagnetickým materiálem $\mu_{r2} = 1$ (plastem či pryskyřicí, magnetický tok se nesmí uzavírat drážkami) a mezera vyplněná kapalinou μ_{r3} (ferokapalina, např. $\mu_{r3} = 1,2 \sim 5$).
- působící magnetická indukce B .

V programu Agros2D byl vytvořen matematický model pro řešení problému pomocí MKP a zvolena definiční oblast. Geometrie problému je poměrně složitá díky tvaru pohyblivé části. Z tohoto důvodu byla užitá MKP s h-p adaptivitou za účelem dosažení vysoké přesnosti při akceptovatelné době řešení [49]. Na základě sledování konvergence výsledných sil byl zvolen model s 835583 uzly a 40832 elementy druhého řádu, použitou síť lze vidět na obr. 3.14.



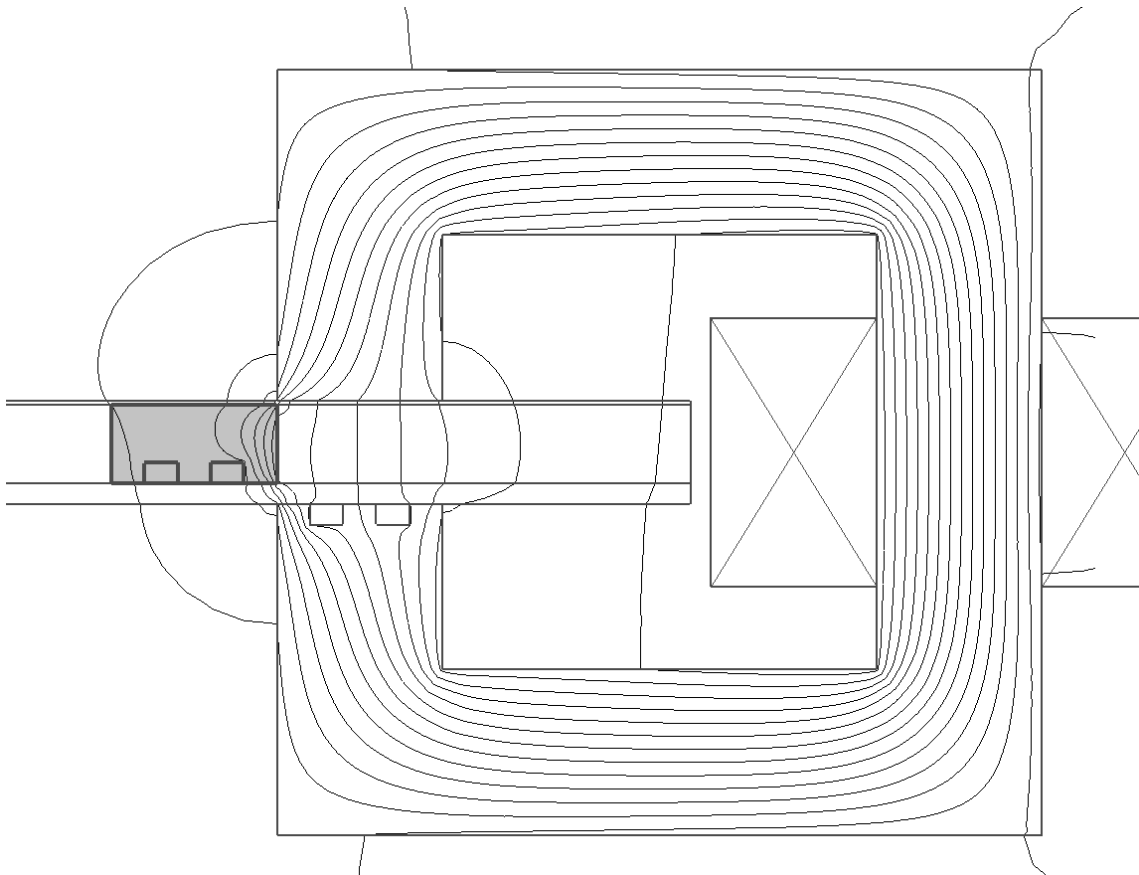
*Obr. 3.14.: Příklad sítě použité pro analýzu magnetického pole v jedné poloze
krokového aktuátoru*

Výslednou statickou charakteristiku pro jeden pohon při vyplnění vzduchové mezery (materiál μ_3 na obr. 3.11) ferokapalinami s různou relativní permeabilitou μ_r lze vidět na obr. 3.15.



Obr. 3.15.: Statické charakteristiky jednoho pohonu modelovaného krokového transduktoru při plnění ferokapalinami o různé relativní permeabilitě

Zesílení statické charakteristiky při použití ferokapaliny je patrné. Zároveň ferokapalina nezpůsobuje odklon magnetického toku Φ od pólů pohonu. Výsledný generovaný magnetický tok Φ uzavírající se přes pohyblivou část zařízení lze vidět na obr. 3.16. Výsledné zvýšení magnetických sil způsobené zlepšením magnetického obvodu dané snížením jeho magnetické reluktance je srovnatelné s relativní permeabilitou použité ferokapaliny.



Obr. 3.16.: Výsledek numerické simulace zobrazující magnetické siločáry. Magnetický tok se uzavírá téměř pouze přes pohyblivou část (vybarvena), v tomto případě v modelu použita kapalina s permeabilitou $\mu_r = 5$

Pozitivní vliv fero kapalinou v mezeře byl potvrzen. Je tedy zřejmé, že vyplnění vzduchové mezery fero kapalinou může značně zvýšit výsledné statické silové charakteristiky elektromechanického převodníku. V další fázi vývoje těchto zařízení se je potřeba zaměřit na:

- Optimalizaci návrhu transduktoru s pomocí numerických optimalizačních metod, kritériální funkce bude $F_1(x)$.
- Konkrétní návrh transduktoru, včetně utěsnění mezery vyplněné magnetickou kapalinou.
- Dynamickou analýzu transduktoru s respektováním viskozity magnetické kapaliny.

4 METODIKA PRO MĚŘENÍ PERMEABILITY MAGNETICKÝCH KAPALIN

Z našich výsledků simulací elektromechanických systémů vyplývá, že přítomnost fero-kapaliny s relativní permeabilitou $\mu_r > 1$ má pozitivní vliv na velikost generovaných elektromagnetických sil. Toto zvýšení sil mimo jiné závisí na magnetizačních vlastnostech použité kapaliny. Znalost velikosti relativní permeability kapalin je tedy pro náš výzkum klíčová.

4.1 Specifikace problému

Pro kvalitní návrh jakéhokoli elektromechanického zařízení je nutné znát materiálové vlastnosti použitých součástí. Nejdůležitějšími parametry definujícími vlastnosti magnetických kapalin jsou jejich magnetizační a magneto-viskózní vlastnosti. Na rozdíl od magneto-viskózních křivek, které jsou hlavně u většiny magnetoreologických kapalin dostupné [43], výrobci obvykle negarantují - a mnohdy ani nedodávají - magnetizační charakteristiky magnetických kapalin a konstruktéři jsou tedy odkázáni na vlastní měření.

Měřicí metody pro určování magnetizačních vlastností pevných feromagnetik jsou v současnosti detailně popsány [např. 44], ale tyto metody nelze využít pro magnetické kapaliny, které mají tyto specifické vlastnosti:

- velmi nízkou relativní permeabilitu,
- zanedbatelnou hysterezi,
- jejich magnetická nelinearita se projevuje až při dosažení relativně vysokých hodnot magnetizace.

Pro konstruktéra elektromechanických zařízení je nejdůležitějším magnetickým parametrem materiálu jeho magnetická permeabilita. Různé formy permeability v izotropním prostředí (např. počáteční permeabilita, reverzibilní permeabilita) splývají v jediný materiálový parametr definovaný poměrem $|\mathbf{B}|/|\mathbf{H}|$ [viz např. 19].

Magnetické kapaliny představují poměrně komplexní fyzikální prostředí. Pokud na magnetickou kapalinu nepůsobí externí magnetické pole (tj. intenzita magnetického

pole $\mathbf{H} = \mathbf{0}$), je magnetická kapalina izotropní, zatímco pokud $|\mathbf{H}| > 0$, kapalina vykazuje anizotropii, přičemž tato anizotropie je výraznější s nárůstem $|\mathbf{H}|$. Při nízkých hodnotách $|\mathbf{H}|$ je magnetická kapalina lineární, při vyšších hodnotách se projevuje magnetická saturace a způsobuje nelinearitu. Při $|\mathbf{H}| = 0$ jsou magnetické kapaliny homogenní, ale při vyšších hodnotách $|\mathbf{H}|$ se v kapalině vytváří řetězce feromagnetických částic a tyto struktury způsobují lokální nehomogenity. Pokud je působící externí pole nehomogenní, vznikají vyšší koncentrace těchto řetězců částic v oblastech s vyšším $|\mathbf{H}|$ a magnetická kapalina se chová jako magneticky nehomogenní. Speciálně, pokud je externí magnetické pole homogenní, magnetická kapalina je také magneticky homogenní.

Pro magnetické kapaliny tedy platí pro podíl mezi vektorem magnetické indukce \mathbf{B} a vektorem intenzity magnetického pole \mathbf{H} vztah

$$\mathbf{B} = \vec{\mu}\mathbf{H}, \quad (4.1)$$

Kde $\vec{\mu}$ je tenzor permeability. Prvky tohoto tenzoru permeability jsou dány vztahem

$$\mu_{ij} = \mu_{ij}(\mathbf{H}, x, y, z); i, j = 1, 2, 3. \quad (4.2)$$

Analýza magnetického pole v takovém komplexním prostředí je tedy velice složitá.

Mým cílem ovšem nebyl vývoj měřicí metody pro určení tenzoru permeabilit magnetických kapalin $\vec{\mu}$, ale fundamentální úloha vyšetření permeability μ při orientaci magnetických kapalin ve směru \mathbf{S} pod vlivem magnetického pole orientovaného \mathbf{H} . Ve většině praktických aplikací magnetických kapalin jsou tyto vektory orientovány kolineárně a zároveň se pracovní bod systému pohybuje po lineární části magnetizační křivky kapaliny, zaměřil jsem se tedy na vyšetření permeability v takovýchto konfiguracích. V budoucnu předpokládám vývoj zobecněné metody umožňující vyšetření permeability při obecném směru vektorů \mathbf{B} a \mathbf{H} .

4.2 Princip měření permeability kapalin

Pokud zajistíme, že je měřený vzorek magnetické kapaliny magnetizován homogenním magnetickým polem, platí pro indukčnost toroidní cívky z teorie elektromagnetického pole [např. 19] známý vztah

$$L = \mu F(N^2, \text{ rozměry cívky}), \quad (4.3)$$

kde $\mu = \mu_0 \mu_r$ je permeabilita materiálu jádra cívky a funkce F závisí na počtu závitů N a na geometrických rozměrech cívky. Pokud je indukčnost cívky s vzduchovým (dutým) jádrem L_0 a indukčnost cívky s jádrem vyplněným magnetickou kapalinou L_x , je relativní permeabilita magnetické kapaliny:

$$\mu_r = \frac{L_x}{L_0}. \quad (4.4)$$

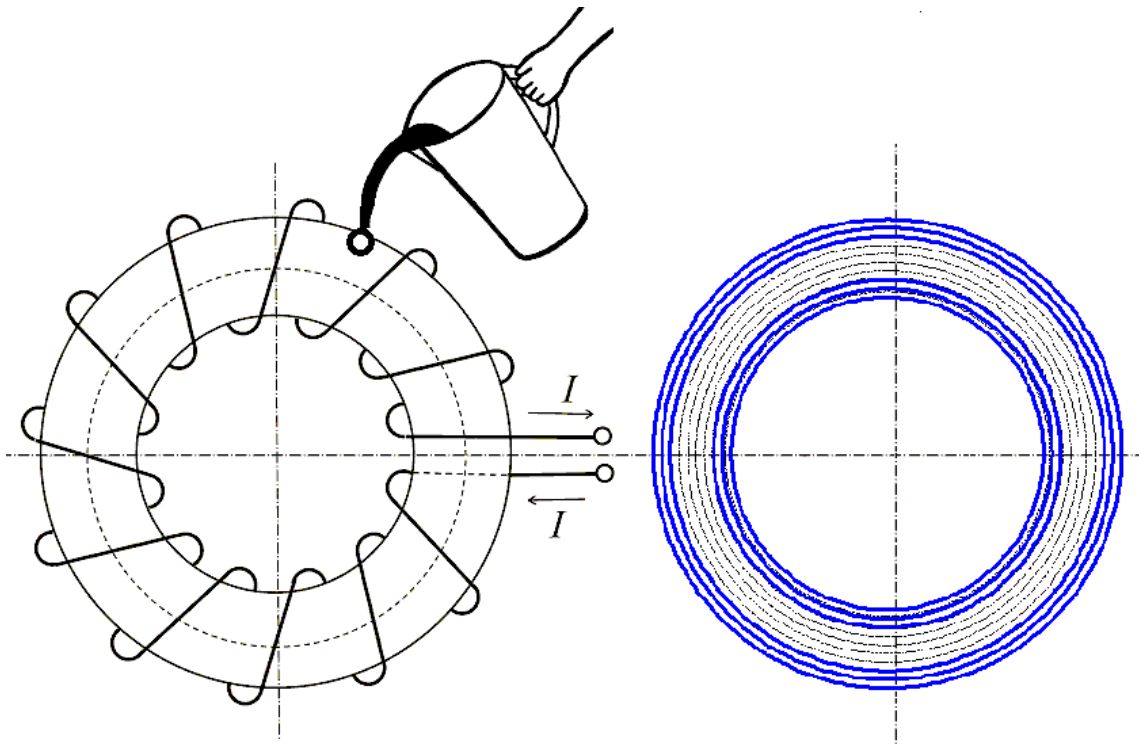
Cílem měření tedy bude určení indukčnosti cívky s a bez jádra vyplněného magnetickou kapalinou. Existuje mnoho metod měření indukčnosti cívky, např. [44]. Pokud máme k dispozici vzorek magnetické kapaliny se známou permeabilitou, lze ho použít k ocejchování.

4.3 Možné měřicí konfigurace

Zvážil jsem a numericky jsem nasimuloval několik možných konfigurací pro měření indukčnosti cívky s jádrem vyplněným kapalinou vybuzené proudem za účelem volby nejvhodnější konfigurace. Bylo sledováno množství generovaných magnetických rozptylových toků a cesty, jimiž se uzavírají. Díky nízké relativní permeabilitě magnetických kapalin (z teorie známe $\mu_r = 1 \sim 5$) má vznikuvší magnetický tok tendenci uzavírat se pouze přes měřený vzorek kapaliny, ale také přes okolní prostředí, např. přes stěny nádoby, cívku či dokonce feromagnetické materiály v okolním prostředí. Tyto permeability mohou ovlivnit výslednou změřenou indukčnost. Z tohoto pohledu je ideální měřicí konfigurace taková, že se celý magnetický tok uzavírá přes vzorek měřené kapaliny. Fiktivní magnetická kapalina s relativní permeabilitou $\mu_r = 2$ byla použita v matematických simulacích navrhovaných konfigurací, kapaliny s vyšší permeabilitou by generovaly ještě méně rozptylových magnetických toků. Simulace byly provedeny s využitím metody konečných prvků (MKP) v programu Agros2D [42].

4.3.1 Toroidní tvar měřeného vzorku kapaliny

Dutá nádoba ve tvaru anuloidu je naplněna magnetickou kapalinou. Na nádobu je rovnoměrně navinuta cívka, indukčnost výsledné cívky je cílem měření. Závity je nutno navíjet rovnoměrně podél celého toroidu, aby výsledné pole v jádře toroidní cívky bylo homogenní. Jak lze vidět z obr. 4.1, magnetický tok vznikající vybuzením cívky se uzavírá pouze přes měřenou kapalinu, ale zároveň i stěnami nádoby. Permeabilita materiálu použitého na tuto nádobu ovlivní výslednou indukčnost cívky. Z tohoto důvodu je potřeba zvolit nádobu s co možná nejtenčí stěnou z diamagnetického materiálu (ideálně $\mu_r = 0$) pro co nejmenší ovlivnění měření.

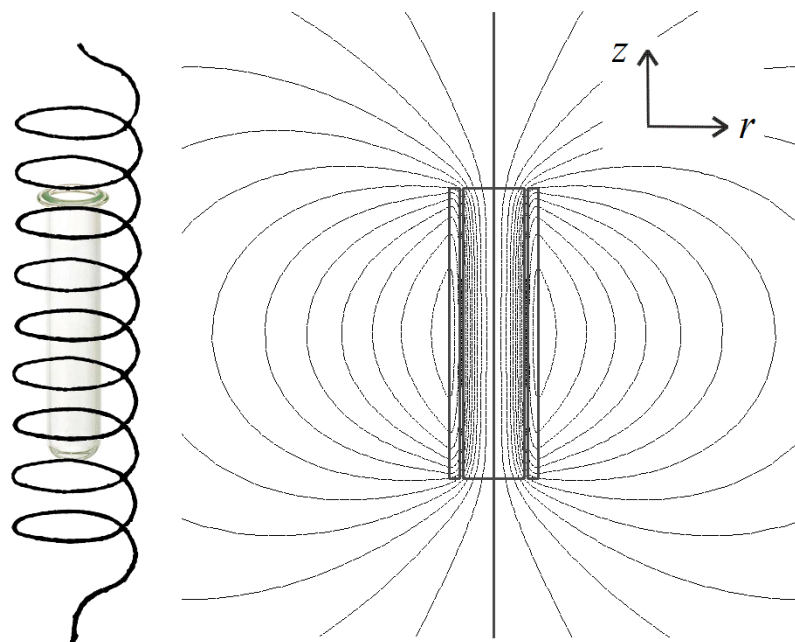


Obr. 4.1.: Měřicí konfigurace s toroidním tvarem vzorku měřené kapaliny a výsledek její 2D numerické simulace v planárním souřadném systému zobrazující magnetické siločáry

Tato konfigurace má ovšem několik praktických omezení z důvodu náročné údržby. Pro naplnění toroidu kapalinou je potřeba otvor, který ovšem naruší rovnoměrné navití a způsobí nehomogenitu. Mnohé magnetické kapaliny navíc používají jako nosnou kapalinu olej, takže při výměně měřené kapaliny je potřeba měřicí zařízení rozebrat a vyčistit.

4.3.2 Cylindrický tvar měřeného vzorku kapaliny

Dutá válcová nádoba (např. zkumavka) je naplněna měřenou magnetickou kapalinou. Dlouhá cívka je rovnoměrně navinuta kolem nádoby. Indukčnost vzniklé cívky je porovnána s indukčností cívky s prázdnou nádobou. Jak lze vidět na obr. 4.2, magnetický tok se neuzavírá jen přes měřenou kapalinu, ale zároveň přes stěny nádoby a vinutí cívky, a dokonce se může uzavírat i přes feromagnetická tělesa umístěna vně cívky. Permeability těchto materiálů opět ovlivní výslednou indukčnost, pro eliminaci této chyby je potřeba poměrně velký okolní prostor bez přítomnosti feromagnetických těles. Na druhou stranu, údržba, provoz a čištění této konfigurace je snadné a pro každý vzorek kapaliny lze snadno zajistit vlastní nádobu.



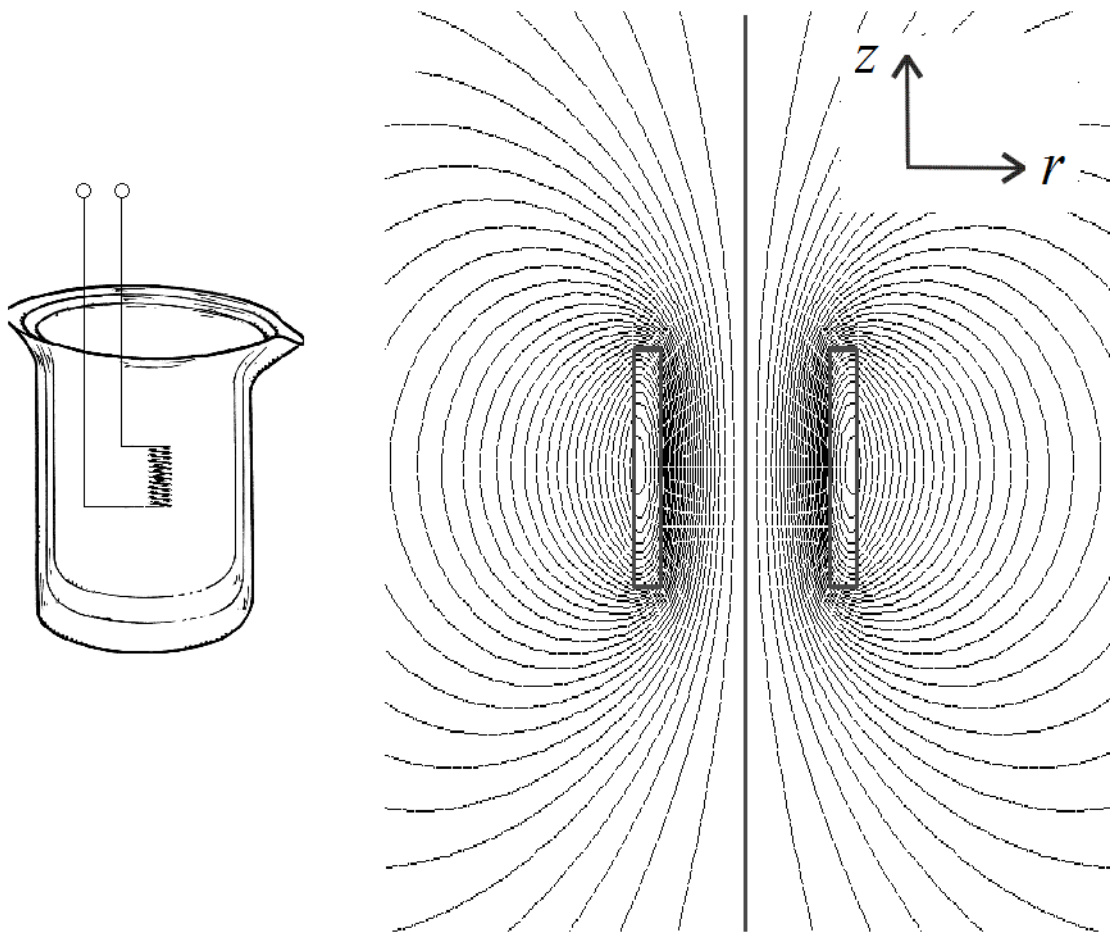
Obr.4.2.: Měřicí konfigurace s válcovým tvarem vzorku měřené kapaliny a výsledek její numerické simulaci v osově symetrickém souřadném systému znázorňující magnetické siločáry

4.3.3 Měřicí sonda ponořená ve vzorku měřené kapaliny

Malá solenoidní cívka byla zvolena jako měřicí sonda a ponořena do nádoby s měřenou magnetickou kapalinou. Pokud je nádoba dostatečně velká, magnetický tok generovaný

cívkou se uzavírá pouze přes kapalinu a přes vlastní cívku, viz obr. 4.3. V této konfiguraci ovlivní výslednou indukčnost pouze permeabilita měřené kapaliny a materiálu použitého na výrobu cívky. Z tohoto důvodu by cívka měla být co nejsušnější a navinuta z diamagnetického materiálu (např. z mědi) pro minimalizaci výsledné chyby měření.

Tato konfigurace má řadu hlavně praktických výhod. Ponoření a vyjmutí sondy z kapaliny lze provést rychle a operativně, údržba je také snadná. Tuto konfiguraci lze z těchto důvodů doporučit pro průmyslové využití.



Obr.4.3.: Měřicí konfigurace s cívkou ponořenou do měřené kapaliny a výsledek její numerické simulace v osově symetrickém souřadném systému znázorňující magnetické siločáry.

4.4 Určení výsledné indukčnosti s užitím RLC můstku

Je známo mnoho metodik určování indukčnosti cívky, nejběžnější metodou je můstkové měření s využitím měřicího RLC můstku. V případě využití můstku je potřeba určit

velikost proudu, který prochází měřenou cívku, jelikož výsledná permeabilita bude odpovídat jednomu příslušnému pracovnímu bodu magnetizační křivky. Pro vyvážený můstek je dle typu použitého zařízení mnohdy měřená cívka buzena nízkými hodnotami proudu (prakticky bez proudu) a je tedy měřena tzv. počáteční permeabilita [blíže viz. např. 19]

$$\mu_{r0} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} \quad (4.4)$$

Jak již bylo řečeno, tvar B - H křivky magnetických kapalin se liší od křivek pevných feromagnetických materiálů a hodnotu počáteční permeability lze s malou nepřesností považovat za hodnotu permeability v lineární části B - H křivky. Pokud chceme získat hodnotu permeability pro vyšší hodnoty H , je potřeba vzorek při měření externě předmagnetovat.

4.5 Příklad - užití metody pro rychlé operativní průmyslové měření permeability magnetických kapalin

Pro návrh elektromechanického aktuátoru využívajícího zlepšení magnetického obvodu vyplněním vzduchové mezery magnetickou kapalinou je potřeba znát její relativní permeabilitu μ_r v lineární části magnetizační křivky, kde leží pracovní body zařízení. Kapalina bude v aktuátoru pracovat tak, že vektory \mathbf{H} a \mathbf{S} jsou kolineární.

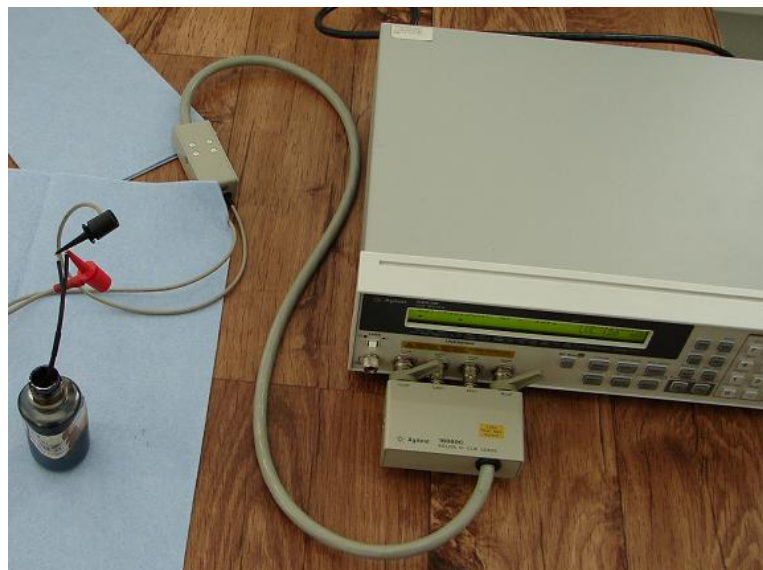
Pro měření byla zvolena měřicí konfigurace se sondou ponořenou do kapaliny. Pro určení výsledných indukčností byl využit měřicí můstek Agilent RLC 6243B dostupný na oddělení. Detaily měření lze vidět na obr. 4.4, 4.5 a 4.6, na můstku bylo měřeno se střídavým napětím o amplitudě 100 mV při frekvenci 100 kHz. Měřicí cívka byla zapojena na můstek přes ampérmetr, proud protékající cívku byl tak nízký, že jeho efektivní hodnotu nebylo možné změřit multimetrem s rozlišením proudu $I = 0,1 \mu\text{A}$.



Obr. 4.4.: Cívka použitá jako měřicí sonda



Obr. 4.5.: Ponoření sondy do nádoby s kapalinou



Obr. 4.6.: Použitá měřicí konfigurace pro rychlé průmyslové operativní měření permeability kapalin

Počáteční permeability několika typů magnetických kapalin (všechny vyrobené firmou Ferrotec) dostupných na našem oddělení byly změřeny, výsledné hodnoty lze vidět v Tabulce 4.1.

Tab. 4.1. Kolineární složka permeabilit několika vzorků ferokapalin v lineární části magnetizační křivky

Vzorek kapaliny	Relativní permeabilita μ_r [-]
EMG1111	1,14
EMG607	1,21
EFH1	1,79
EMG707	2,03

Lze vidět, že užitím navržené metody bylo možné změřit i velice nízké hodnoty permeability kapalin o hodnotách $\mu_r < 1,2$.

Vzhledem k tvaru rovnice (4.4) se případná chyba měření vyskytuje v čitateli i jmenovateli. Výsledná chyba měření je tedy dle teorie chyb dána jejich součtem, v našem případě tedy dvojnásobkem relativní chyby měřicího můstku Agilent RLC 6243B.

5 Přechodné jevy v elektromechanických systémech s magnetickou kapalinou

Předchozí kapitoly ukázaly možnost zvýšení elektromagnetických sil generovaných elektromechanickými systémy při vhodném využití feromagnetické kapaliny. Zvýšení těchto sil ještě samo o sobě ovšem neznamena, že má magnetická kapalina pozitivní vliv na celkovou výstupní charakteristiku systému. Práce elektromechanického systému je obecně dynamický děj, jehož podobu ovlivňuje řada fyzikálních jevů. Přestože přítomnost kapaliny pozitivně ovlivní velikost generovaných sil, případný pohyb součástí elektromechanického systému v tekutém prostředí znamená nárůst mechanických viskózních ztrát. Pro komplexní zhodnocení vlivu kapaliny na chod elektromechanického systému je tedy zapotřebí jeho dynamická analýza.

5.1 Způsoby řešení elektromechanických systémů

Sestavení matematického modelu elektromechanického obvodu lze provést dvěma metodami: metodou stavových proměnných a energetickou metodou stavového prostoru.

Metoda stavových proměnných vychází z Kirchhoffových zákonů a z Newtonova zákona. Někdy bývá nazývána metodou Brayton-Moserovou. Tato metoda pracuje se *stavovými proměnnými* (někdy se nazývají *zobecněné souřadnice*), jimiž jsou proudy a napětí na akumulacích prvcích L a C a polohou, rychlostí a zrychlením pohyblivých částí systému. Protože se stavové veličiny mění s časem spojitě, je celkem snadné stanovení počátečních podmínek. Kirchhoffovy zákony je třeba aplikovat na ty smyčky (loops) a řezy (cut-set), aby získané rovnice byly lineárně nezávislé (tj. aby nebyly redundantní) a aby jich byl dostatečný počet pro řešení systému. K volbě smyček a řezů slouží postup založený na topologických vlastnostech řešeného systému; byl vypracován v práci [45].

Energetická metoda stavového prostoru je založena na principech klasické mechaniky, zejména na Hamiltonově principu, podle něhož ze všech možných pohybů konzervativní mechanické soustavy se v libovolném časovém intervalu $\langle t_1, t_2 \rangle$ realizuje takový pohyb, pro který nabývá funkcionál

$$\tau = \int_{t_1}^{t_2} L dt . \quad (5.1)$$

Trajektorii, pro kterou extrém realizuje, nazýváme extrémálou funkcionálu τ . Veličina \mathcal{G} se nazývá Lagrangeovou funkcí (krátce lagrangián). Pro lineární izolovanou mechanickou soustavu lze lagrangián určit takto:

$$\mathcal{G} = W_k - W_p \quad (5.2)$$

kde W_k je pohybová energie a W_p je energie potenciální. Lagrangián je tedy funkcí poloh a rychlostí. Hamiltonův princip lze tedy matematicky vyjádřit vztahem

$$\delta \tau = 0, \quad (5.3)$$

kde $\delta \tau$ značí variaci funkcionálu τ . V učebnicích analytické mechaniky se dokazuje, že pro konzervativní soustavu je splněn Hamiltonův princip tehdy a jen tehdy, když křivka $q_i(t)$, kde q_i jsou zobecněné souřadnice, splňuje Euler- Lagrangeovy rovnice

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial q_i} \right) = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (5.4)$$

Tyto rovnice představují soustavu obyčejných diferenciálních rovnic.

Variační metody byly formulovány původně pro mechanické systémy, ale lze je rozšířit na jakékoliv jiné fyzikální systémy, tedy třeba na elektromechanické systémy (podrobněji viz [46]).

V elektrotechnice je obvyklejší první z uvedených metod a proto se ji v dalším přidržíme. Poznamenejme, že se mnozí autoři vracejí k energetické metodě nejen pro její jisté výhody (např. odpadají aplikace topologických pravidel při sestavování matematického modelu), ale také proto, že dává zajímavé informace o dynamickém chování energií v systému a umožňuje predikovat chování nelineárních systémů (např. vznik deterministického chaosu aj.). Podrobně je o tom pojednáno např. v práci [47].

5.2 Prvky elektromechanických systémů

Při dynamické analýze elektromechanických systémů se setkáváme s základními prvky, které včetně jejich parametrů a vztahů mezi stavovými veličinami shrnují následující tabulky.

Tab. 5.1. Základní elektrické lineární prvky elektromechanických systémů

Název prvku	Parametr prvku	Vztah mezi stavovými veličinami na lineárním prvku
odpor (rezistor)	odpor $R[\Omega]$	$u = Ri$
cívka	indukčnost $L[H]$	$u = L \frac{di}{dt}$ $i = \frac{1}{L_0} \int u(t) dt + i(0)$
kondenzátor	kapacita $C[F]$	$i = C \frac{du}{dt}$ $u = \frac{1}{C_0} \int i(t) dt + u(0)$

Tab. 5.2. Základní mechanické lineární prvky elektromechanických systémů

Název prvku	Parametr prvku	Vztah mezi silou a výchylkou na lineárním prvku
hmota	hmotnost $m [kg]$	$F_M = m \frac{d^2 x}{dt^2}$
tlumič	činitel tlumení $B_{mech} [Ns/m]$	$F_B = B_{mech} \frac{dx}{dt}$
pružina	elasticita pružiny $k [N/m]$	$F_k = kx$

Při chodu elektromechanických aktuátorů dochází k změně poloh pohyblivých součástí. Tímto pohybem se může měnit indukčnost použitých cívek. Takovéto cívky s pohyblivým jádrem jsou poté popsány nelineární indukčností závislou na poloze $L = L(x, i)$:

Tab. 5.3. Proměnná nelineární vlastní indukčnost

Název prvku	Parametr prvku	Vztah mezi stavovými veličinami na prvku
cívka s pohyblivým jádrem	proměnná vlastní indukčnost $L=L(x,i)$	$u = \frac{d}{dt}(Li) = i \frac{dL}{dt} + L \frac{di}{dt}$

Tyto cívky jsou důvodem toho, že lineární systém vede na soustavu nelineárních rovnic.

5.3 Dynamická analýza aktuátoru s magnetickou kapalinou

Statická analýza silových poměrů ve vybraných elektromechanických systémech ukázala, že využití magnetické kapaliny může mít pozitivní vliv na velikost generovaných sil. Dalším krokem je diskuse vlivu magnetické kapaliny na dynamickou charakteristiku aktuátoru. Numericky provedeme dynamickou analýzu matematického modelu elektromechanického systému pro spínací procesy uvedeného v kapitole 3.3. znázorněného na obrázcích 3.2 a 3.3.

5.3.1 Formulace rovnic aktuátoru s ferokapalinou metodou stavových proměnných

Řešený posuvný aktuátor umožňuje pohyb jádra pouze ve směru jedné osy. Funkce polohy jádra v čase $x(t)$ při vzduchové mezeře a při mezeře vyplněné feromagnetickou kapalinou a jejich následné porovnání jsou cílem naší analýzy. Použijeme metodu stavových proměnných, stavovými proměnnými jsou tedy proud i ve vinutí aktuátoru, posuv x , rychlost $v = \frac{dx}{dt}$ a zrychlení $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$. Odezvy těchto proměnných na působení aktivních prvků se nazývají dynamickými charakteristikami elektromechanického systému [54].

S použitím Kirchhoffových zákonů a Newtonova pohybového zákona je chování elektromechanického systému popsáno soustavou rovnic pro výše uvedené stavové proměnné. Tato soustava se nazývá stavovou rovnicí. Maticově ji lze zapsat:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{X} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) \text{ s počáteční podmínkou } \mathbf{X}_0 = \mathbf{X}(0), \quad (5.5)$$

kde \mathbf{X} je vektor stavových proměnných. Řešením stavové rovnice je vektor $\mathbf{X}=\mathbf{X}(t)$ vyjadřující přechodový jev elektromechanického systému. Prvky tohoto vektoru jsou odezvy jednotlivých stavových proměnných na působení prvků a nazývají se dynamickými charakteristikami [45]. Pro sestavení rovnic popisujících dynamiku systému je třeba stanovit funkce popisující v čase jednotlivé jevy odehrávající se při chodu aktuátoru. Na pohyblivou část tohoto systému aktuátor působí následující síly:

Magnetická síla

Statickou charakteristiku působící magnetické síly v závislosti na poloze pohyblivé části jsme určili v kapitole 3. Tato charakteristika byla počítána pro buzení cívek konstantním proudem. Tento předpoklad je fyzikálně realizovatelný pro tvrdý zdroj proudu, při připojení napěťového zdroje je potřeba řešit proudovou rovnici:

$$Ri(t) + L(x)\frac{di(t)}{dt} = u_0(t) . \quad (5.6)$$

Indukčnost budicí cívky $L(x)$ je závislá na aktuální poloze pohyblivé části. Elektrický odpor vinutí R je obecně funkcí teploty, s rostoucí teplotou rovněž roste. Při výpočtu budeme pro zjednodušení uvažovat izotermický systém (ten lze přibližně realizovat externí regulací teploty, např. čidlem teploty svázaným s ventilátorem), tedy

$$R(T) = \text{konst.} = R. \quad (5.7)$$

Řešením rovnice (5.6) je proud v budicím vinutí $i(t)$. Proudová hustota v budím vinutí může být také závislá na čase:

$$J_{\text{ext}}(t) = \frac{i(t)}{S} , \quad (5.8)$$

jelikož výsledná působící magnetická síla je spočítaná numerickým řešením rovnic 3.6 až 3.10 a na pravé straně rovnice 3.6 je proudová hustota v budicím vinutí J_{ext} , magnetická síla působící na kotvu aktuátoru je tedy funkcí proudu a polohy

$$\mathbf{F}_{\text{mag}} = \mathbf{F}_{\text{mag}}(i, x). \quad (5.9)$$

Pro další výpočet je tedy nutné určit funkce $L(x)$ a $\mathbf{F}_{\text{mag}}(i, x)$ pro aktuátor se vzduchovou mezerou a s mezerou vyplněnou ferokapalinou.

Určení funkce $L(x)$

Je možné dohledat řadu možností určení indukčnosti (viz např. [3]). Funkci $L(x)$ lze tedy pro konkrétní zařízení určit při jeho libovolné poloze jako:

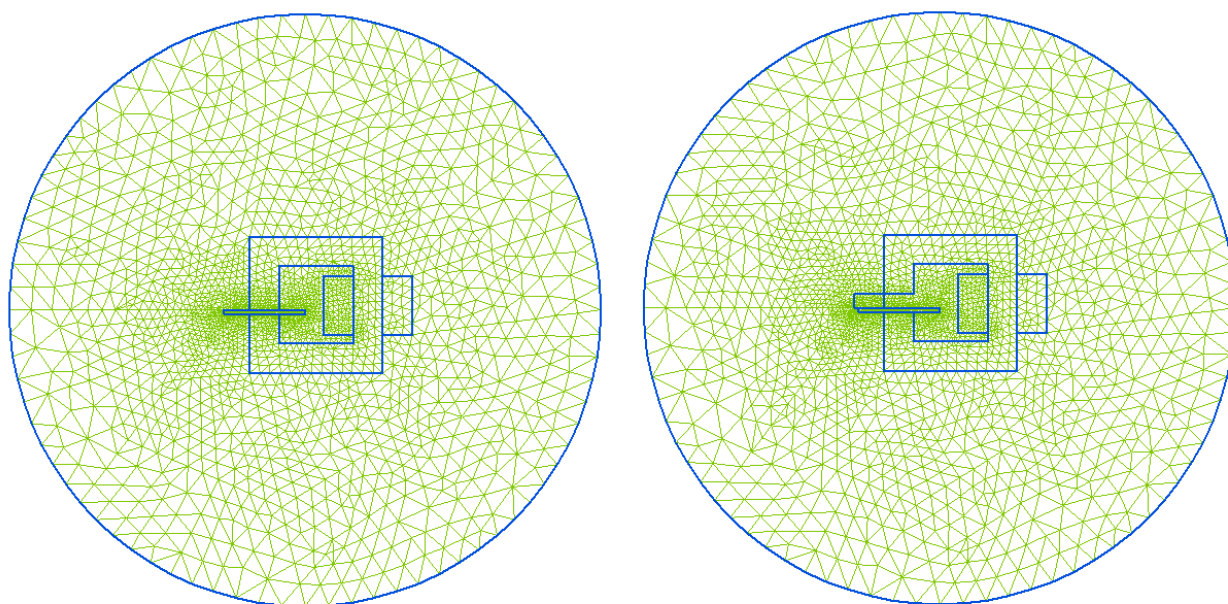
$$L(x) = \frac{\Phi(x)}{I(x)}, \quad (5.10)$$

či s využitím energetické definice indukčnosti jako:

$$L(x) = \frac{2W_m(x)}{I(x)^2}, \quad (5.11)$$

kde x udává obecnou polohu pohyblivé části. Pokud budeme uvažovat stejnosměrné buzení aktuátoru a lineární problém (lineární materiálové parametry, tedy $\mu = \text{konst.}$ u magnetické kapaliny a materiálů použitých na magnetický obvod), lze vzhledem k tomu, že indukčnost je pasivní veličina, výpočet provést při libovolném buzení, výsledná indukčnost bude stejná při libovolné hodnotě budicího proudu I . Výpočet byl proveden pomocí MKP v programu Quickfield pro několik poloh pohyblivé části. Pro srovnání byla indukčnost počítána jak z energie magnetického pole, tak z celkového magnetického toku.

Model a použitá síť pro aktuátor s mezerou vyplněnou magnetickou kapalinou o relativní permeabilitě $\mu_r = 2$ jsou vidět na Obr.5.1., výsledky v tabulce 5.4.



Obr.5.1.: Řešený model včetně diskretizační sítě pro diskrétní určení funkce $L(x)$, extrémní polohy (zcela zasunutá a zcela vysunutá pohyblivá část)

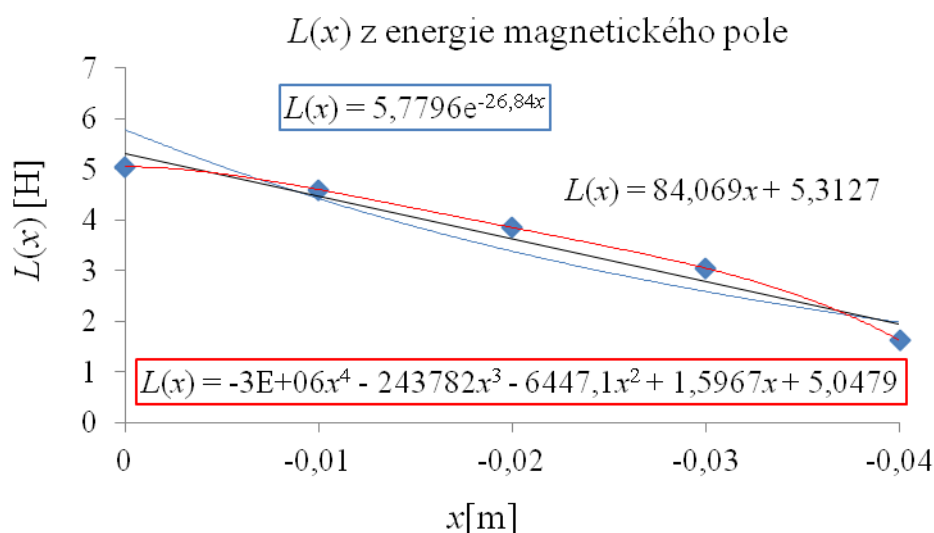
Tab.5.4.: Diskrétní hodnoty $L(x)$ pro aktuátor s mezerou vyplněnou ferokapalinou o relativní permeabilitě $\mu_r = 2$ pro několik poloh pohyblivé části

přes energii magnetického pole			přes magnetický tok		
x [m]	L [H]	L/L_0 [-]	x [m]	L [H]	L/L_0 [-]
0	5,04	1	0	5,14	1
-0,01	4,59	0,91	-0,01	4,69	0,913
-0,02	3,84	0,76	-0,02	3,95	0,76
-0,03	3,04	0,60	-0,03	3,13	0,61
-0,04	1,62	0,32	-0,04	1,69	0,32

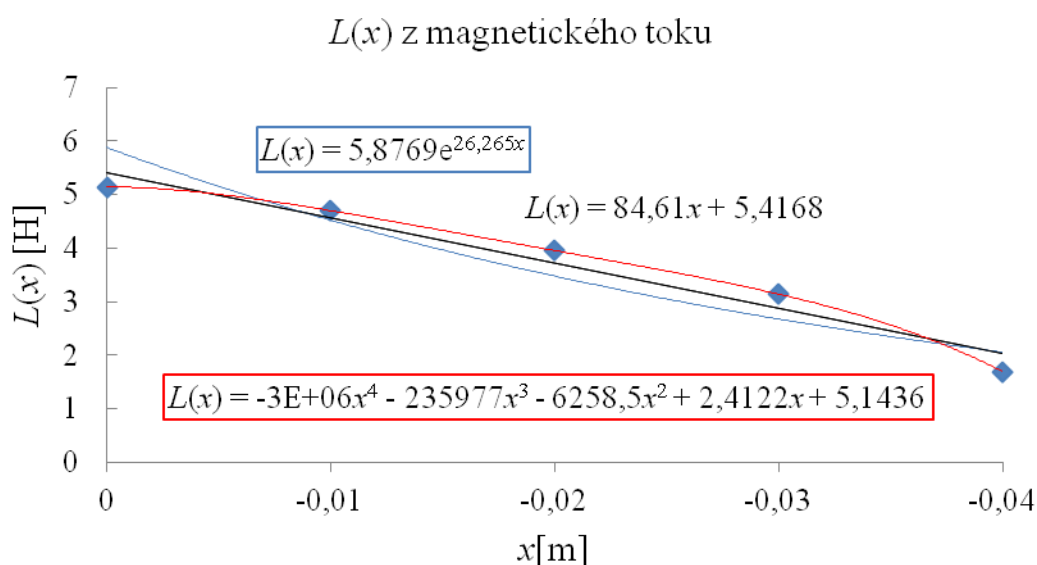
Tab.5.5.: Diskrétní hodnoty $L(x)$ pro aktuátor se vzduchovou mezerou pro několik poloh pohyblivé části

přes energii magnetického pole			přes magnetický tok		
x [m]	L [H]	L/L_0 [-]	x [m]	L [H]	L/L_0 [-]
0	3,20	1	0	3,26	1
-0,01	3,00	0,93	-0,01	3,05	0,93
-0,02	2,65	0,82	-0,02	2,71	0,88
-0,03	2,26	0,70	-0,03	2,32	0,71
-0,04	1,49	0,46	-0,04	1,54	0,47

Získaná data byla proložena funkcí. Byla Předpokládána exponenciální závislost klesající se vzdáleností pohyblivé části od rovnovážné polohy, ale vhodnou funkcí se ukázal polynom 5. stupně. Výsledky lze vidět na Obr 5.2 a Obr 5.3.



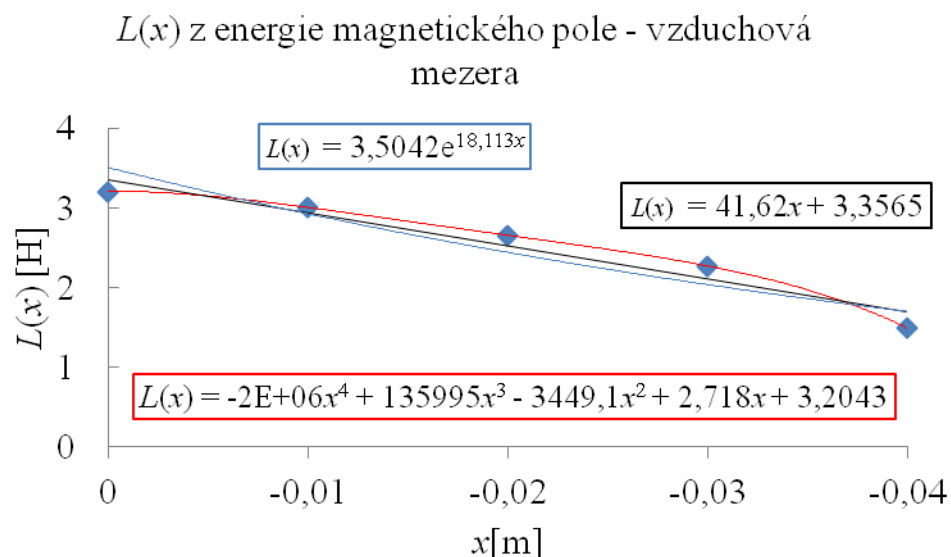
Obr.5.2.: Proložení diskrétní závislosti $L(x)$ určenou numerickou simulací z výpočtu dle energie magnetického pole pro aktuátor s mezerou vyplněnou ferokapalinou o relativní permeabilitě $\mu_r = 2$; příklad proložení dat různými druhy funkcí



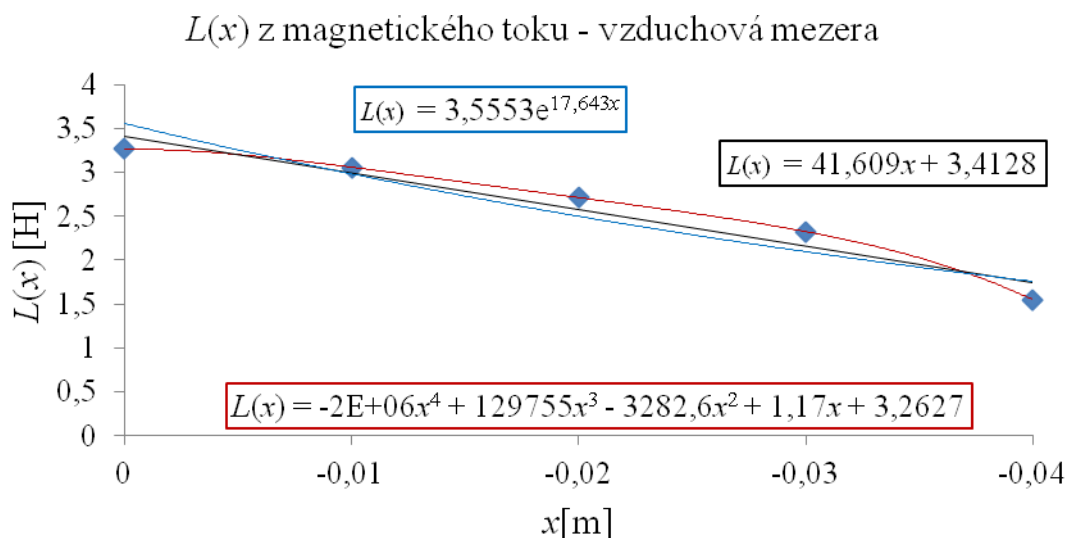
Obr.5.3.: Proložení diskrétní závislosti $L(x)$ určenou numerickou simulací z výpočtu dle magnetického toku pro aktuátor s mezerou vyplněnou ferokapalinou o relativní permeabilitě $\mu_r = 2$; příklad proložení dat různými druhy funkcí

Na obrázcích lze vidět velice dobrou shodu výpočtů přes energii i přes magnetický tok.

Stejným postupem byla určena funkce $L(x)$ pro pohyb aktuátoru se vzduchovou mezerou mezi pevnou a pohyblivou částí, výsledky viz následující obrázky.



Obr.5.4.: Proložení diskrétní závislosti $L(x)$ určenou numerickou simulací z výpočtu dle energie magnetického pole pro aktuátor se vzduchovou mezerou



Obr.5.5.: Proložení diskrétní závislosti $L(x)$ určenou numerickou simulací z výpočtu dle magnetického toku pro aktuátor se vzduchovou mezerou

Získané funkce $L(x)$ potvrzují zkvalitnění magnetického obvodu s využitím ferokapaliny.

Úpravou rovnice pro napětí na nelineární indukčnosti uvedené v Tab. 5.3. získáme

$$u_L = \frac{d}{dt}(Li) = \frac{dL}{dt}i + L\frac{di}{dt} = \frac{dL}{di}\frac{di}{dt}i + L\frac{di}{dt}. \quad (5.12)$$

Jelikož byla uvažována cívka z lineárního materiálu $\mu = \text{konst.}$, je její indukčnost nezávislá na budícím proudu a tedy

$$\frac{dL}{di} = 0 \rightarrow \frac{dL}{di}\frac{di}{dt}i = 0 \quad (5.13)$$

a po dosazení

$$u_L = L(x)\frac{di}{dt}. \quad (5.14)$$

Určení funkce $F_{\text{mag}}(i, x)$

Výpočet statické charakteristiky byl proveden v kapitole 3.3. Výpočet byl proveden MKP, s pomocí programu Agros2D. Uvažujeme-li magneticky lineární systém (ve smyslu lineární magnetické materiálové parametry, tj. ve všech oblastech modelu $\mu_r = \text{konst.}$, víme, že funkce $L=L(x,i)$ je nelineární, ale tato nelinearita se nám promítne až při celkovém řešení soustavy při dynamické analýze), lze dokázat, že statická charakteristika při buzení jiným proudem bude pouze násobkem dané charakteristiky dle vztahu:

$$F_{\text{mag}}(i, x) = F_J(x) = F_{J=1}(x) \cdot J^2 \quad (5.15)$$

Předpoklad lineárního modelu je fyzikálně snadno realizovatelný v případě, pokud se pohybujeme po lineární části B/H charakteristik všech použitých materiálů, tj. žádná součást není magneticky přesycena.

Gravitační síla

Dle gravitačního zákona působí na každý hmotný bod gravitační síla

$$F_g = mg . \quad (5.16)$$

Tato síla ovlivňuje mechanické tření.

Vliv vířivých proudů

Pohyb vodivého tělesa v magnetickém poli do tohoto tělesa indukuje vířivé proudy v závislosti na rychlosti pohybu. Tyto proudy generují magnetické pole, jehož silové účinky působí proti směru pohybu. Tohoto jevu se využívá např. pro konstrukci tzv. tlumičů vířivými proudy (viz např. [48,49]). Analýza sil generovaných vířivými proudy ovšem není tématem této práce, proto bude jejich vliv zanedbán. Toto zjednodušení vede k pouze malé nepřesnosti, je-li pohyblivá část vyrobena z kvalitního elektrotechnického materiálu (listěné plechy).

Suché tření (smykové) - ližiny

Pokud pohyb pohyblivé části aktuátoru zajišťují ližiny, dochází v nich k mechanickému tření. Třecí síla je orientovaná proti pohybu tělesa, vyjadřuje velikost a směr tření mezi tělesy. tato síla závisí na drsnosti povrchu respektované koeficientem smykového tření f_T a kolmé síle působící mezi tělesy. Na pohyblivou část řešeného aktuátoru působí v kolmém směru gravitační síla F_g a složka magnetické síly F_{magy} .

$$F_T = f_T F_y = f_T (F_g + F_{magy}) \quad (5.17)$$

Koeficient smykového tření f_T je obecně funkcí rychlosti a doby působení síly. Jeho statická hodnota je vyšší než dynamická, pro odtrhnutí tělesa je zapotřebí větší síla, než na pohyb již pohybujícího se tělesa.

Valivé tření - lineární ložiska

V případě nahrazení ližin lineárním mechanickým vedením obsahujícím ložiska dochází k snížení třecích ztrát. Třecí sílu valivého tření lze vyjádřit

$$F_v = \frac{k_v}{r} F_y = \frac{k_v}{r} (F_g + F_{\text{magy}}) \quad (5.18)$$

kde r je poloměr kuličky ložiska, k_v je koeficient valivého tření a F_y je síla působící kolmo na křivku pohybu. Ta je v našem případě dána gravitační silou F_g a magnetickou silou působící kolmo na směr pohybu F_{magy} . V našem případě tyto síly působí souhlasně, obecně je třeba při určování výsledné síly F_y dbát na jejich směr. Třecí síla valivého tření je vždy nižší, než třecí síla suchého smykového tření. Koeficient valivého tření je obecně opět funkcí rychlosti a doby působení síly.

Mokrý (vazký) tření - pohyb tělesa v kapalině

Při pohybu tělesa v kapalině (v našem případě při klouzání pohyblivé části po vrstvě ferokapaliny) dochází k tření vrstev kapaliny. Statické tření je v případě mokrého tření nulové, dynamické lze vyjádřit pomocí Stokesova vztahu jako:

$$F_{\text{mt}} = 6\pi\eta r v = 6\pi\eta r \frac{dx}{dt} \quad (5.19)$$

kde η je dynamická viskozita kapaliny a r je charakteristický rozměr tělesa (obecně poloměr kuličky, vzdálenost třecích ploch, apod.). Na základě rovnice (5.19) lze mokré tření lze modelovat základní parametrem tlumič (dle Tab. 5.2).

5.3.2 Matematický model aktuátoru

Uvažujeme-li pohyblivou část z plechů, zanedbáme vliv vířivých proudů, na základě předchozích kapitol bude aktuátor popsán soustavou mechanické a elektrické rovnice:

$$\begin{aligned}
 Ri(t) + i(t) \frac{dL(x)}{dt} + L(x) \frac{di(t)}{dt} &= u_0(t) \\
 M \frac{d^2x}{dt^2} + f(F_{mag y}(i, x) + F_g) &= F_{mag x}(i, x)
 \end{aligned}
 \tag{5.20}$$

a člen f respektuje mechanické ztráty v pružinách a je dán smykovým třením, valivým třením v ložiskách.

$$f = f_t + \frac{k_v}{r} \tag{5.21}$$

Zároveň předpokládáme, že pohyb pohyblivé části zajišťují lineární ložiska, neuvažujeme tedy vliv smykového tření a člen $f_T = 0$. Pak získáváme soustavu:

$$\begin{aligned}
 Ri(t) + L(x) \frac{di(t)}{dt} &= u_0(t) \\
 m \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k_v}{r} (F_{mag y}(i, x) + F_g) + 6\pi\eta r \frac{dx}{dt} &= F_{mag x}(i, x)
 \end{aligned}
 \tag{5.22}$$

po úpravě systém diferenciálních rovnic 1. řádu

$$\begin{aligned}
 Ri(t) + L(x) \frac{di(t)}{dt} &= u_0(t) \\
 m \frac{dv}{dt} + \frac{k_v}{r} (F_{mag y}(i, x) + F_g) + 6\pi\eta r v &= F_{mag x}(i, x) \\
 v &= \frac{dx}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{5.23}$$

V aktuátoru se vzduchovou mezerou nevzniká mokré tření, soustava rovnic pro takový aktuátor má tvar

$$\begin{aligned}
 Ri(t) + L(x) \frac{di(t)}{dt} &= u_0(t), \\
 m \frac{dv}{dt} + \frac{k_v}{r} (F_{mag y}(i, x) + F_g) &= F_{mag x}(i, x), \\
 v &= \frac{dx}{dt}.
 \end{aligned}
 \tag{5.24}$$

Po úpravě soustav rovnic (5.23 a 5.24) získáme soustavy obyčejných diferenciálních rovnic pro stavové proměnné ve tvaru vhodném pro řešení některým z dostupných numerických řešičů. Pro aktuátor s kapalinou soustavu:

$$\begin{aligned}\frac{di(t)}{dt} &= \frac{u_0(t) - Ri(t)}{L(x)}, \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{F_{\text{mag}x}(i, x) - \frac{k_v}{r}(F_{\text{mag}y}(i, x) + F_g) - 6\pi\eta rv}{m}, \\ \frac{dx}{dt} &= v.\end{aligned}\tag{5.25}$$

Pro aktuátor se vzduchovou mezerou soustavu:

$$\begin{aligned}\frac{di(t)}{dt} &= \frac{u_0(t) - Ri(t)}{L(x)}, \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{F_{\text{mag}x}(i, x) - \frac{k_v}{r}(F_{\text{mag}y}(i, x) + F_g)}{m}, \\ \frac{dx}{dt} &= v.\end{aligned}\tag{5.26}$$

Srovnáním řešení rovnic (5.25 a 5.26), tedy dynamických charakteristik aktuátoru se vzduchovou mezerou a s mezerou vyplněnou magnetickou kapalinou zhodnotíme pozitivní či negativní vliv kapaliny.

Poznámka

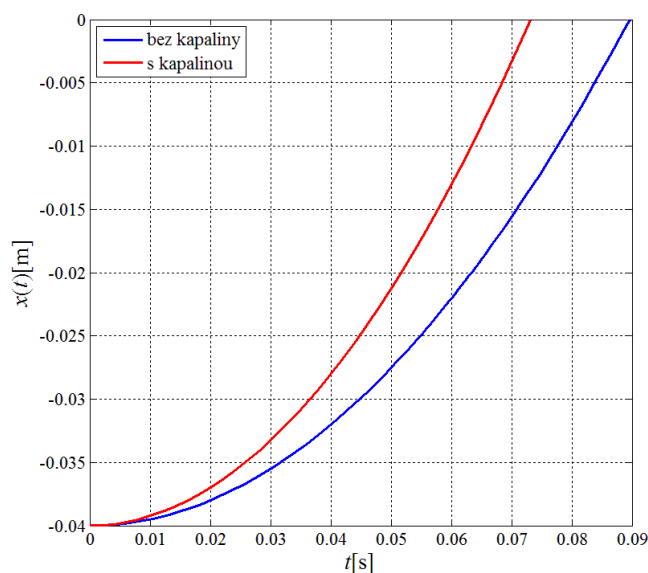
Rovnice a jejich řešení platí pouze na takových intervalech x , pro které platí proložení spočítaných charakteristik $L(x)$ a F_{mag} zvolenými funkcemi. tyto funkce je tedy nutné stanovit pro takové intervaly, ve kterých očekáváme funkci zařízení.

5.3.3 Příklad - řešení soustavy rovnic popisující dynamické charakteristiky aktuátoru

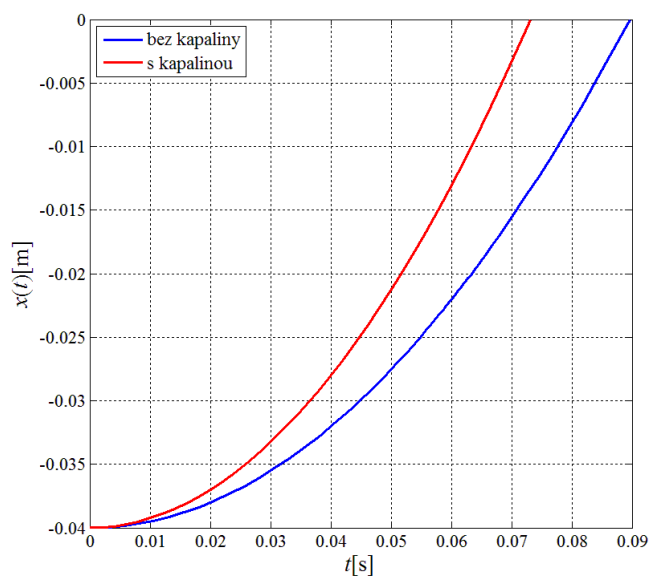
Pro řešení budeme uvažovat aktuátor dle obr. 3.2. s následujícími parametry:

hmotnost pohyblivé části $m = 1$ kg, stejnosměrné buzení $U = 10$ V, odpor vinutí a pří-
vodních kabelů $R = 1$ Ω , aktuátor je opatřen lineárním ložiskem, koeficient tření v line-
árních ložiscích $\frac{k_v}{r} = 0,002$. Aktuátor je vyroben ze stříhaného elektrotechnického ma-

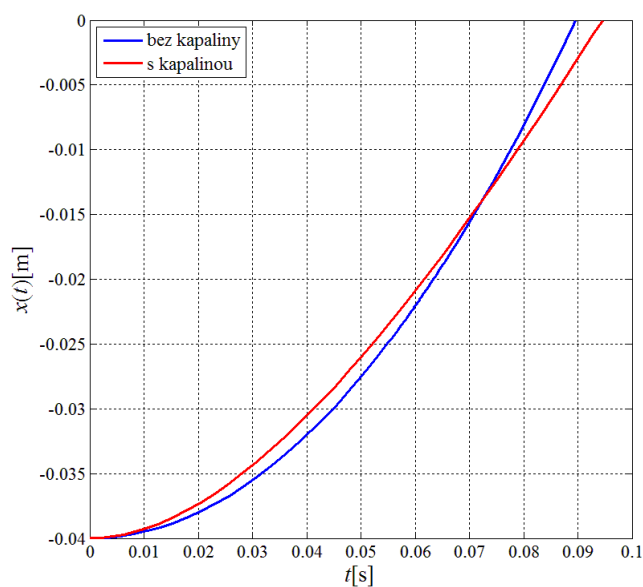
teriálu, nepředpokládáme vznik vířivých proudů. Statickou charakteristiku $F_x(I, x)$ a $F_y(I, x)$ jsme odvodili v předchozích kapitolách, závislost indukčnosti na poloze jádra $L(x)$ také. Maximální výchylka pohyblivé části $x = 4$ cm, budeme tedy uvažovat počá-
teční podmínku pro polohu jádra $x(0) = -0.04$ m. Mezera aktuátoru bude vyplněna fero-
kapalinou s relativní permeabilitou $\mu_r = 5$ a dynamickou viskozitou při charakteristic-
kém rozměru tělesa $r = 1$ a) $\eta = 0$ (ideální neviskózní kapalina); b) $\eta = 6$ mPa·s c) $\eta =$
60 mPa·s. Soustava rovnic byla řešena s pomocí funkce ode45 v programu Matlab
r2010a. Výslednou dynamickou funkci polohy pohyblivé části v čase $x(t)$ vidíme na
následujících grafech.



Obr.5.6.: Příklad výsledku simulace dynamické charakteristiky elektromechanického aktuátoru; soustava stavových rovnic řešena funkcí ode45 v programu Matlab r2010a; uvažována neviskózní kapalina $\eta = 0$



Obr.5.7.: Příklad výsledku simulace dynamické charakteristiky elektromechanického aktuátoru; soustava stavových rovnic řešena funkcí ode45 v programu Matlab r2010a; uvažována kapalina $\eta = 6\text{mPa}\cdot\text{s}$



Obr.5.8.: Příklad výsledku simulace dynamické charakteristiky elektromechanického aktuátoru; soustava stavových rovnic řešena funkcí ode45 v programu Matlab r2010a; uvažována kapalina $\eta = 1\text{Pa}\cdot\text{s}$

Výsledky simulace potvrzují předpoklad, že celková výhodnost použití kapaliny bude dána jejími materiálovými vlastnostmi - relativní permeabilitou a viskozitou. Velikost permeability má na chod zařízení pozitivní vliv, zatímco velikost viskozity má vliv negativní. Dynamická viskozita udává velikost mokrého tření, které (dle rov. 5.19) závisí na rychlosti. Při zvýšení permeability použité kapaliny dojde ke zvýšení sil a zvýšení rychlostí při dynamickém ději v ideální neviskózní kapalině. Ve viskózní kapalině to ovšem znamená zvýšení viskózních ztrát. Stanovení obecného kritéria výhodnosti využití kapaliny je tedy očividně optimalizační úloha a je dalším možným tématem budoucích prací.

Zároveň z výsledků simulací vyplynulo, při manipulaci s jednotlivými pasivními veličinami (odpor vinutí, magnetická permeabilita, dynamická viskozita, koeficient tření) nejvíce ovlivní tvar řešení odpor vinutí. Při snížení odporu vinutí jím obecně tečou vyšší proudy, které vyvolají zvýšení magnetických sil, které vedou k vyšší rychlosti tělesa a zvýšení mokřých ztrát.

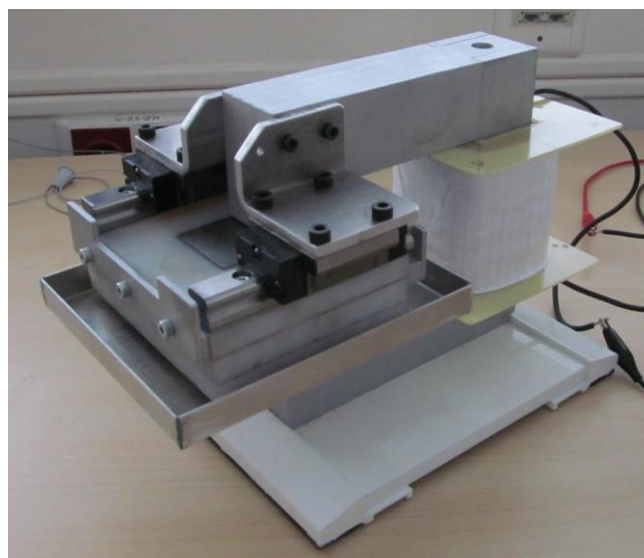
Simulace dynamického děje potvrdila možnost zlepšení chodu analyzovaného aktuátoru. Vzhledem k odhadu některých veličin je vhodné provést experiment.

6 Experimentální vyšetření vlivu magnetické kapaliny na průběh charakteristik elektromechanického aktuátoru

V předchozí části byla numericky ukázána možnost zvýšení generovaných sil při vyplnění vzduchové mezery elektromechanických systémů magnetickou kapalinou. V závislosti na materiálových vlastnostech použité kapaliny může mít její využití pozitivní vliv na výslednou dynamickou charakteristiku zařízení. Doposud jsme se touto možností zabývali teoreticky, byly uvažovány a simulovány elektromechanické aktuátory s převážně odhadovanými materiálovými vlastnostmi. Dalším logickým krokem v této problematice je konstrukce reálného elektromechanického aktuátoru a proměření jeho výstupních charakteristik při vyplnění mezery mezi pevnou a pohyblivou částí reálnou magnetickou kapalinou.

6.1 Konstrukce modelu experimentálního elektromechanického aktuátoru

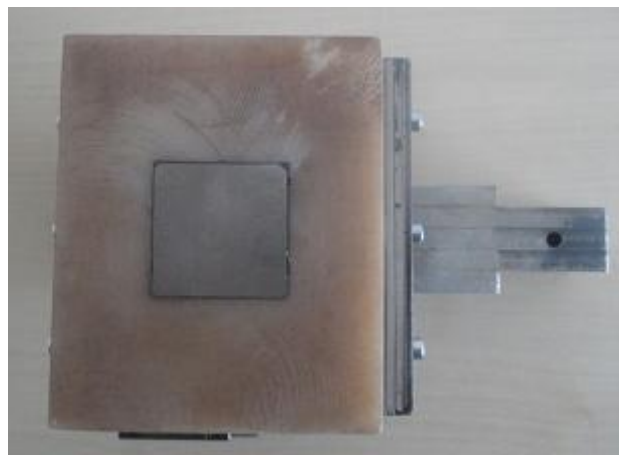
Pro experimentální vyšetření byl navržen a zkonstruován lineární elektromechanický aktuátor.



Obr. 6.1.: Experimentální lineární elektromechanický aktuátor

Zařízení bylo navrženo s účelem vyšetřit jeho výstupní charakteristiky s a bez vzduchové mezery vyplněné ferokapalinou a jejich následném porovnání. Proto byl aktuátor navržen tak, aby fyzikální jevy v něm probíhající byly co nejjednodušší a bylo možné jasně zhodnotit vliv kapaliny. Důraz byl kladen na tyto požadavky:

- **Lineární pohyb.** Pevná a pohyblivá část jsou spojeny přes lineární vedení tak, aby byl umožněn pohyb pouze v jednom směru. Z hlediska stavové veličiny poloha $x(t)$ se tedy bude jednat o jednodimenzionální problém, pohyb umožňuje pouze síla $F(x)$ ve směru pohybu x . Lze kontrolovat splnění podmínky největší změny permeability ve směru pohybu. Navíc výrobci lineárních ložisek obvykle uvádějí součinitel smykového tření, jehož znalost usnadní simulaci dynamického děje.
- **Gradient permeability ve směru pohybu.** Pohyblivá část magnetického obvodu je zalita v bloku z nemagnetického materiálu - tím mechanicky zabrání magnetické kapalině vytvořit spojení pólů magnetického obvodu a zkratovat magnetický obvod, tedy zajistí splnění podmínky zesílení statických charakteristik.



Obr. 6.2.: Pohyblivá část aktuátoru je zalita v bloku nemagnetického materiálu

- **Stejnoseměrné buzení.** Zařízení je buzeno stejnosměrným proudem - v ustáleném stavu se neuplatní skinefekt a vířivé proudy generované vinutím. Z důvodu eliminace vířivých proudů vzniklých přechodným jevem při zapnutí napájení a elektromagnetickou indukci při pohybu vodivé části v magnetickém poli by by-

lo vhodné magnetický obvod zařízení vyrobit ze stříhaných plechů. To se bohužel nepodařilo, magnetický obvod je vyroben z masivu a při přechodném jevu bude docházet ke generování vířivých proudů.

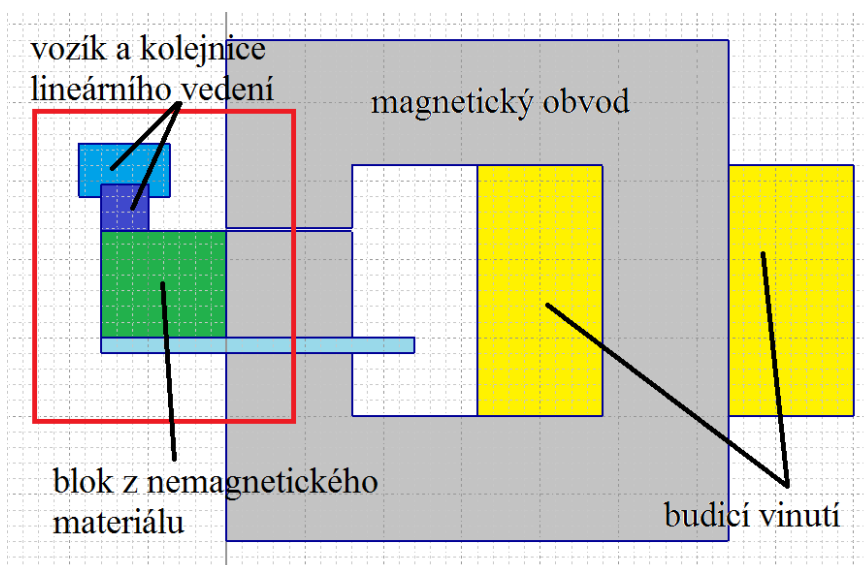
- **Minimalizace rozptylových toků.** Veškeré součásti s výjimkou magnetického obvodu a pohyblivé části jsou vyrobeny z nemagnetického materiálu - hliník, plast, měď, čímž se sníží rozptylové magnetické toky.

Lineární pohyb byl realizován lineárním vedením LLTHC od firmy SKF. Vzhledem k tomu, že kolejnice, vozík i ložiska jsou z feromagnetického kovu, byla provedena sada simulací rozložení magnetického pole v řezu zařízení v závislosti na vzdálenosti vedení od lineárního obvodu. Na základě výsledků těchto simulací byla určena dostatečná vzdálenost ložisek od pevné a pohyblivé části magnetického obvodu tak, aby ložiska nepůsobila na zařízení rušivě z hlediska rozptylových magnetických toků. Míra rozptylových toků byla určena poměrem energie magnetického pole akumulované v oblasti ložiska a celkové energie magnetického pole akumulované v řešené oblasti, výsledky lze vidět v následující tabulce.

Tab. 6.1.: *Vliv vzdálenosti feromagnetického lineárního vedení na rozptylové toky*

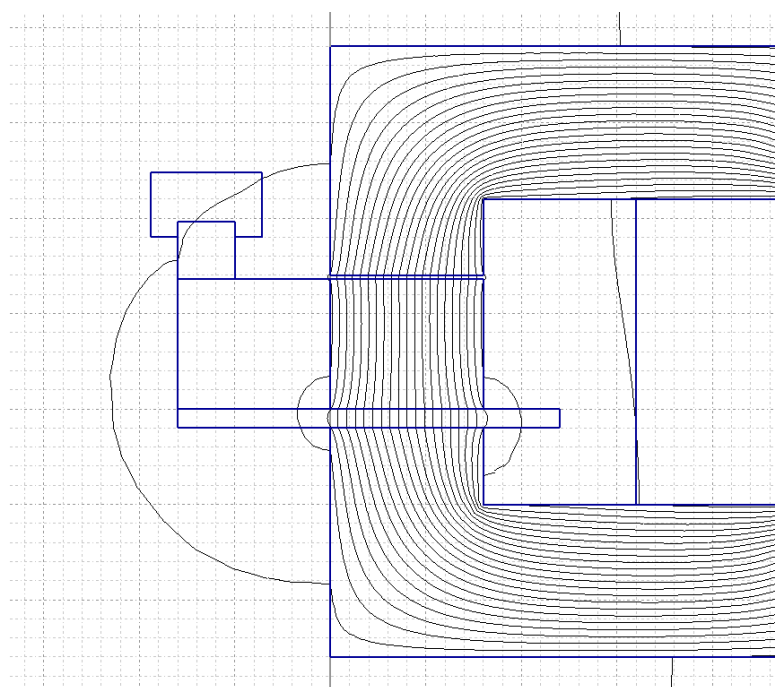
vzdálenost ložisek od magnetického obvodu[mm]	poměr energií [%]
2,5	4,45E-04
2	5,69E-04
1,5	7,85E-04
1	1,34E-03

Výsledky numerické simulace jsou přibližné - rozložení magnetického pole v lineárním vedení bylo řešeno jako dvourozměrný problém (geometrie viz Obr.6.3). Rozložení magnetického pole v řezu aktuátorem v okolí lineárního vedení a v oblasti zájmu zvýrazněné na obrázku je při zachování parametrů zbytku magnetického obvodu s drobnou odchylkou stejné.



Obr.6.3 Geometrie 2D modelu vytvořeného v Agros2D použitého k zhodnocení vzdálenosti vlivu lineárního vedení na rozptylové toky, oblast zájmu zdůrazněna červeně (hranice nulové Dirichletovy podmínky není zobrazena)

Ze simulací vyplynulo, že feromagnetická ložiska mají jen nepatrný vliv na rozptylové magnetické toky a tento vliv přirozeně se vzdáleností ložisek od magnetického obvodu klesá. Byla zvolena 2,5 cm.



Obr. 6.4.: Příklad jedné ze simulací magnetického pole v řezu zařízení(Agros2D) - zhodnocení vlivu vzdálenosti lineárního vedení na generované rozptylové toky

6.2 Experimentální ověření statické charakteristiky

Pevná a pohyblivá část elektromechanického aktuátoru byly opatřeny stupnicemi pro snadné měření aktuální polohy jádra. Měření statické silové charakteristiky, tedy velikosti síly ve směru pohybu v závislosti na poloze a proudu budicím vinutím bylo provedeno pomocí siloměru Omega. Pohyblivá část byla vždy zaaretována siloměrem v konstantní poloze, poté byla měřena závislost síly ve směru pohybu na velikosti budicího proudu $F_x(I)$. Měření bylo provedeno pro aktuátor se vzduchovou mezerou a s mezerou vyplněnou ferokapalinou EFH-1. Měřicí sestavu lze vidět na obr. 6.5. a 6.6.

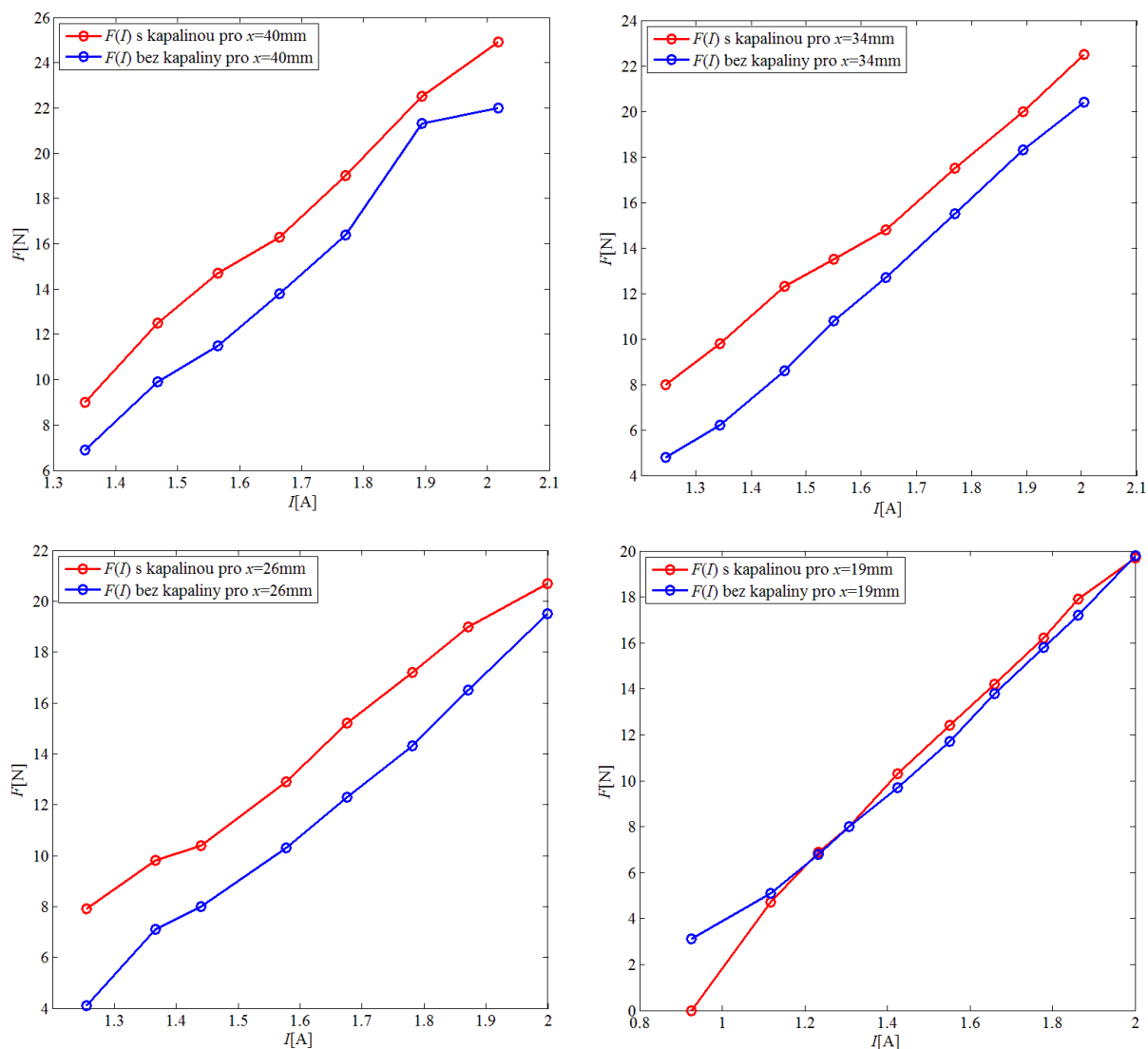


Obr. 6.5.: Sestava pro měření statické silové charakteristiky aktuátoru se vzduchovou mezerou



Obr. 6.6.: Příklad měření jednoho bodu statické silové charakteristiky aktuátoru s mezerou vyplněnou ferokapalinou

Statické síly byly změřeny pro několik poloh pohyblivé části pro různé hodnoty budicího proudu. Výsledné křivky lze vidět na obr. 6.7.

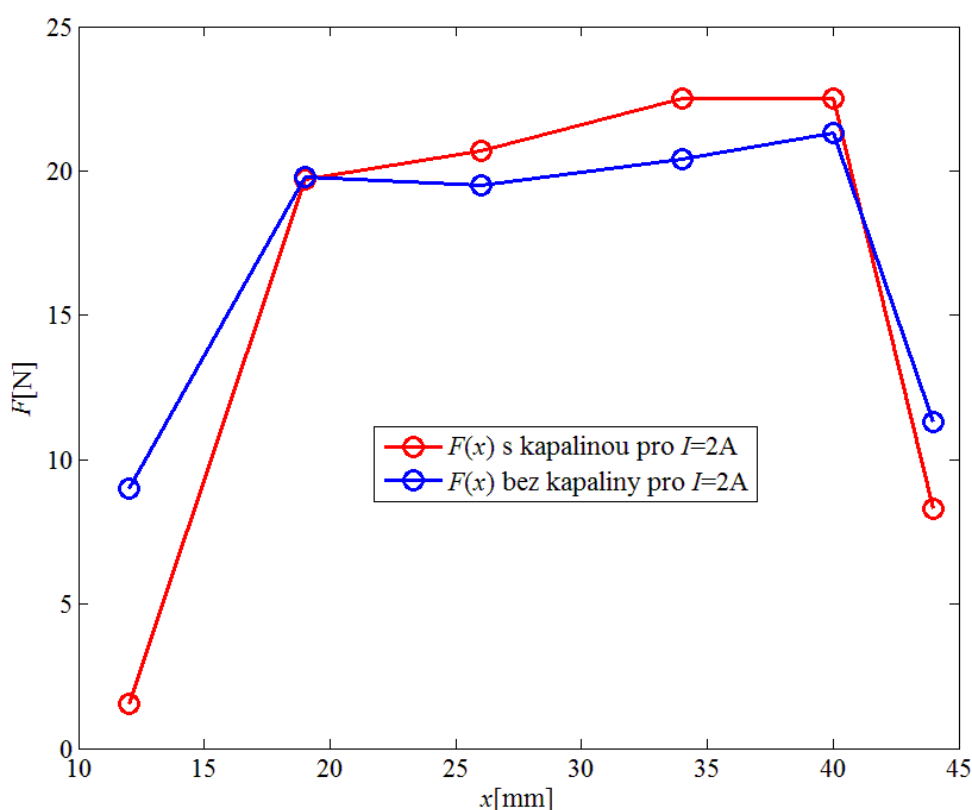


Obr. 6.7.: Změřené statické charakteristiky pro různé polohy pohyblivé části, měřeno vzdáleností od rovnovážné polohy ($x=0$)

Při měření se ukázal další praktický nedostatek vyrobeného modelu. Při polohách jádra blízkých rovnovážné poloze došlo díky dlouhodobému působení stacionárního magnetického pole k nahromadění magnetické kapaliny tak, že kapalina podepřela pohyblivou část a statickou charakteristiku v těchto bodech nebylo možné změřit. Nejbližší změřitelná poloha byla $x = 19$ mm od rovnovážné polohy.

Vzhledem k velikosti generovaného magnetického pole se pohybujeme v lineární části magnetizační křivky kapaliny i materiálu použitého na magnetický obvod, závislosti $F(I)$ by tedy měly být lineární. Změřené křivky tedy s odchylkou danou chybou měření splňují tento teoretický předpoklad.

Numerickou simulací byl stanoven předpoklad zvýšení generovaných sil při vyplnění mezery elektromechanického systému magnetickou kapalinou. Tento předpoklad byl v některých polohách naplněn, v některých ne. Pro názornost na následujícím obrázku uvádím změřenou statickou charakteristiku $F(x)$ pro $I = \text{konst.}$



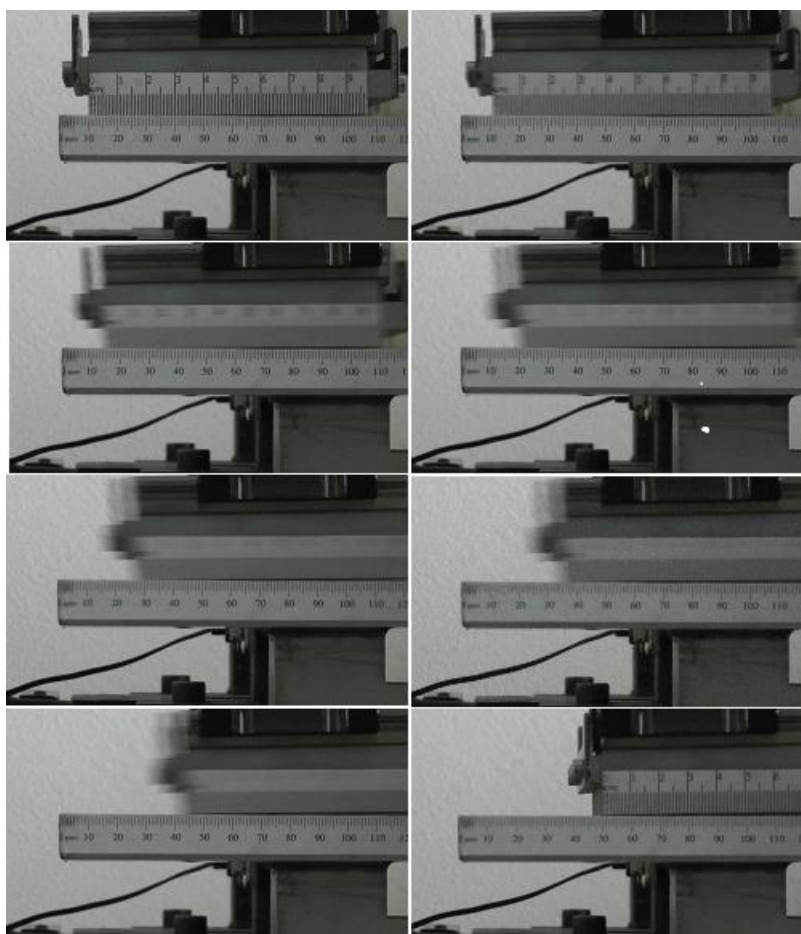
Obr. 6.8.: Změřená statická charakteristika pro ustálený budící proud $I=2A$, měřeno vzdáleností od rovnovážné polohy ($x=0mm$)

Zeslabení sil při použití magnetické kapaliny v polohách blíže jádru než $x = 19mm$ lze odůvodnit chybným měřením díky nahromaděné kapalině, jak už bylo zmíněno. Ostatní data (pro $x > 19mm$) lze ovšem považovat za relevantní. K zesílení generovaných sil zde dochází, nicméně zesílení je mnohem menší, než jsme teoreticky předpokládali (relativ-

ní permeabilita použité ferokapaliny EFH-1 v lineární části magnetizační charakteristiky je dle našeho měření $\mu_r = 1,79$). Při poloze pohyblivé části $x > 40\text{mm}$, tedy pokud se zvyšuje vzdálenost od rovnovážné polohy, navíc dochází při použití ferokapaliny k zeslabení generovaných sil. Tento jev lze přisoudit rozptylovým magnetickým tokům, kdy s rostoucí vzdáleností pohyblivé části od pólů magnetické obvodu je pro magnetický tok energeticky výhodnější uzavírat se přes nemagnetický materiál a kapalinou vyplněnou mezeru než přes pohyblivou část zařízení.

6.3 Experimentální ověření dynamické charakteristiky

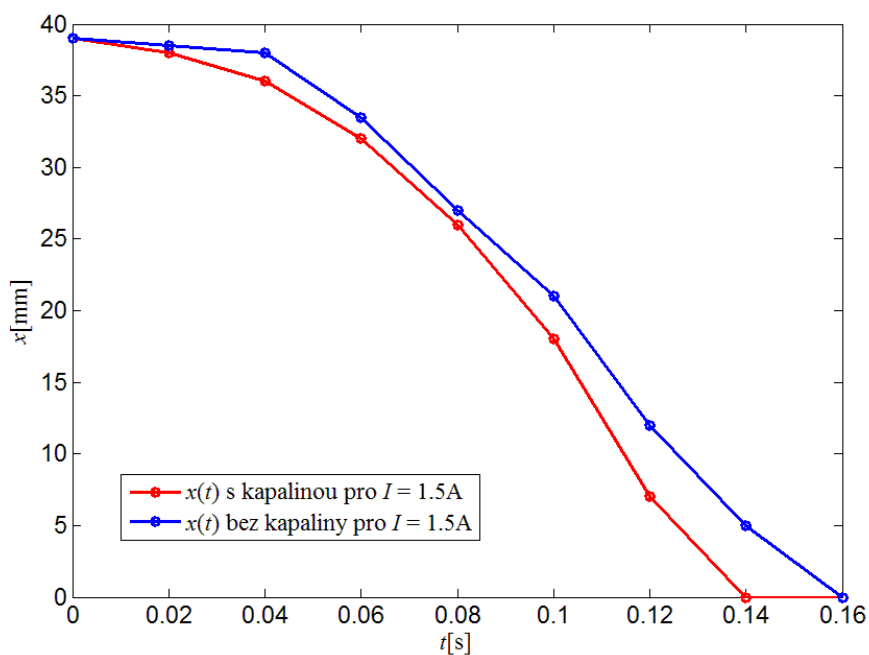
Z předchozích simulací dynamiky aktuátoru, že výsledný přechodový jev bude poměrně rychlý. Změřit rychlé změny napětí a proudu nebylo problém, stačilo použít osciloskop s dostatečnou vzorkovací frekvencí. Jinak tomu ovšem bylo s měřením dynamické polohy pohyblivé části $x(t)$. Dostupné digitální úchylkoměry umožňovaly měření polohy při vzorkovací frekvenci maximálně $f = 0,06\text{ s}$, tato vzorkovací frekvence je nevyhovující, znamenala by pouze dva či tři záznamy v průběhu přechodového jevu. z tohoto důvodu jsme se rozhodl polohu v čase měřit opticky - využil jsem kameru se snímkováním 50 snímků/s, rozložením na jednotlivé snímky a jejich následným zpracováním bylo možné zaznamenat polohu aktuátoru v čase s vzorkovací frekvencí $f = 0,02\text{ s}$. Vzhledem k optickému záznamu dat bylo nutné získaná data přepočítat v závislosti na aktuální poloze na natáčené stupnici, přepočet vychází z jednoduchých goniometrických vztahů při znalosti rozložení měřicí sestavy.



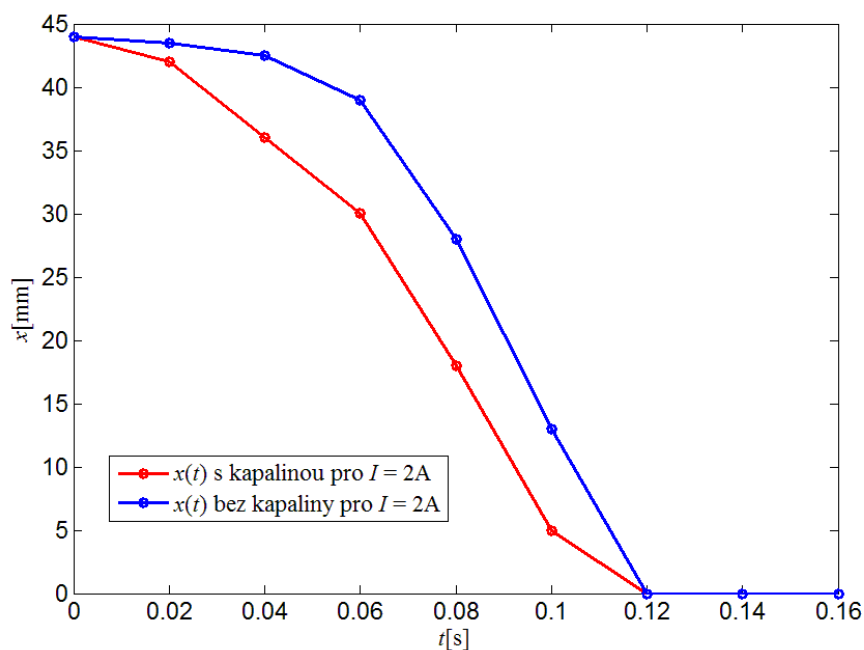
Obr. 6.10.: Ukázka měření dynamické charakteristiky - snímky pořízené kamerou se snímkováním 50 snímků/s - počáteční poloha 39mm

Nevýhodou použité měřicí metody je její poměrně velká chyba daná snímkovací frekvencí - chyba je dána dobou mezi jednotlivými snímky. Tuto chybu lze snížit použitím kamery s vyšší rychlostí snímkování, takové zařízení bohužel v současné době nemáme k dispozici.

Z výsledných grafů dynamických charakteristik (příklady na obr. 6.11 a 6.12) je patrné, že zvýšení sil při použití magnetické kapaliny má pozitivní vliv na rychlost děje. Vzhledem ke konfiguraci měřeného aktuátoru se největší tření odehrává v lineárních ložiscích, případné mechanické ztráty vzniklé třením při pohybu tělesa v kapalině jsou nižší, než vliv zesílení generovaných sil při použití magnetické kapaliny.



Obr. 6.11.: Srovnání změřené dynamické charakteristiky aktuátoru se vzduchovou mezerou a s mezerou vyplněnou ferokapalinou při buzení $I=1,5 A$ v ustáleném stavu a počáteční polohou $x_0=39 mm$

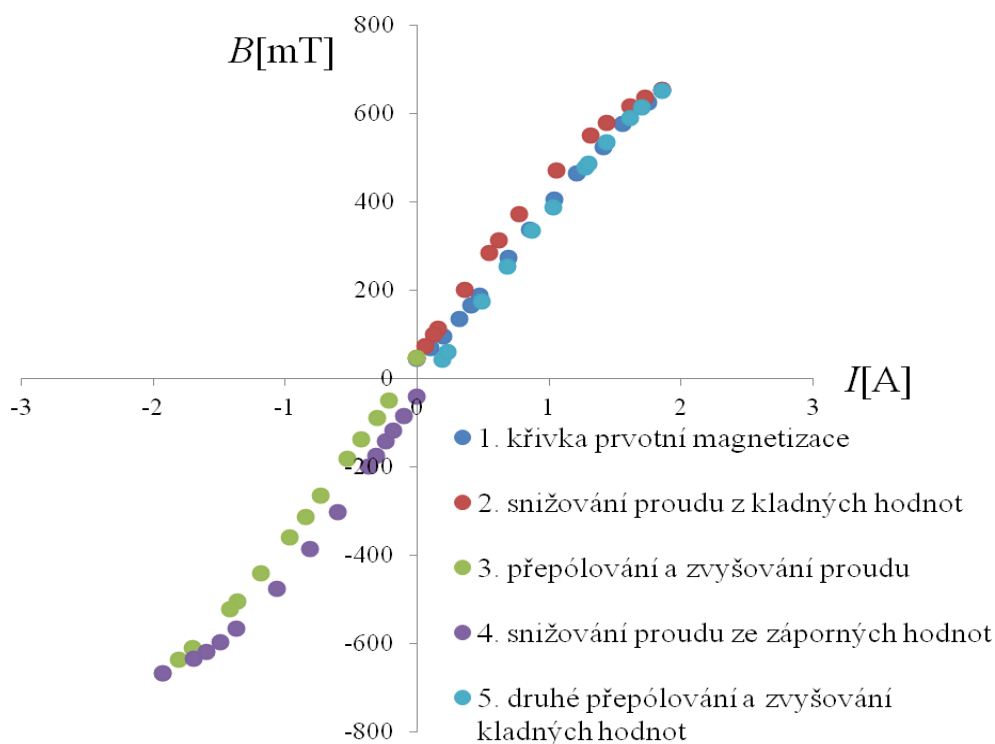


Obr. 6.12.: Srovnání změřené dynamické charakteristiky aktuátoru se vzduchovou mezerou a s mezerou vyplněnou ferokapalinou při buzení $I=2 A$ v ustáleném stavu a počáteční polohou $x=44 mm$

6.4 Vyhodnocení naměřených charakteristik

Měření charakteristik aktuátoru ukázalo pozitivní vliv přítomnosti ferokapaliny ve vzduchové mezeře jak na statickou charakteristiku, tak na charakteristiku dynamickou. Bohužel nelze prohlásit, že by měla kapalina pozitivní vliv ve všech bodech statické charakteristiky, zároveň je zvýšení generovaných sil nižší, než jsme teoreticky očekávali. Důvodem může být materiál použitý na konstrukci magnetického obvodu. Při návrhu aktuátoru bylo počítáno s kvalitním stříhaným elektrotechnickým materiálem používaným na jádra transformátorů s vysokou hodnotou magnetické permeability. Dodavatelská firma bohužel nebyla schopná tento materiál zajistit, proto byl magnetický obvod vyroben z několika slisovaných plechů z konstrukční oceli. Magnetizační charakteristika tohoto materiálu nebyla k dispozici a lze očekávat, že v případě nízkých hodnot magnetické permeability dochází k značnému magnetickému rozptylu, který může mít za následek fakt, že přes prostor s magnetickou kapalinou se uzavře menší část celkového magnetického toku, než by tomu bylo v případě materiálu s vysokou permeabilitou, který by magnetický tok usměrnil. Z tohoto důvodu byla orientačně proměřena efektivní permeabilita použitého magnetického obvodu.

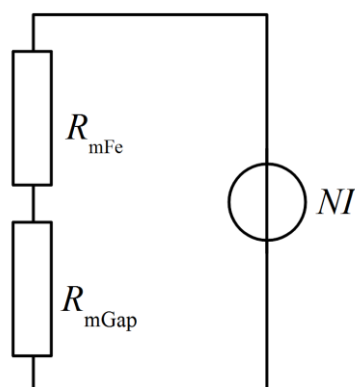
Pro získání přehledu o kvalitě materiálu použitého na magnetický obvod zařízení jsem provedl přibližné měření magnetizační charakteristiky. S pomocí teslametru s Hallovou sondou Elimag MP-1 jsem proměřil hodnotu magnetické indukce v mezeře mezi pevnou a pohyblivou částí aktuátoru, tam, kde bude později při práci zařízení nalita magnetická kapalina. Měření jsem provedl pro různé hodnoty budicího proudu tak, abych hodnotu proudu vždy pouze zvyšoval či snižoval a v závislosti na proudovém omezení použitého stejnosměrného zdroje ($I_{\max} = 2,5\text{A}$), čímž byl zaznamenán vliv magnetické hystereze (výsledek je na obr. 6.13.).



Obr. 6.13.: Měření magnetické indukce v mezeře aktuátoru - malá hysterezní smyčka pro přibližné určení permeability železa použitého na magnetický obvod

V jednotlivých bodech této charakteristiky jsem odhadl permeabilitu s využitím teorie magnetických obvodů:

Pokud budeme předpokládat, že se magnetický tok uzavírá po střední délce magnetických siločar a zanedbáváme rozptylové toky, lze zařízení modelovat pomocí magnetického obvodu dle obr. 6.14.



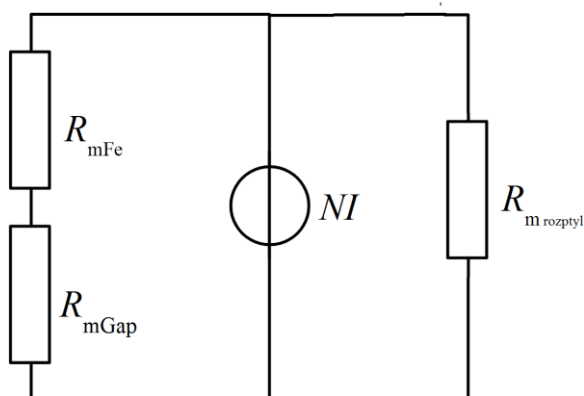
Obr. 6.14.: Model magnetického obvodu použitý pro orientační výpočet permeability použitého materiálu

Při zanedbání rozptylových toků a s předpokladem rovnoměrného rozložení magnetického pole v průřezu magnetického obvodu lze zapsat vztah:

$$\Phi = \int_S B dS = BS = \frac{NI}{R_m} = \frac{NI}{R_{m1} + R_{m2}} = \frac{NI}{\frac{l_1}{\mu_0 \mu_{rFe} S} + \frac{l_2}{\mu_0 S}}$$

Ze známých geometrických rozměrů zařízení, počtu závitů, naměřených hodnot magnetické indukce při známých proudech lze přibližně dopočítat hodnotu permeability použitého železa v každém pracovním bodě změřené charakteristiky.

Nutno podotknout, že použití teorie magnetických obvodů tomto případě vede k orientačnímu výsledku, který se nejvíc blíží tzv. efektivní permeabilitě magnetického obvodu. Z elektrotechnického hlediska nekvalitní materiál použitý na magnetický obvod se negativně promítne na funkci zařízení tak, že malý rozdíl permeabilit železa a okolního vzduchu umožní uzavírání se magnetického toku okolím. Pro přesnější výpočet permeability použitého železa lze tuto skutečnost přibližně reprezentovat přidáním paralelní větve reprezentující rozptylový magnetický tok, viz. obr. 6.15.



Obr 6.15.: Model magnetického obvodu s respektováním rozptylových toků

Zprůměrováním dopočítaných hodnot permeabilit jsem dosáhl průměrné hodnoty relativní permeability použitého magnetického obvodu $\mu_{rFe} = 49$.

6.5 Vyhodnocení experimentu

Vzhledem k výsledku orientačního proměření magnetické permeability magnetického obvodu lze prohlásit, že tento materiál je poměrně nekvalitní a v obvodu dochází k silným rozptylovým tokům, kterými lze vysvětlit horší výsledky při použití magnetické kapaliny, než byly teoreticky očekávány. Na druhou stranu, proměřené charakteristiky aktuátoru ukazují, že i přes nevhodný materiál použitá na konstrukci zařízení má ferokapalina pozitivní vliv na chod systému, a to jak na charakteristiku statickou, tak i dynamickou. Naměřené hodnoty potvrzují korektnost našeho výzkumu.

Na základě zkušeností z proměření experimentálního zařízení lze vyvodit závěry pro budoucí experimenty. Při návrhu budoucích experimentálních elektromechanických systémů je potřeba konstrukčně vyřešit problém nemožnosti proměření všech bodů statické charakteristiky. Zároveň je třeba při kontraktování výroby zařízení důsledně trvat na použití kvalitního elektrotechnického materiálu, přestože tato skutečnost značně zkomplikuje konstrukci a prodraží cenu zařízení. Experimentu navíc přesvědčil vedení pracoviště o tom, aby byly vymezeny prostředky na pořízení profesionální vysokorychlostní kamery s rychlostí snímkování až 1000 fps. Při budoucích dynamických měřeních lze tedy očekávat přesnější průběhy naměřených dynamických charakteristik.

ZÁVĚR

V předložené práci byla provedena kritická studie fyzikálně-chemických vlastností magnetických kapalin a jejich možného uplatnění ve společenské praxi. Z této studie mimo jiné vyplývá značný potenciál feroKapalin jako kapalného feromagnetického materiálu pro užití v elektromechanických systémech a potenciál magnetoreologických kapalin jako inteligentního materiálu, jehož viskozitu lze měnit aplikací magnetického pole. Zároveň je patrná absence měřicích metod pro určování materiálových parametrů magnetických kapalin.

Analýza elektromechanického systému s využitím matematického modelu založeného na metodě magnetických obvodů ukázala zesílení generovaných statických magnetických sil. Toto zesílení je úměrné velikosti permeability feroKapaliny použité v mezeře zařízení. Tento způsob analýzy ovšem nerespektuje geometrické uspořádání, počítá pouze s materiálovými parametry použitých součástí a střední délkou magnetické siločáry. Z důvodu upřesnění výsledků byla provedena analýza statických silových charakteristik s využitím modelu založeného na metodě konečných prvků, který respektuje geometrické rozložení. Výsledky analýzy potvrzují zesílení statických sil, ale zároveň z nich plyne geometrická podmínka nutná pro funkčnost zařízení. FeroKapalina musí být přítomná pouze ve vzduchové mezeře mezi pevnou a pohyblivou částí elektromechanického systému, její přítomnost v jiných částech má naopak negativní vliv na velikost výsledné elektromagnetické síly. Ve směru pohybu elektromechanického systému je potřebný dostatečný gradient permeabilit použitých materiálů.

Na základě principu zvýšení statických sil vyplněním mezery zařízení feroKapalinou byl vytvořen ideový návrh inovativního krokového elektromechanického transduktoru. Z jeho matematického modelu vyšetřovaného pomocí metody konečných prvků plyne, že při použití v současnosti dostupných feroKapalin s permeabilitou řádově $\mu_r = 5$ lze docílit až 2,5 násobného zesílení generovaných statických sil než při použití vzduchové mezery. Zásadní nevýhodou tohoto systému je viskozita použité feroKapaliny, při pohybu tělesa v kapalině dochází k viskózním ztrátám. Nárůst statických sil je ovšem značný a v případě pomaloběžných systémů může být zisk účinnosti díky zvýšení sil vyšší než přítomné viskózní ztráty.

Stěžejním materiálovým parametrem vymezující použití v elektromechanických aplikacích je magnetická permeabilita. Standardní metody měření permeabilit, používané na pevná feromagnetika, nelze z řady důvodů použít pro magnetické kapaliny.

V práci byla navržena inovativní technika měření pro návrhy praktických aplikací klíčové složky permeability magnetických kapalin. Pomocí této metody lze měřit i kapaliny o velmi nízkých hodnotách relativní permeability $\mu_r < 2$.

Simulace dynamického jevu v elektromechanickém aktuátoru potvrdila, že výhodnost užití magnetické kapaliny je dána jejími materiálovými vlastnostmi - její dynamickou viskozitou a magnetickou permeabilitou. Při vhodném poměru těchto veličin lze docílit zlepšení chodu zařízení. Stanovení obecného kritéria poměru těchto veličin je otázkou pro budoucí výzkum.

Měření statických a dynamických charakteristik experimentálního lineárního aktuátoru potvrdilo teoreticky předpokládané zlepšení jak jeho statických, tak i dynamických charakteristik. Výsledky experimentu potvrzují korektnost provedeného výzkumu - vyplnění vzduchové mezery konkrétního elektromechanického aktuátoru vedlo ke zlepšení jeho chodu.

Magnetické kapaliny jsou perspektivním elektrotechnickým materiálem s řadou praktických aplikací. Vzhledem k současnému intenzivnímu výzkumu v oblasti nanotechnologií lze očekávat vývoj nových druhů magnetických kapalin se zajímavými elektromagnetickými vlastnostmi. Ferokapalina s vysokou permeabilitou a nízkou viskozitou může být použita v elektromechanických systémech a podstatně zvýšit jejich účinnost, studie takových zařízení je tedy plně na místě. Vývoj stabilního plynného feromagnetika chemickým navázáním feromagnetických částic na molekuly nosného plynu by dle názoru autora způsobil revoluci v technologii elektrických strojů.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MAYER, D. Future of electrotechnics: ferrofluids. *Advances in electrical and electronic engineering*. roč. 2008, č. 7, s. 9-14. ISSN 1336-1376.
- [2] ELMORE, W. C. *Phys.Rev.* 1938, č. 59, s. 309.
- [3] RABINOW, J. *Magnetic fluid clutch*. National Bureau of Standards Technical News Bull., 32(4), 1948, s. 54-60.
- [4] BEHRENS, S. Synthesis and Characterization. *Lect. Notes Phys.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, č. 763, s. 1-82. DOI: 10.1007/978-3-540-85387-9_1.
- [5] AccessScience [online]. [cit.2012-04-20]. Dostupné z: <http://accessscience.com/content/Ferrofluid/801330>
- [6] VEKÁS, L. Ferrofluids and Magnetoreological Fluids. *Advances in Science and Technology*. 2008, č. 54, s. 127-136. Dostupné z: www.scientific.net
- [7] BALAN, C., BROBOANA, D., GHEORGHIU, E., VÉKÁS, L. Rheological characterization of complex fluids in electro-magnetic fields. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2008, 154-1, s. 22-30. ISSN 0377-0257.
- [8] PAPELL, S. S. *Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles* [patent]. USA. 3,215,572. Uděleno 1965.
- [9] PILENI, M. P. Magnetic Fluids: Fabrication, Magnetic Properties, and Organisation of Nanocrystals. *Adv.Funct.Mater.* Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001, roč. 11, č. 5. ISSN 1616-301X/01/0510-0323.
- [10] CHARLES, S., V. The Preparation of Magnetic Fluids [online]. [cit.2012-04-20] Dostupné z: http://pages.csam.montclair.edu/~yecko/ferro/oldpapers/DIRECTORY_LNP594/Charles_Prep.pdf
- [11] KHALAFALLA, S. E., REIMERS, G. W. *Magnetofluids and their manufacture*. [patent]. USA. 3,764,540. Uděleno 1973.

- [12] PAPIRER E., HORNY, P., BALARD, H., ANTHORE, R., PETIPAS, R., MARTINET, A. *The preparation of a ferrofluid by the decomposition of dicobalt octacarbonyl*. J. Coll. Int.Sci. 94, 1983. 207, 20.
- [13] RAJ, K. a kol. *Electrically conductive ferrofluid compositions and method of preparing and using same*. [patent]. USA. 4604229. Uděleno 1986.
- [14] DYUPOVKIN, N.I. Conductivity of magnetic fluids. *Kolloidnyj Zhurnal*. 1995, č. 5, s. 666-669.
- [15] SEGAL, V., HJORTSBERG, A., RABINOVICH, A., NATTRASS, D., RAJ, K. AC(60Hz) and Impulse Breakdown Strength of a Colloidal Fluid Based on Transformer oil and Magnetite Nanoparticles. In: *Conference of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. Arlington, Virginia, USA, 1998. 0-7803-4927-X/98.
- [16] KOPČANSKÝ, P., TOMČO, L., MARTON, K., KONERACKÁ, M., TIMKO, M., POTOČOVÁ, I. The DC dielectric breakdown strength of magnetic fluids based on transformer oil. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2005, č. 289, s. 415-418. ISSN 0304-8853.
- [17] ODENBACH, S. *Magnetoviscous effects in ferrofluids*. Berlin: Springer, 2002, 151 s. Lecture notes in physics. Monographs. ISBN 3-540-43068-7; ISSN 0940-7677.
- [18] Ferrotec. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.ferrotec.com/>
- [19] MAYER, D. *Aplikovaný elektromagnetismus*. 1. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012. ISBN 978-80-7232-424-8.
- [20] HUK, B., LUECKE, M. *Magnetic properties of colloidal suspensions of interacting magnetic particles*,. Rep. Prog. Phys., 2004. 67 1731.
- [21] DELPHI Press Releases [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: http://delphi.com/news/pressReleases/pressReleases_2006/pr_2006_11_30_001/
- [22] MAYER, D. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. *Magnetoreologický torzní tlumič* [patent]. ČR. 176, 302067. Uděleno 2009.
- [23] HU, W., ROBINSON, R., WERELEY, N. M. A Design Strategy for Magnetoreological Dampers Using Porous Valves. In: *11th Conference on Electrorheology*

cal Fluids and Magnetoreological Suspensions: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2009. 149. 012056.

- [24] KIM, Y., LANGARI, R., HURLEBAUS, R. Semiactive nonlinear control of a building with a magnetoreological damper system. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009, 23(2), s. 300-315. ISSN 0888-3270.
- [25] AVRAAM, M. MR-fluid brake design and its application to a portable muscular rehabilitation device. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/66128779/Avraam09-Presentation>
- [26] MAYER, D. Magnetické kapaliny a jejich použití (2. Část - dokončení). *Elektro*. 2007, roč. 17, č. 4, s. 4-8.
- [27] MAYER, D. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. *Ferrokapalinová ucpávka* [patent]. ČR. 177, 301769. Uděleno 2009.
- [28] DELPHI Presss Releases [online]. 2012-04-20 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.ferrolabs.com/en/>
- [29] MOREGA, A. M., MOREGA, M., PISLARU-DANESCU, L., STOICA, V., NOURAS, F., STOIAN, F.D. A novel, ferrofluid-cooled transformer. electromagnetic field and heat transfer by numerical simulation. In: *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM): 2010 12th International Conference*. 2010, s. 140-146. DOI: 10.1109/OPTIM.2010.5510425.
- [30] ODENBACH, S. Ferrofluids - Magnetically controlled suspensions, colloids and surfaces. *Physicochemical and Engineering Aspects*. 2003, s. 171-178.
- [31] HUKÉ, B., LUECKE, M. *Magnetic properties of colloidal suspensions of interacting magnetic particles*,. Rep. Prog. Phys., 2004. 67 1731.
- [32] CLEMENT, J. H., SCHWALBE, M., BUSKE, N., SCHNABELRACUH, M., GORNETR, P., KLICHE, K.O., PACHMANN, K., WEITSCHIES., W., HOFFKEN, K. Differential interaction of magnetic nanoparticles with tumor cells and peripheral blood cells. *J. Cancer Res. Clin. Oncol*. 2006, č. 132, s. 281-292.
- [33] BUSCH, C.J. Einfluss heftiger Erysipeln auf organisierte Neubildungen. *Verhandlungen des naturhistorischen Vereines der preussischen Rheinlande und Westphalens*. Bonn: Max Cohen & Sohn, 1866, s. 28-33.

- [34] GILCHRIST, R. K., MEDAL, R., SHOREY, W. D., HANSELMAN, H., C., PARROT, J.C., TAYLOR, C.B. Selective inducting heating of lymph nodes. *Annals of Surgery*. 1957, 146-596.
- [35] HERGT, R., ANDRA, W. *Magnetism in Medicine: Magnetic Hyperthermia and Thermoablation*. Wiley, 2006.
- [36] TRAHMS, L. Biomedical Applications of Magnetic Nanoparticles. *Lect. Notes Phys.* Springer-Verlag Heidelberg, roč. 2009, č. 763, s. 327-358. DOI: 10.1007/973-3-540-85387-9_5.
- [37] ENGELMANN, S., NETHE, A., SCHOLZ, T., STAHLMANN, H.-., 2005. Concept of a new type of electric machines using ferrofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **293**(1), s. 685-689.
- [38] NETHE, A., SCHOLZ, T., STAHLMANN, H.-., 2006. Improving the efficiency of electric machines using ferrofluids. *Journal of Physics Condensed Matter*, **18**(38), s. S2985-S2998.
- [39] ENGELMANN, S., NETHE, A., SCHOLZ, T. and STAHLMANN, H.-., 2004. Experiments with a ferrofluid-supported linear electric motor. *Applied Organometallic Chemistry*, **18**(10), pp. 529-531.
- [40] NETHE, A., SCHOLZ, T., STAHLMANN, H. D. Theoretical evaluation of the ferrofluid-driven electric machine. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2005, 293(1), s. 709-714. ISSN 0304-8853.
- [41] LASER, D. J., SANTIAGO J. G. A review of micropumps. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2004, 14(6), R35-R64.
- [42] HPFEM GROUP. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://hpfem.org>
- [43] German Ferrofluid Community Information Server. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.maschinenbau.tu-ilmeneau.de/mb/wwwtd/hydromag/ferro/start.html>
- [44] BAKSHI, U. A., AJAV, U. A. *Electrical measurements and measuring instruments*. Pune, India: Technical Publications Pune, 2007. ISBN 81-843-1255-5.
- [45] MAYER D. The state-variable method of electric network analysis. *Acta Technica ČSAV*, 15 (1970), No. 6, str. 761-789.
- [46] MAYER D. Variáční principy a teorie obvodů. *Časopis EE*, 6 (2000), č.6. str.4-7.

- [47] STORK M., HRUSAK J., MAYER D. Energy approach principle as a tool for design and simulation of linear and nonlinear systems.
- [48] SODANO, H.A., BAE, J.-., INMAN, D.J., KEITH BELVIN, W., 2005. Concept and model of eddy current damper for vibration suppression of a beam. *Journal of Sound and Vibration*, **288**(4-5), s. 1177-1196.
- [49] SODANO, H.A., BAE, J.-., INMAN, D.J., BELVIN, W.K., 2006. Improved concept and model of eddy current damper. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, **128**(3), s. 294-302.

SEZNAM AUTOROVÝCH PRACÍ

ČLÁNKY AUTORA V IMPAKTOVANÝCH ČASOPISECH

- [A1] MAYER, D., POLCAR, P. A novel approach to measurement of permeability of magnetic fluids. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88(7 B), 2012, s. 229-231.
- [A2] POLCAR, P., KROPIK, P., ULRYCH, B. Actuator with ferromagnetic plunger working in ferrofluidic liquid. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88(7 B), 2012, s. 214-216.

ČLÁNKY AUTORA V ODBORNÝCH RECENZOVANÝCH ČASOPISECH

- [A3] POLCAR, P., MAYER, D. Design of a Stepper Transducer with Ferrofluid. *Acta Technica*, Institute of Thermomechanics AS CR, 2012, ISSN 0001-7043. 2012, 57(4), s. 421-433.
- [A4] PÁNEK, D., HRUŠÁK, J., KROPÍK, P., POLCAR, P. On discretization of strongly non-linear systems. *Acta Technica*, Institute of Thermomechanics AS CR, 2010, ISSN 0001-7043. 2010, 55(3), s. 301-314
- [A5] POLCAR, P. Design, Construction and Experimental Verification of Magnetorheological Brake. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 2(a), s. 23-27, 2013.

ČLÁNKY AUTORA VE SBORNÍCÍCH Z MEZINÁRODNÍCH KONFERENCÍ

- [A6] POLCAR, P., Magnetorheological brake design and experimental verification, *Proceedings of 9th International Conference, ELEKTRO 2012*, 2012, s. 448-451.
- [A7] POLCAR, P., MAYER, D. Design of a Stepper Transducer with Ferrofluid. *Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering*, Klatovy, Západočeská univerzita v Plzni, 2011, ISBN 978-80-7043-993-7, s. IV-5
- [A8] DOLEŽEL, I., POLCAR, P., KROPÍK, P. Actuator with Ferromagnetic Plunger Working in Ferrofluidic Liquid. *Advanced Methods in the Theory of Electrical*

Engineering, Klatovy, Západočeská univerzita v Plzni, 2011, ISBN 978-80-7043-993-7 s. IV-1

- [A9] POLCAR, P., MAYER, D., PÁNEK, P. A Novel Approach to Magnetic Fluids Permeability Measurement. *Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering*, Klatovy, Západočeská univerzita v Plzni, 2011, ISBN 978-80-7043-993-7, s. VI-1
- [A10] MAYER, D., POLCAR, P. Theory of Electrical Engineering Upgrade: Supercapacitors. *Advanced Methods in the Theory of Electrical Engineering*, Klatovy, Západočeská univerzita v Plzni, 2011, ISBN 978-80-7043-993-7, s. IV-11
- [A11] POLCAR, P., MAYER, D. A View on the Reactive Power in Nonsinusoidal Steady State. *Proceedings of International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation 2010*, ISNCC 2010, 2010
- [A12] POLCAR P. Magneto-Reological damper with Membrane. ST.Petersburg, *International forum-competition of young researchers - Topical issues of subsoil usage*, State Mining Institute, 2009. s.66
- [A13] MAYER, D., POLCAR, P. Novel Approach to Electrodynamics Education. *Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Lázně Kynžvart, ISBN 978-80-7043-899-2, 2010, s. 107

ČLÁNKY AUTORA VE SBORNÍCÍCH Z TUZEMSKÝCH KONFERENCÍ

- [A14] POLCAR, P. Elektromechanický transduktor s ferrokapalinou. *Elektrotechnika a informatika 2011*. Část 1., Elektrotechnika, Zámek Nečtiny, Západočeská univerzita v Plzni, 2011, ISBN 978-80-261-0016-4., s. 105-108
- [A15] POLCAR, P. Řízený magnetoreologický tlumič s membránou, princip a výpočet tlumení. *Elektrotechnika a informatika - 11. ročník konference doktorských prací*, Zámek Nečtiny, část 1. Elektrotechnika, Západočeská univerzita v Plzni, 2010, ISBN 978-80-7043-913-5, s. 94-97

- [A16] POLCAR, P. Membránový magnetoreologický tlumič. *XLI. Sešit katedry Elektrotechniky 2009*, Katedra elektrotechniky FEI VŠB-TU Ostrava, 2009, ISBN 978-80-248-2020-0, s. 106-108
- [A17] POLCAR, P. Podmíněnost a stabilita numerického řešení systému ODR reprezentujícího kmitavou mechanickou soustavu s řízeným elektromagnetickým tlumičem. *Elektrotechnika a informatika 2009*. Část 1., Elektrotechnika, 10. ročník konference doktorských prací, Zámek Nečtiny, 4.-5. listopadu 2009. Plzeň Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-810-7. s. 83-86
- [A18] POLCAR, P. Analýza kmitavé mechanické soustavy s elektromagnetickým tlumičem. *Elektrotechnika a informatika 2008*. Část 1., Elektrotechnika : 9. ročník konference doktorských prací, Zámek Nečtiny, 6. - 7. listopadu 2008. V Plzni : Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-702-5. s. 91-94
- [A19] POLCAR, P. Návrh antikoronní ochrany statorového vinutí synchronního stroje. *Elektrotechnika a informatika 2007*. Část 1., Elektrotechnika: 8. ročník přehlídky doktorských prací, zámek Nečtiny, 31.10. 1.11.2007. V Plzni: Západočeská univerzita, 2007. ISBN 978-80-7043-572-4. s. 73-76

VYSOKOŠKOLSKÉ KVALIFIKAČNÍ PRÁCE AUTORA

- [A20] POLCAR, P. Kmitavá mechanická soustava s řízeným elektromagnetickým tlumičem.[rigorózní práce ke státní doktorské zkoušce] Západočeská univerzita v Plzni, 2010.
- [A21] POLCAR, P. Návrh antikoronní ochrany statorového vinutí synchronního stroje. [diplomová práce] Západočeská univerzita v Plzni, 2007.

FUNKČNÍ VZORKY AUTORA

[A22] POLCAR, P. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Magnetoreologický rotační brzdový systém se stejnosměrným buzením [funkční vzorek]. ČR, Číslo identifikace výsledku: 22180-FV004-2012, 2012.

[A23] POLCAR, P., KACEROVSKÝ J. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Elektromechanický aktuátor s magnetickým obvodem uzavřeným přes ferokapalinu [funkční vzorek]. ČR, Číslo identifikace výsledku: 22180-FV007-2012, 2012.

7 Příloha: Závěry plynoucí z praktických zkušeností z práce s magnetickými kapalinami

Při práci s magnetickými kapalinami či se zařízeními tyto kapaliny obsahující jsem narazil na několik komplikací způsobených vlastnostmi těchto látek. Odborná literatura na tyto problémy neupozorňuje, proto následující kapitola obsahuje výčet komplikací, s kterými se může konstruktér či obsluha zařízení obsahujících magnetické kapaliny setkat, včetně řešení, jak se s nimi vyrovnat.

7.1 Velikost molekul ferokapalin

Miniaturní rozměry molekul magnetických kapalin, hlavně ferokapalin s rozměry pevných částic v řádu nm, kladou zvýšené nároky na skladování těchto látek a zacházení s nimi. Ferokapaliny mají tendenci prosakovat skrz pórovitý materiál, pro skladování je tedy nutné zvolit nádoby z nepórovitých materiálů. Zároveň při práci s ferokapalinami nestačí používat jednorázové ochranné rukavice z igelitu, kapalina přes ně projde. Doporučujeme používat ochranné rukavice určené pro práci s tuky.

7.2 Koloidní nestabilita MR kapalin

Zatímco užívané ferokapaliny se v praxi ukázaly jako koloidně stabilní, u MR kapalin se ukázalo odpařování nosné kapaliny, které se měřitelně projeví v řádu dní (viz. obr. P.1). Z tohoto důvodu doporučuji skladovat MR kapaliny v uzavřených nádobách a zařízení, které je využívají, navrhovat tak, aby byla pracovní komora s kapalinou uzavřená a nemohlo dojít k odpařování.



Obr. P.1.: Odpařování nosné tekutiny MR kapalin (patrné na stěnách nádoby)

7.3 Povrchový jev a migrace magnetických kapalin

Nepůsobí-li na magnetickou kapalinu externí magnetické pole, je její hladina volná a kapalina makroskopicky zaujímá tvar nádoby (viz. obr. P.2). Již při aplikaci minimálních hodnot magnetické indukce B ale dojde k povrchovým nestabilitám, na povrchu kapaliny se tvoří kapilární struktury ve směru působícího magnetického pole (viz obr. P.3). S růstem B dochází k růstu magnetických sil a může dojít k migraci kapaliny ve směru působící B . Chceme-li tomuto jevu zamezit, je nutno kapalinu těsně uzavřít do nádoby, poté si zachová svůj tvar a zamezíme migraci.



Obr. P.2: Volná hladina ferokapaliny - bez působení externího magnetického pole



Obr. P.3: Povrchový jev při vystavení ferokapaliny působení externího magnetického pole

7.4 Práce s kapalinami a permanentními magnety

Permanentní magnety jsou stálým zdrojem magnetického pole a s ním i magnetických sil. Dostane-li se magnetická kapalina do přímého kontaktu s permanentním magnetem, je jím přitažena, přilne a je velice obtížné je opět oddělit (viz. obr. P.4 a P.5). To může být žádoucí (např. v případě MR ucpávky), ale pokud ne, při práci s permanentními magnety a magnetickými kapalinami je nutné důrazně dbát na to, aby k těmto přímým kontaktům nedocházelo, mezi těmito prvky je nutná nepropustná mechanická zábrana.



Obr. P.4.: Kontakt ferokapaliny a permanentního magnetu, migrace kapaliny



Obr. P.5.: Kontakt MR kapaliny a permanentního magnetu, migrace kapaliny

7.5 Čištění objektů od magnetických kapalin

Šetrným a v praxi užitečným se ukázalo čištění zařízení potřísněných magnetickými kapalinami pomocí elektromagnetu. Magnetické kapaliny obsahující olej mají vysokou přilnavost, lze je smývat s použitím odmašťovačů, ale při vysoké ceně některých suspenzí nanočástic je na místě provádět údržbu tak, aby došlo k co nejmenším ztrátám použitého materiálu. Za tímto účelem lze využít migraci magnetických kapalin ve směru magnetického pole. Elektromagnet je opatřen neprodyšnou fólií, viz obr. P.6. Toto zařízení je přiblíženo k objektu potřísněnému magnetickou kapalinou a vybuzeno. Vzniklé magnetické pole přitáhne kapalinu na fólii. Po vypnutí buzení přestanou působit magnetické síly a kapalina po fólii volně steče, nebo ji lze setřít tam, kam je potřeba.



Obr .P.6.: Elektromagnet pro čištění objektů potřísněných magnetickou kapalinou; vlevo - elektromagnet vybuzen, magnetická kapalina migruje k jeho pólům, vpravo - vypnutí buzení, kapalina volně steče do kontejneru

Jádro elektromagnetu musí být vyrobeno z magneticky měkkého materiálu, tedy z materiálu s co nejslabší magnetickou hysterezí. Pokud po odpojení buzení zůstane v jádru byť relativně slabá magnetická remanence, kapalina stále interaguje a nesteče.