

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ELEKTROMAGNETICKÝ UPÍNACÍ SYSTÉM

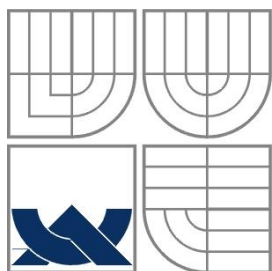
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

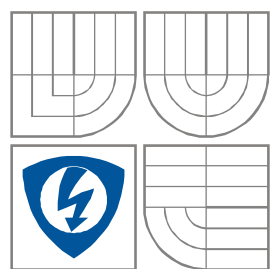
Jiří Haratek

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ELEKTROMAGNETICKÝ UPÍNACÍ SYSTÉM

ELECTROMAGNETIC CHUCK SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

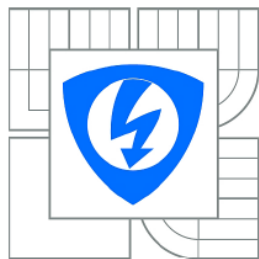
Jiří Haratek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADOSLAV CIPÍN, Ph.D.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jiří Haratek

Ročník: 3

ID: 148952

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Elektromagnetický upínací systém

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analytický návrh elektromagnetického upínacího systému.
2. Ověření návrhu pomocí metody konečných prvků.
3. Praktická konstrukce navrženého systému.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003- 6.
- [2] Bianchi N. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements. CRC Press, 2005. 304 s. ISBN: 0849333997.
- [3] Fitzgerald A. E., Kingsley Ch. Jr., Umans S. Electric Machinery. McGraw-Hill, 2002. 704 s. ISBN 0073660094

Termín zadání: 22.9.2014

Termín odevzdání: 2.6.2015

Vedoucí práce: Ing. Radoslav Cipín, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce návrh jednoho segmentu elektromagnetického upínacího systému. V teoretické části se seznámíme s principem funkce upínacích systémů s permanentními magnety, elektromagnety a jejich kombinací. Hlavní část práce je zaměřena na výpočet přídržné síly elektromagnetického upínacího systému s kombinací permanentních magnetů a elektromagnetů a ověření návrhu pomocí metody konečných prvků vytvořeném v simulačním prostředí FEMM. Cílem zadání je také praktická konstrukce navrženého systému.

Klíčová slova

Upínací systém, Elektromagnetický systém, Permanentní magnet, Elektromagnet, Výpočet síly, Magnetické pole, FEMM

Abstract

The aim of this bachelor thesis is proposal of one segment of electromagnetic chuck system. In the theoretical section, we introduce the principle function of chuck systems with permanent magnets, electromagnets and their combinations. The main part focuses on the calculation of the holding force of electromagnetic chuck system with a combination of permanent magnets and electromagnets and verification using finite element method created in the simulation environment FEMM. The aim of assignment is also a practical design of the proposed system.

Keywords

Chuck system, Electromagnetic system, Permanent magnet, Electromagnet, Calculation of force, Magnetic field, FEMM

Bibliografická citace :

HARATEK, J. *Elektromagnetický upínací systém*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 97 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radoslav Cipín, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Elektromagnetický upínací systém jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Radku Cipínovi, Ph.D. za odbornou pomoc a rady při řešení elektromagnetických problémů a za cenné připomínky ke zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a těm nejbližším za podporu.

V Brně dne Podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	14
1 ÚVOD	17
1.1 MAGNETICKÉ UPÍNACÍ SYSTÉMY	17
1.2 HISTORIE	18
2 MAGNETICKÉ SYSTÉMY	19
2.1 ZÁKLADNÍ VELIČINY A VZTAHY MAGNETICKÉHO POLE.....	20
3 ROZDĚLENÍ MAGNETICKÝCH UPÍNACÍCH SYSTÉMŮ	22
3.1 UPÍNACÍ SYSTÉMY S PERMANENTNÍMI MAGNETY	22
3.2 UPÍNACÍ SYSTÉMY ELEKTROMAGNETICKÉ.....	22
3.3 UPÍNACÍ SYSTÉMY ELEKTRO-PERMANENTNÍ.....	24
4 TEORIE MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ	26
4.1 VLASTNOSTI MATERIÁLŮ OVLIVŇUJÍCÍ MAGNETICKÉ POLE	26
4.2 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI FEROMAGNETIKA	28
4.3 MAGNETICKY TVRDÉ A MĚKKÉ MATERIÁLY	29
4.3.1 MAGNETICKY MĚKKÁ FEROMAGNETIKA	29
4.3.2 MAGNETICKY TVRDÁ FEROMAGNETIKA.....	30
4.4 MIKROSTRUKTURA MAGNETICKÉ POLARIZACE.....	30
4.4.1 DIAMAGNETIKA	31
4.4.2 PARAMAGNETIKA	31
4.4.3 FEROMAGNETIKA.....	31
4.5 MAGNETIZACE	31
4.6 DEMAGNETIZACE	32
5 VLASTNÍ NÁVRH A ŘEŠENÍ.....	34
5.1 ČTVRTINA OBVODU	36
5.1.1 NUMERICKÝ VÝPOČET	36
5.1.2 ANALYTICKÝ MODEL	44
5.2 POLOVINA OBVODU.....	48
5.2.1 NUMERICKÝ VÝPOČET	48
5.2.2 ANALYTICKÝ MODEL	56
5.3 REÁLNÝ MAGNETICKÝ OBVOD	63
5.3.1 NUMERICKÝ VÝPOČET	63
5.3.2 ANALYTICKÝ MODEL	72
5.4 VÝPOČET ELEKTROMAGNETU	79
5.5 MĚŘENÍ VÝSLEDKŮ POMOCÍ REÁLNÉHO EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU	83
5.6 PŘEHLED VÝSLEDKŮ A ZHODNOCENÍ	87
6 ZÁVĚR.....	95

POUŽITÁ LITERATURA	97
---------------------------------	-----------

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr 2-1 Typy magnetických systémů	20
Obr 3-1 Princip permanentního magnetického upínače, převzato z [6]	22
Obr 3-2 Základní modul elektromagnetického upínače, převzato z [6]	23
Obr 3-3 Elektromagnetický upínač s pólovou deskou, převzato z [6]	23
Obr 3-4 Základní schéma elektro-permanentního segmentu, převzato z [6]	24
Obr 3-5 Čtvercové uspořádání elektro-permanentních segmentů [6]	24
Obr 3-6 Princip průmyslově užívaných elektro-permanentních upínačů, převzato z [6]	24
Obr 3-7 Princip průmyslově užívaných elektro-permanentních upínačů 2, převzato z [6]	25
Obr 3-8 Elektro-permanentní upínací systém s pólovými nástavci, převzato z [5]	25
Obr 4-1 Typy materiálů ovlivňující magnetické pole : a) diamagnetikum , b) paramagnetikum , c) feromagnetikum , d) vakuum	27
Obr 4-2 Hysterezní smyčka, převzato z [10]	29
Obr 4-3 Princip odmagnetování v zmenšujícím se střídavém magnetickém poli, převzato z [10]	33
Obr 4-4 Demagnetizace permanentního magnetu, převzato z [13]	33
Obr 5-1 Rozdělení celkového modelu na dílčí části	34
Obr 5-2 Naznačení orientace polarity permanentních magnetů	35
Obr 5-3 Technická dokumentace čtvrtiny	36
Obr 5-4 Schéma magnetického obvodu čtvrtiny	38
Obr 5-5 Zjednodušené schéma magnetického obvodu čtvrtiny	38
Obr 5-6 Hustota energie permanentního magnetu	41
Obr 5-7 Vypočtená závislost přídržné síly čtvrtiny systému na velikosti vzduchové mezery	43
Obr 5-8 Vytvoření modelu čtvrtiny	44
Obr 5-9 Zobrazení magnetické indukce a toku: a) 0,1 mm , b) 0,5 mm , c) legenda magnetické indukce B	45
Obr 5-10 Zobrazení absolutní hodnoty magnetického toku ve vzduchové mezeře čtvrtiny systému ve vzdálenosti 0,5 mm	46
Obr 5-11 Velikost přidržované síly čtvrtiny systému v závislosti na velikosti vzduchové mezery ..	47
Obr 5-12 Technická dokumentace poloviny systému	48
Obr 5-13 Schéma magnetického obvodu poloviny	49
Obr 5-14 Zjednodušené schéma poloviny magnetického obvodu	50
Obr 5-15 Vypočtená závislost přídržné síly poloviny systému na velikosti vzduchové mezery	56
Obr 5-16 Vytváření modelu poloviny	56

Obr 5-17 Zobrazení toku magnetické indukce a směru toku při postupném oddalování obrobku v polovičním provedení: a) 0,1 mm , b) 0,2 mm , c) 0,3 mm , d) 0,4 mm , e) 0,5 mm , f) legenda intenzity magnetické indukce B	58
Obr 5-18 Zobrazení absolutní hodnoty magnetického toku ve vzduchové mezeře poloviny systému ve vzdálenosti 0,5 mm.....	58
Obr 5-19 Velikost přidržované síly poloviny systému v závislosti na velikosti vzduchové mezery	59
Obr 5-20 Zobrazení toku magnetické indukce a směru magnetického toku při otočené polaritě AlNiCo magnetu (odpínací verze) : a) 0,1 mm , b) 0,5 mm , c) legenda magnetické indukce B.....	60
Obr 5-21 Zobrazení absolutní hodnoty magnetického toku ve vzduchové mezeře poloviny systému ve vzdálenosti 0,5 mm při otočené polaritě AlNiCo magnetu	61
Obr 5-22 Velikost přidržované síly poloviny systému při otočeném AlNiCo magnetu v závislosti na velikosti vzduchové mezery.....	62
Obr 5-23 Technická dokumentace celkového magnetického obvodu.....	63
Obr 5-24 Schéma magnetického obvodu celku	64
Obr 5-25 Zjednodušené schéma magnetického obvodu celku.....	66
Obr 5-26 Vypočtená závislost přídržné síly celého systému na velikosti vzduchové mezery	71
Obr 5-27 Vytvoření celkového modelu v programu FEMM.....	72
Obr 5-28 Zobrazení toku magnetické indukce a směru toku při postupném oddalování obrobku ve finálním (celkovém) provedení: a) 0,1 mm , b) 0,3 mm , c) 0,5 mm , d) legenda magnetické indukce B	73
Obr 5-29 Zobrazení absolutní hodnoty magnetického toku ve vzduchové mezeře celého systému ve vzdálenosti 0,5 mm	74
Obr 5-30 Velikost přidržované síly celého systému v závislosti na velikosti vzduchové mezery ...	75
Obr 5-31 Zobrazení magnetické indukce při otočené polaritě AlNiCo magnetu a oddalování obrobku : a) 0,1 mm , b) 0,5 mm , c) legenda intenzity magnetické indukce B.....	76
Obr 5-32 Zobrazení absolutní hodnoty magnetického toku ve vzduchové mezeře celého systému při otočené polaritě AlNiCo magnetu ve vzdálenosti 0,5 mm.....	77
Obr 5-33 Velikost přidržované síly celého systému při otočené polaritě AlNiCo magnetu v závislosti na velikosti vzduchové mezery.....	78
Obr 5-34 Zobrazení magnetické indukce systému, při průchodu proudem elektromagnetem : a) 10 A , b) 50 A , c) 100A , d) legenda magnetické indukce B	81
Obr 5-35 Velikost přídržné síly v závislosti na velikosti proudu elektromagnetu.....	82
Obr 5-36 Praktický model navrženého segmentu upínacího systému.....	83
Obr 5-37 a) Použitý kondenzátor , b) Průběh napájení vytvořeného upínacího systému.....	84
Obr 5-38 Měření upínací síly	85
Obr 5-39 Porovnání výsledných sil získaných z FEMMu metodou konečných prvků pro všechny uvažované případy.....	87

Obr 5-40 Porovnání výsledných sil získaných numerickým výpočtem pro všechny uvažované případy.....	88
Obr 5-41 Porovnání magnetického toku čtvrtiny systému	89
Obr 5-42 Porovnání magnetické indukce čtvrtiny systému.....	89
Obr 5-43 Porovnání přídržné síly pro čtvrtinu systému.....	90
Obr 5-44 Porovnání magnetické indukce B v polovině systému při lineárních charakteristikách použitých materiálů	91
Obr 5-45 Porovnání magnetické indukce B v polovině systému při nelineárních charakteristikách použitých materiálů	91
Obr 5-46 Porovnání výsledných sil v polovině systému.....	92
Obr 5-47 Porovnání výsledných sil v polovině systému pro pracovní a odepínací verzi.....	92
Obr 5-48 Porovnání magnetické indukce B celého systému při lineárních charakteristikách použitých materiálů	93
Obr 5-49 Porovnání magnetické indukce B celého systému při nelineárních charakteristikách použitých materiálů	93
Obr 5-50 Porovnání výsledných sil v celkovém systému.....	94
Obr 5-51 Porovnání výsledných sil v celkovém systému pro pracovní a odepínací verzi	94

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 4-1 Relativní permeabilita některých nemagnetických látek, převzato z [1]</i>	26
<i>Tab. 5-1 Tabulka vypočtených hodnot pro čtvrtinu systému</i>	43
<i>Tab. 5-2 Výsledné hodnoty čtvrtiny systému vypočítané metodou konečných prvků programem FEMM</i>	47
<i>Tab. 5-3 Tabulka vypočtených hodnot pro polovinu systému</i>	55
<i>Tab. 5-4 Výsledné hodnoty poloviny systému vypočítané metodou konečných prvků programem FEMM</i>	59
<i>Tab. 5-5 Výsledné hodnoty poloviny systému při otočené polaritě AlNiCo magnetu vypočítané metodou konečných prvků programem FEMM</i>	61
<i>Tab. 5-6 Tabulka vypočtených hodnot celého systému</i>	71
<i>Tab. 5-7 Výsledné hodnoty celého systému vypočítané metodou konečných prvků programem FEMM</i>	74
<i>Tab. 5-8 Výsledné hodnoty celého systému při otočené polaritě AlNiCo magnetu vypočítané metodou konečných prvků programem FEMM</i>	77
<i>Tab. 5-9 Výsledná síla působící na upínaný obrobek za působení elektromagnetu</i>	81
<i>Tab. 5-10 Naměřené hodnoty pro pracovní verzi</i>	86
<i>Tab. 5-11 Naměřené hodnoty pro odpínací verzi</i>	86
<i>Tab. 5-12 Porovnání všech hodnot vypočtených a získaných z modelu pro vzduchovou mezeru $x = 0,5$ mm</i>	87

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$(NI)_{ekviv}$	A · závit	Ekvivalent magnetického napětí elektromagnetu
B_r	T	Remanentní indukce
H_c	A · m ⁻¹	Koercitivní intenzita magnetického pole
H_s	A · m ⁻¹	Intenzita nasycení
R, R_m	H ⁻¹	Reluktance, Magnetický odpor permanentního magnetu
T_c	°C	Curieova teplota
U_m	A	Magnetické napětí
W_{PM}	J	Energie magnetu
λ_m	H	Magnetická vodivost
B	T	Magnetická indukce
F	N	Síla
H	A · m ⁻¹	Intenzita magnetického pole
U	V	Elektrické napětí
I	A	Elektrický proud
L	H	Indukčnost cívky
l	m	Délka
m	A · m ²	Orbitální magnetický moment
N	-	Počet závitů
S	m ²	Průřez
V	m ³	Objem
t	s	čas
W	J	Energie
W_{ko}	J	Koenergie
δ_v	mm	Hloubka vniku magnetického pole
μ, μ_0, μ_r	H/m	Permeabilita, permeabilita vakua, materiálu
ρ	$\Omega \cdot m^2 \cdot m^{-1}$	Měrný odpor
ϕ	Wb	Magnetický tok

ϕ_s	Wb	Smyčkový magnetický tok
ω	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	Úhlová rychlost
Ψ	Wb · závit	Spřažený tok
r	mm^2	Poloměr
r_{elmag}	mm^2	Poloměr elektromagnetu
ρ_{Cu}	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	Resistivita mědi
Q_t	$\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$	Teplo potřebné pro tavení
J	$\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$	Proudová hustota
k_p		Činitel plnění
B_{PM}	T	Velikost magnetické indukce permanentního magnetu v jeho pracovním bodě
H_{PM}	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	Velikost intenzity magnetického pole permanentního magnetu v jeho pracovním bodě
U_{m1}, U_{m2}, U_{m3}	A	Magnetické napětí
μ_{rN}	H/m	Permeabilita neodymového magnetu
μ_{rA}	H/m	Permeabilita AlNiCo magnetu
μ_{ro}	H/m	Permeabilita ocelového jádra
δ, x	mm	Šířka vzduchové mezery
l_s	mm	Délka střední siločáry středu
l_k	mm	Délka střední siločáry kraje
l_o	mm	Délka střední siločáry obrobku
l_p	mm	Délka střední siločáry prostředního sloupku
l_f	mm	Délka střední siločáry feromagnetického jádra
l_{PM}	mm	Délka permanentního magnetu
l_{PMN}	mm	Délka neodymového magnetu
l_{PMA}	mm	Délka AlNiCo magnetu
D	mm	Hloubka magnetického systému
a, b, c, d, e	mm	Rozměry
R_{rn}	H^{-1}	Reluktance neodymového magnetu
R_{ra}	H^{-1}	Reluktance AlNiCo magnetu

$R_{\delta}, R_{\delta 2}$	H^{-1}	Reluktance vzduchové mezery
R_s	H^{-1}	Reluktance středu oceli
R_k	H^{-1}	Reluktance kraje oceli
R_o	H^{-1}	Reluktance obrobku
R_p	H^{-1}	Reluktance prostředního sloupku
R_f	H^{-1}	Reluktance feromagnetického jádra
$R_1 - R_8$	H^{-1}	Reluktance mezivýpočtů
Δ		Determinant
EMU		Elektromagnetický upínací systém
$EPMU$		Elektro-permanentní upínací systém
PMU		Permanentní magnetický upínací systém
MSP		Metoda smyčkových proudů
MKP		Metoda konečných prvků

1 ÚVOD

V dnešní strojírenské výrobě jsou na zvyšování produktivity práce kladeny neustále vyšší požadavky. U všech možností a způsobů obrábění je nutné bezpečně a spolehlivě upnout obrobek. Upnutí se provádí pneumatickými, hydraulickými či mechanickými upínači. Tyto způsoby upínání jsou však velmi manuálně i časově náročné. Z tohoto důvodu byl kladen důraz na vymyšlení metody, která sníží dobu nutnou k upnutí obrobku nebo upnutí více obrobků zároveň. Proto byly vyvinuty magnetické upínací systémy, sloužící k upnutí feromagnetických obrobků nebo při manipulaci s feromagnetickým materiálem jako přídržná nebo nosná zařízení. [6]

1.1 Magnetické upínací systémy

Využívají magnetické pole k vytvoření upínací síly, vznikající v permanentních magnetech nebo účinkem stejnosměrného proudu procházejícího závity cívky. Upnutí obrobku dosáhneme přiložením na upínací desku tak, aby překrýval minimálně jeden severní a jeden jižní pól. Magnetické siločáry se uzavrou přes přídržovaný předmět a vzniknou silové účinky magnetického pole, jež se projeví přídržnou silou kolmou k upínacímu povrchu. Smyková síla zabráňující obrobku pohyb do stran dosahuje 20-30 % přídržné síly. Magnetické přídržné systémy mají výhodu kontaktu s obrobkem pouze z jedné strany, čímž dosáhneme možnosti opracovatelnosti z pěti stran. Protože je obrobek plošně podepřen, nedochází k deformaci dílce upínacími silami nebo vibracím, vznikajícím při obráběcím procesu. Mají nízkou energetickou náročnost a lze je snadno zařadit do automatizovaných procesních cyklů.

Abychom dosáhli dobré přídržné síly, je potřeba obrobkem překrýt co nejvíce pólových dvojic, které zajistí rovnoměrné rozdělení upínací síly. Z tohoto důvodu se kromě radiální či paralelní koncepce pólů využívá uspořádání pólů do čtvercového nebo hexagonálního uspořádání. Touto koncepcí dosáhneme vyšší hustoty rozložení pólů na pólové desce. Upínaný obrobek musí být z materiálu s dostatečnou magnetickou vodivostí. Nejvhodnějšími materiály pro upínání jsou nízkouhlíkové oceli. U materiálů nebo slitin s vyšším obsahem uhlíku se dosahuje přibližně jen 45% upínací síly. Nemagnetické prvky obsažené třeba ve vysoce legovaných ocelích, snižují přídržnou sílu ještě více. Tyto nevýhody se dají alespoň částečně eliminovat použitím kvalitních magnetů v upínacím systému nebo obložení obrobku pláty z nízkouhlíkové oceli, která podpoří větší průchod siločar skrz uchycovaný materiál. Důležitým parametrem pro kvalitní přichycení je zajištění plošného kontaktu obrobku s upínačem. Rez nebo nerovnosti materiálu způsobují totiž vzduchové mezery, které brání průchodu magnetických siločar, a tedy snižují účinnost uchycení. Se zvětšující se vzduchovou mezerou strmě klesá přídržná síla systému. Pro potřebnou účinnost upnutí různě širokých obrobků, volíme velikost rozteče pólů pro tenké obrobky zhruba 5 mm a pro široké cca 50 mm. Magnetické pole zasahuje do hloubky obrobku zhruba rovné polovině vzdálenosti pólů. Použitím různě velkých pólů magnetů zajistíme rovnoměrné rozložení a soustředění magnetických siločar v obrobku, čímž dosáhneme větší účinnosti systému.

Celý systém permanentních magnetů a cívek je chráněn pólovou deskou. Je vytvořena z materiálu schopného dobře vést magnetické siločáry a z nemagnetických dělicích spár

vytvářející adhezni plochu upínače rozdělenou na severní a jižní póly. Pokud není upínací plocha obrobku rovná, lze použít výškově nastavitelné pólové nástavce, které se dají přidělat na libovolné čtvercové nebo jiné póly upínacího systému. Vyrůstající teplota magnetů snižuje již při 50 °C až na 50 % původní hodnoty upínací síly měřené za nominálních podmínek při 20 °C.

K odstranění zbytkového magnetismu uvolněného obrobku, a někdy i k samotnému uvolnění upnutého obrobku, je nutno provést demagnetizaci. K demagnetizaci dojde přepólováním, tedy průchodem střídavým magnetickým polem nebo vytvořením demagnetizačního pole, přizpůsobenému zbytkovému magnetismu obrobku. [4]

Magnetické systémy mají široké spektrum využití v průmyslu i v běžném životě. Univerzální upínání drobných, tenkých i velkých dílů, různě drsných nebo nerovných povrchů nachází široké využití. Magnetické systémy se dají použít ať už pro upínání, obrábění, frézování, vrtání, lisování, drcení, hoblování, šrotování, zvedání těžkých břemen nebo k oddělování kovového odpadu od nekovových a dalšímu využití. [5]

1.2 Historie

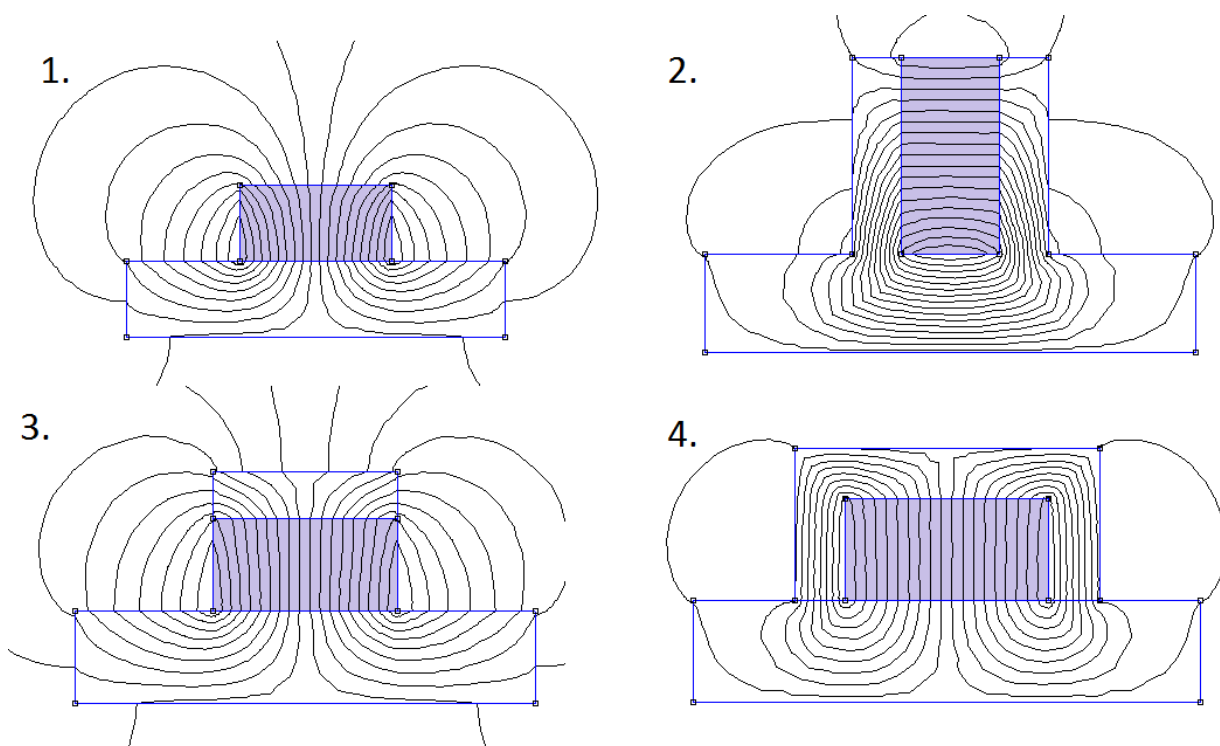
Počátky magnetického upínání se objevily v roce 1896 v kovoobrábění, kdy byl pro broušení patentován první elektromagnetický upínač. Postupem času byl vynalezen magnetický upínač s permanentními magnety (patent z roku 1943) a elektro-permanentní upínač (z roku 1960). První magnetické upínače byly určeny pro upínání při broušení. Od té doby se rozšířilo jejich používání i do jiných odvětví strojírenství a dalších oborů, jako např. vrtání rovnoběžně s plochou upínače, soustružení nebo frézování. Po uvedení účinnějších upínačů na trh, které mohly přenášet i dynamické zatížení, se začaly používat i v jiných oblastech obrábění. Díky pólovým nástavcům, podepírajících obrobek (různých tvarů), neleží materiál přímo na pólové desce. To otevřelo možnost na magnetickém upínači vrtat průchozí otvory do všech stran nebo frézovat hrany. [6]

2 MAGNETICKÉ SYSTÉMY

Permanentní magnet s navazujícím jedním nebo více nástavci (např. z magneticky měkkého železa) je již považován za magnetický systém. Tvarem a velikostí pólových nástavců i samotného permanentního magnetu je možné směřovat magnetický tok tak, aby vystupoval do okolního prostředí na požadovaných a předem určených místech kde nabývá optimálního účinku. Následující rozdělení magnetických systémů ukazuje, jak lze pomocí nástavců z magneticky měkkého železa zvýšit přídržnou resp. upínací sílu. [8]

Nejčastější typy magnetických systémů viz. *Obr 2-1*:

1. Tento magnetický obvod, který neobsahuje žádné přidavné nástavce z magneticky měkkého železa se nazývá otevřený magnetický obvod. Magnetický tok vystupuje rovnoměrně ze všech míst permanentního magnetu a není nijak soustředěn nebo odkláněn.
2. Permanentní magnet, na kterém je přiložen plát z magneticky měkkého železa. Magnetická vodivost přiloženého plátu je podstatně vyšší, jak magnetická vodivost vzduchu. V tom případě magnetický tok z části prostupuje magneticky měkkým železem.
3. Další je magnet se dvěma nástavci z magneticky měkkého železa přichycené z obou stran magnetu. Využívá se často při upínání feromagnetických objektů.
4. Tento takzvaný zvonovitý nebo hrníčkový typ magnetického systému se také často užívá v upínacích systémech. Je zde zřetelně vidět, že skoro všechen magnetický tok je veden magneticky měkkým železem do upínaného objektu. [8]



Obr 2-1 Typy magnetických systémů

2.1 základní veličiny a vztahy magnetického pole

Magnetické napětí

$$U_m = \int_l H \cdot dl = H \cdot l = N \cdot I \quad (2.1)$$

Magnetický tok

$$\phi = \iint_S B \cdot dS = B \cdot S \quad (2.2)$$

Magnetický odpor, reluktance

$$R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} \quad (2.3)$$

Magnetická vodivost

$$\lambda_m = \frac{I_m}{U_m} = \frac{B}{H} \cdot \frac{S}{l} = \mu \frac{S}{l} \quad (2.4)$$



Intenzita magnetického pole

$$H \quad (2.5)$$

Magnetická indukce

$$B = \mu \cdot H \quad (2.6)$$

Permeabilita

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = \frac{B}{H} \quad (2.7)$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad (2.8)$$

Indukčnost cívky

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\phi N}{I} \quad (2.9)$$

[2]

Základní zákony v magnetických obvodech:

Hopkinsonův zákon:

$$U_m = \phi \cdot R_m \quad (2.10)$$

1. Kirchhoffův zákon:

$$\sum U_m = 0 \quad (2.11)$$

2. Kirchhoffův zákon:

$$\sum \phi = 0 \quad (2.12)$$

[2]

Ampérův zákon:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (2.13)$$

[13]

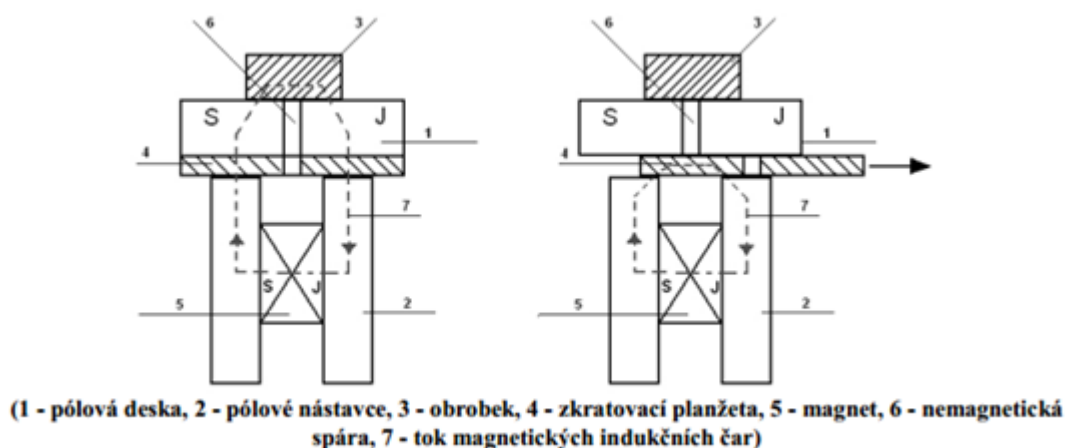
3 ROZDĚLENÍ MAGNETICKÝCH UPÍNACÍCH SYSTÉMŮ

Rozdělení podle principu a technologie provedení:

- s permanentními magnety
- s elektromagnety
- s elektro-permanentními moduly

3.1 Upínací systémy s permanentními magnety

Obvykle bývají spínány mechanicky přestavením nebo posuvem tzv. Zkratovací manžety. Tím se docílí uzavření magnetických siločar buď přes obrobek, nebo jen v jádře upínače. Permanentní magnetické upínače (PMU) jsou velmi jednoduché, bezúdržbové a nepotřebují žádný vnější zdroj energie. To zaručuje bezpečnost během práce. Změněná polarita magnetů buď přispívá k upínacím vlastnostem systému, anebo právě odkloní magnetický tok mimo obrobek a magnetický obvod se uzavře uvnitř vlastního systému. Systém je speciálně utěsněn, aby nedošlo ke vniknutí cizích materiálů nebo chladicí kapaliny do zařízení. Magnetizace zařízení je omezena maximálním magnetickým polem, které by mohlo demagnetizovat upínací systém. Proto se používají vysoce účinné permanentní magnety ze vzácných magnetických hornin (např. Samarium nebo neodym). [4]



Obr 3-1 Princip permanentního magnetického upínače, převzato z [6]

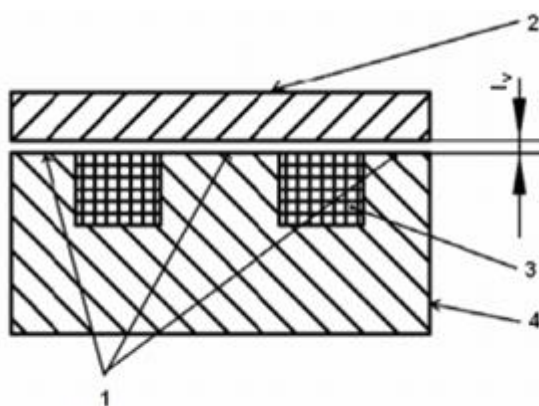
3.2 Upínací systémy elektromagnetické

Upínání pomocí elektromagnetu je nejstarší princip magnetického upínání. Přesto i dnes můžeme najít této technologii spousta aplikací. Elektromagnetický upínač (EMU) se v současné době značně využívá u rovinných brusek.

Cívka, kterou prochází stejnosměrný proud, vytváří kolem sebe magnetické pole, jehož intenzita je určena proudem a konstrukčním provedením cívky. Proto jsou vhodné k upínání větších

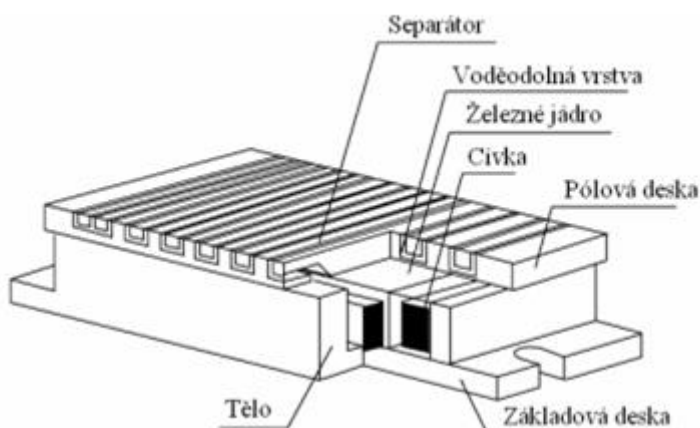
a nerovných dílů. Trvalý průchod proudu má hlavní nevýhodu v tom, že ohřívá obrobek i samotný upínací systém a tím vznikají nepřesnosti v obrábění. Protože magnetická síla je dána velikostí procházejícího proudu, lze je snadno řídit počítačem a jsou vhodné pro automatizované účely. Z důvodu bezpečnosti jsou elektromagnetické systémy vybaveny záložním zdrojem, který zajistí bezpečnost upnutí i při přerušení proudu do cívky.

Konstrukce elektromagnetických upínačů je tvořena budícím vinutím umístěným ve vaně z feromagnetického materiálu, které při přivedení elektrického proudu vytváří elektromagnetické pole. Mezi obráběným dílem a plochou upínače se vždy vytvoří určitá vzduchová mezera lv , která je dána drsností a nerovnostmi povrchu. Pro ochranu budící cívky (např. před vlhkostí) se obvykle magnetické systémy shora zakryjí pólovou deskou, která vytvoří vlastní adhezni plochu pro ochranu cívky viz. Obr 3-2 a Obr 3-3. [4], [6]



(1 – celková aktivní plocha pólů, 2 – obrobek, 3 – cívka, 4 – těleso upínače, lv – vzduchová mezera)

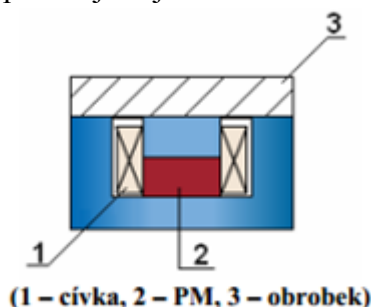
Obr 3-2 Základní modul elektromagnetického upínače, převzato z [6]



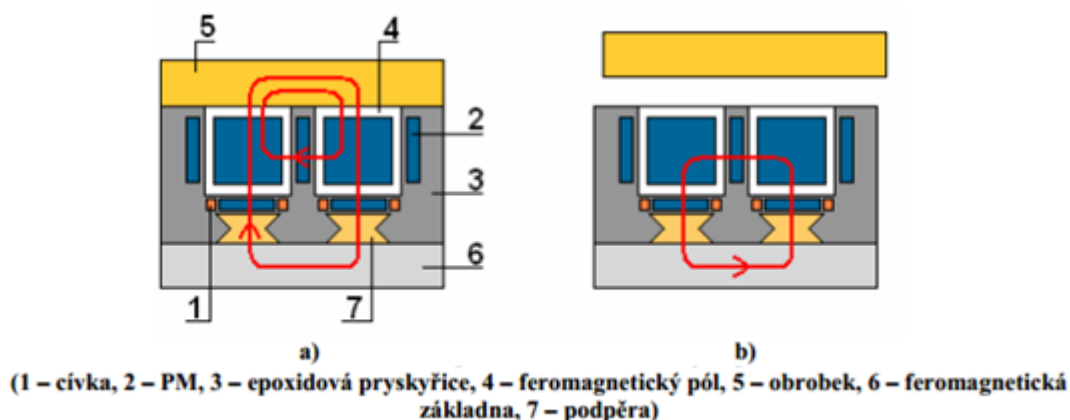
Obr 3-3 Elektromagnetický upínač s pólovou deskou, převzato z [6]

3.3 Upínací systémy elektro-permanentní

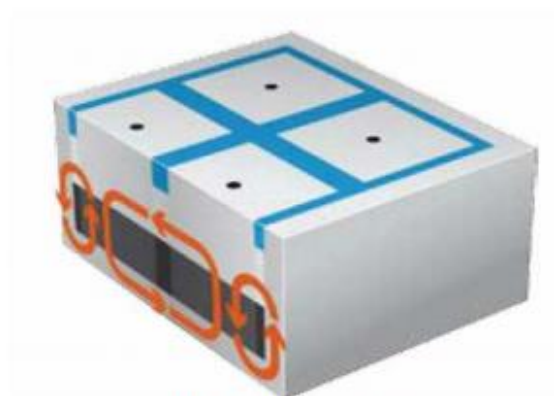
Elektro-permanentní magnetické upínací systémy spojují výhody obou předešlých typů a nabízí maximální flexibilitu při upínání feromagnetických obrobků. Vyznačují se velmi velkou upínací silou řádově stovky N na cm^2 . Je možné obrábění malých i velkých obrobků, různých tvarů i materiálů. Stačí sepnutí krátkým proudovým pulsem z regulátoru, kdy dojde k přemagnetování permanentního magnetu z feromagnetického materiálu, a obrobek je držen stálou magnetickou silou bez dalšího přívodu energie nebo připojení k regulátoru. Plné upínací síly dosahují přibližně 1 s po přivedení aktivačního pulzu. Bez stálého napájení nedochází k nežádoucímu ohřevu upínače a obrobku a homogenní magnetické pole zajišťuje nízkou vibraci při upnutí obrobku. [4] [6]



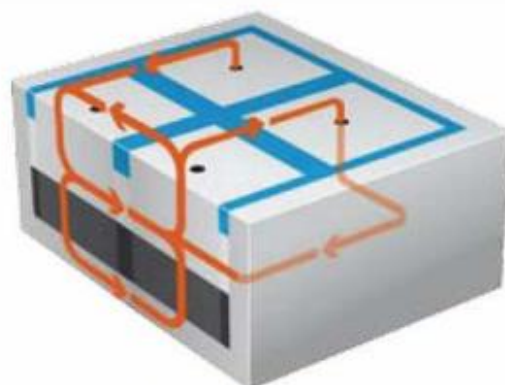
Obr 3-4 Základní schéma elektro-permanentního segmentu, převzato z [6]



Obr 3-6 Princip průmyslově užívaných elektro-permanentních upínačů, převzato z [6]

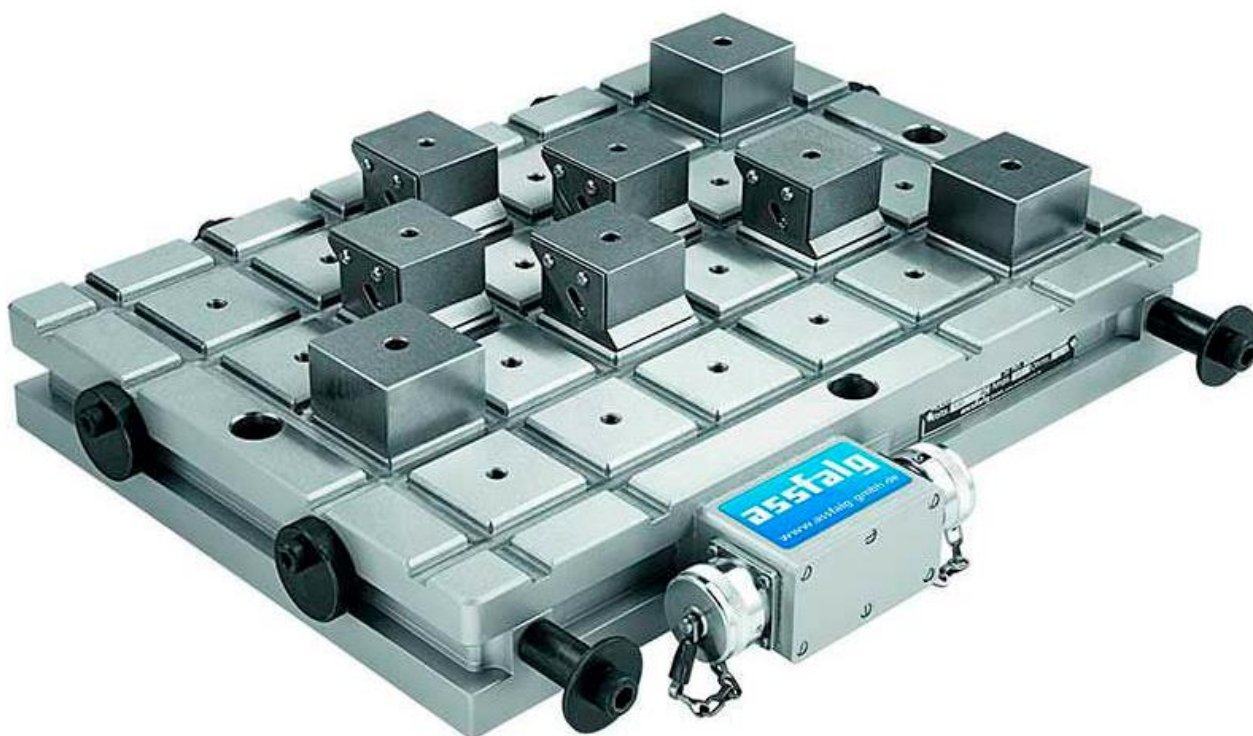


Obr. 15: Vypnutý stav



Obr. 16: Zapnutý stav

Obr 3-7 Princip průmyslově užívaných elektro-permanentních upínačů 2, převzato z [6]



Obr 3-8 Elektro-permanentní upínací systém s pólovými nástavci, převzato z [5]

4 TEORIE MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ

4.1 vlastnosti materiálů ovlivňující magnetické pole

Působí-li na magnetický materiál vnější magnetické pole o intenzitě H , dochází k interakci tohoto pole s materiálem. Tato interakce se projeví buď zeslabením, nebo zesílením magnetické indukce B v materiálu. Tato interakce se různých materiálů projeví rozdílnou velikostí. Mezi B a H platí vztah (2.6)-(2.8). Vlastnosti látek v magnetickém poli hodnotíme podle velikosti jejich relativní permeability μ_r . [1]

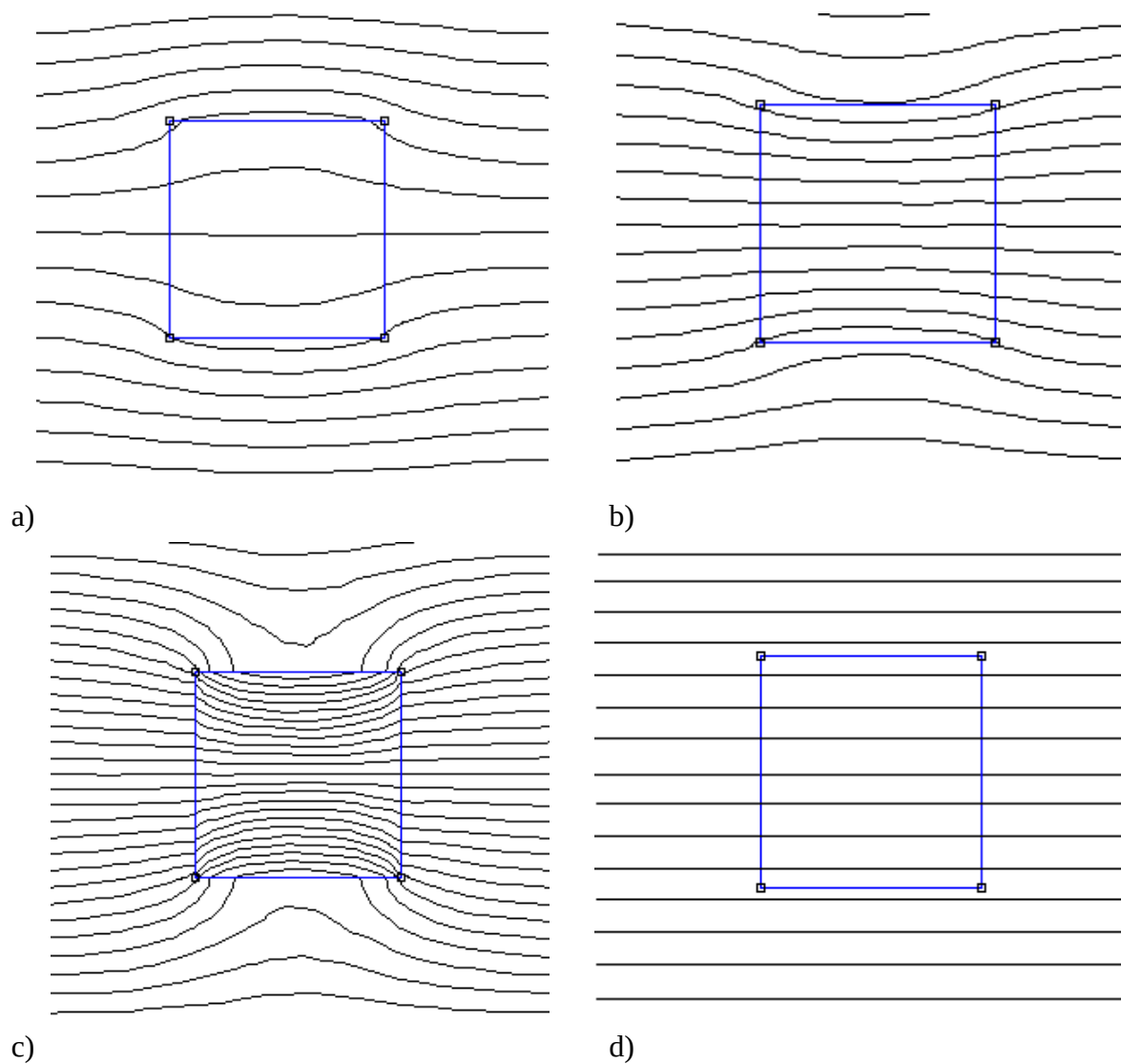
Podle vlastností materiálu ovlivňující magnetické pole rozlišujeme následující látky viz. Obr 5-1:

- Látky diamagnetické (diamagnetika) – permeabilita μ_r je trochu menší než jedna, tedy v magnetickém poli dochází jen k nepatrnému zeslabení magnetické indukce B .
- Látky paramagnetické (paramagnetika) – permeabilita μ_r je trochu větší než jedna, tedy v magnetickém poli dochází k nepatrnému zesílení magnetické indukce B .
- Látky feromagnetické (feromagnetika) – permeabilita μ_r je velmi vysoká ($\mu_r \gg 1$), tedy v magnetickém poli dochází k výraznému zvýšení magnetické indukce B .

V Tab. 4-1 je uveden příklad několika diamagnetických a paramagnetických látek a jejich permeability. Podrobněji se budeme zabývat pouze feromagnetiky a to v následujících kapitolách.

Diamagnetika	μ_r	Paramagnetika	μ_r
vismut	0,999 82	mangan	1,001 00
uhlík	0,999 90	chrom	1,000 33
olovo	0,999 98	hliník	1,000 02
měď	0,999 99	vzduch	1,000 00
voda	0,999 99	platina	1,000 25

Tab. 4-1 Relativní permeabilita některých nemagnetických látek, převzato z [1]



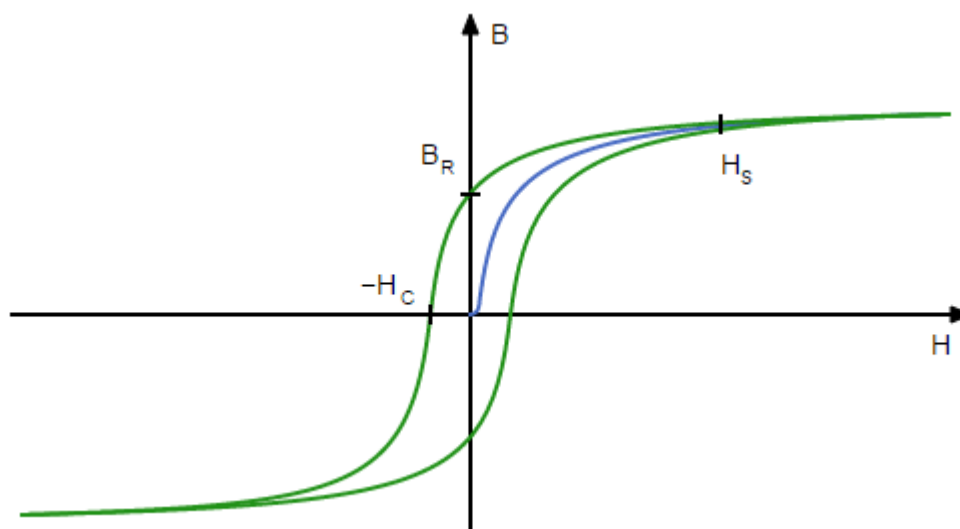
Obr 4-1 Typy materiálů ovlivňující magnetické pole : a) diamagnetikum , b) paramagnetikum , c) feromagnetikum , d) vakuum

4.2 magnetické vlastnosti feromagnetika

Feromagnetické látky mohou dosáhnout svým magnetickým polem o poměrně malé intenzitě H vysoké magnetické indukce B . Touto vlastností jsou nepostradatelným materiálem pro konstrukci mnoha elektrotechnických zařízení, např. elektromagnetů, elektrických strojů, atd.

Mezi charakteristické vlastnosti feromagnetik patří:

- Feromagnetika jsou magneticky nelineární, protože permeabilita μ je funkcí magnetické intenzity H , $\mu = \mu(H)$
 - Feromagnetika si uchovávají vysokou hodnotu magnetické indukce B i po odstranění vnějšího magnetického pole (permanentní magnety)
 - Magnetická indukce B není závislá pouze na intenzitě H . Svou roli hraje také předchozí stav feromagnetika, přičemž vzniká jev nazývaný se magnetická hystereze.
 - Feromagnetikum při zvyšující se teplotě postupně ztrácí své charakteristické vlastnosti. Curieova teplota přeměny feromagnetikum do stavu paramagnetického. Curieova teplota u železa je 769°C , u kobaltu 1120°C , u niklu 360°C atd. Pokud teplota klesne pod hodnotu Curieovy teploty, materiálu se vrátí jeho feromagnetické vlastnosti.
 - Magnetizační křivka působí pohyb pracovního bodu na B - H diagramu s rostoucí intenzitou H . Je to závislost $B=B(H)$.
 - S rostoucí intenzitou H , permeabilita μ roste až po své maximum H_s a následně klesá ke své asymptotě μ_0 .
 - Hysterezní smyčka nastává po dosažení pracovního bodu (H , B) na magnetizační křivce. Při snižování magnetické intenzity H se bude pracovní bod pohybovat po křivce jiné, která závisí na množství zpolarizovaných magnetických domén ve feromagnetiku. Tedy není magnetický stav jednoznačně určen intenzitou H , ale i záleží na předchozím stavu feromagnetika.
 - Při působení kmitavé intenzity H nízké velikosti na feromagnetikum vzniká malá hysterezní smyčka. Pohyb pracovního bodu po hysterezní smyčce je nevratný, zatímco jeho pohyb po malé hysterezní smyčce je vratný. Malou hysterezní smyčku často nahrazujeme úsečkou.
 - Remanentní magnetická indukce B_r . Je to zbytek magnetismu v magnetickém materiálu, které zůstane ve feromagnetickém materiálu po vymizení dříve působícího vnějšího magnetického pole.
 - Koercitivita H_c je síla potřebná k odmagnetování materiálu tedy ke zrušení remanentní indukce B_r . Čím je koercitivita větší, tím je materiál tzv. magneticky tvrdší. Hraniční hodnota mezi magneticky měkkým a tvrdým materiálem je 1 kA/m .
 - Intenzita nasycení H_s určuje maximální hodnotu magnetické indukce materiálu. Zvýšením intenzity magnetické indukce nad tuto hodnotu již nezvýšíme. Dojde k nasycení materiálu a od této chvíle pokračuje magnetizační křivka jako rovnoběžka s osou x
- [1], [2], [7], [8]



Obr 4-2 Hysterezní smyčka, převzato z [10]

4.3 Magneticky tvrdé a měkké materiály

Tvar hysterezní smyčky závisí na tepelném a mechanickém zpracování feromagnetika a na jeho chemickém složení. [1]

4.3.1 Magneticky měkká feromagnetika

Jsou vyznačovány malou plochou a úzkou hysterezní smyčkou a strmou magnetizační křivkou. Mají velkou permeabilitu a malou koercivitu H_c . Někdy u nich zanedbáváme hysterezi, tedy uvažujeme magnetizační křivku. Magneticky měkké materiály se často používají pro výrobu střídavých magnetických obvodů. [1]

- Technicky čisté železo (např. železo armco)
 - Nízkouhlíkové ocele obsahující cca 0,04% C.
 - Použití: stejnosměrné elektromagnety, pólové nástavce stejnosměrných strojů, atd.
- Křemíkové ocele
 - Obsahují 0,8 až 4,5% Si
 - Mají nízkou konduktivitu, tedy nízké ztráty vířivými proudy
 - Použití: transformátorové a dynamové plechy
- Vysokopecní slitiny (např. permalloy, perminvar, alisfer)
 - Nej kvalitnější magneticky měkké materiály
 - Použití: vf transformátory, stínící kryty

4.3.2 Magneticky tvrdá feromagnetika

Jsou vyznačovány širokou hysterezní smyčkou velkého obsahu a malou strmostí magnetizační křivky. Mají malou permeabilitu a velkou koercivitu H_c . Magneticky tvrdé feromagnetika se používají pro výrobu permanentních magnetů. Bylo objeveno množství magnetických materiálů, lišících se nejen svými magnetickými vlastnostmi, ale také mechanickými vlastnostmi, konduktivitou, a ekonomickými parametry (dostupností surovin, opracovatelností, cenou, atd.) [1]

- Uhlíkové ocele (např. alni, alnico)
 - Obsahují cca 1,5% C
 - Zdokonaleny wolframem, chromem, kobaltem nebo zakalené.
 - Později výhodnější slitiny železa, niklu a hliníku, případně kobaltem, mědi či titanu
 - Nevýhody: mechanická tvrdost, křehkost, obtížná opracovatelnost
- Tvrdé ferity (např. $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$)
 - Obsahují 80% oxidu železa a asi 20% oxidu baria BaO nebo stroncia SrO
 - Tyto materiály jsou levné a spolehlivé
 - Použití: v automatizační, řídicí a měřicí technice
- Magnety ze vzácných zemin
 - Na bázi samarium-kobalt (SmCo_5 a $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) nebo neodým-železo-bór ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)
 - Výroba práškovou metalurgií – lisováním a následným spékáním
 - V současnosti nejvýkonnější permanentní magnety
 - Použití: v silnoproudé, počítačové a řídicí technice a u elektroakustických zařízení.

4.4 Mikrostruktura magnetické polarizace

Po vložení magnetického materiálu do magnetického pole, dochází k interakci mezi látkou a polem, jež nazýváme magnetickou polarizací materiálu. Působení magnetické intenzity H na rozdílné magnetické materiály mění velikost působící magnetické indukce B . Působením magnetické intenzity H na feromagnetika se magnetická indukce B výrazně zvýší. Při působení na paramagnetika se zesílí jen nevýrazně a při působení na diamagnetika dojde k nepatrnému poklesu vektoru B . [1]

Maxwellovy teorie elektromagnetického pole jsou teorie makroskopické, v mikrostrukturách tedy nefungují. Procesy probíhající v mikrostruktuře magnetika za působení vnějšího magnetického pole jsou následující. Obíhající Elektron kolem svého atomového jádra určitou rychlostí a vytváří ve svém okolí malé magnetické pole. Vzniklý model generace magnetického pole označíme jako elementární magnetický dipól. Můžeme ho označovat jako orbitální magnetický moment:

$$dm = I \cdot dS \quad (4.1)$$

Kde dS je obsah plochy ohraničené kruhovou dráhou elektronu, tedy elektrickým proudem I . Jestli atom má více elektronů obíhajících kolem jádra, uvažujeme, že vektorovým součtem všech orbitálních magnetických momentů dostaneme výsledný magnetický moment. Včetně orbitálního pohybu se elektron také otáčí kolem vlastní osy (tzv. Spin elektronu), který vytváří další magnetické pole charakteristické spinovým magnetickým momentem. Stejně jako magnetické pole se vektorově dá sečíst i orbitální a spinový magnetický moment. Tyto magnetické momenty se neprojevují v makroskopickém měřítku, neboť jsou náhodně uspořádány a navzájem se vyrušují. V každé skupině magnetických materiálů nastávají odlišné procesy za působení vnějšího magnetického pole v mikrostrukturách materiálů. [1]

4.4.1 Diamagnetika

Magnetické momenty způsobené spinem elektronů a oběhem kolem jádra atomu se navzájem u mnoha materiálů navzájem vyruší. Vzájemné působení magnetických momentů proti sobě způsobuje rozkmit elektronů při oběhu kolem jádra (Larmorova rotace). Diamagnetismus nezávisí na teplotě a je vlastností všech látek. [1]

4.4.2 Paramagnetika

U skupiny látek, u kterých se nevyruší oba magnetické momenty dostatečně, při působení vnějšího magnetického pole dochází k orientaci zbylých momentů. Magnetický materiál se zpolarizuje stejným směrem jako působící vnější magnetické pole. S klesající teplotou ubývají i paramagnetické vlastnosti materiálu. [1]

4.4.3 Feromagnetika

Významné postavení mezi magnetickými materiály mají zejména železo, nikl, kobalt a jejich slitiny. Hlavní význam a užití nachází zejména v praktických aplikacích. Velké magnetické polarizace lze u feromagnetik dosáhnout i malým působením magnetického pole. Sousedící atomy natočené souhlasně se stejným směrem působícího pole mají tendenci navzájem se seskupovat do oblasti spontánní magnetizace (Weissových domén). Magnetické momenty uvnitř těchto domén jsou navzájem rovnoběžné a společně po vektorovém součtu nabývají vysoké hodnoty magnetického pole. Výsledný vektor každé domény bývá orientován směrem snadné magnetizace, tedy tam, kde je energeticky výhodné být orientován v krystalografických směrech. Bez síly vnějšího magnetického pole jednotlivé oblasti nejsou souhlasně uspořádány a celkový magnetický moment materiálu je nulový. Hlavní vlastností feromagnetik jsou zbytkové magnetické momenty atomů, které se následně lehce souhlasně spontánně uspořádají zpět. [1]

4.5 Magnetizace

Magnetizace je proces zmagnetování dosud nemagnetické nebo slabě magnetické látky působením vnějšího magnetického pole, jehož intenzita H má být např. u tvrdých feritů nejméně trojnásobkem koercitivní intenzity magnetického pole H_c daného materiálu.

Magnetovací čas potřebný ke zmagetování materiálu může být velmi krátký např. impuls kratší než 1 milisekunda [8]

4.6 Demagnetizace

Demagnetizátory slouží k odstranění zbylé magnetické remanence, která zůstává v materiálu i po sejmutí obrobku z upínacího zařízení. Demagnetizace se tedy dělí do dvou kroků. První umožní sejmutí obrobku z upínače a v druhém kroku se zbaví materiál zbytkového remanentního magnetizmu.

V prvním kroku se provede pro sejmutí obrobku z pólové desky pro EPMU nebo EMU proudový impuls opačné polaroty vzhledem k budicímu proudu a vhodné intenzity. Po tomto kroku zůstane v materiálu remanentní indukce. Moderní EPMU řízené mikroprocesory umí provést kvalitní demagnetizační cykly.

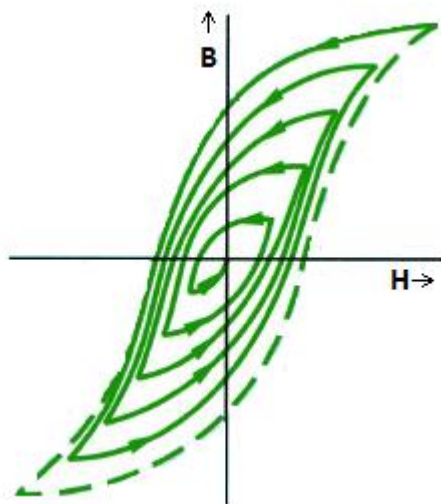
Druhý krok se dělí na stejnosměrnou a střídavou metodu. Při stejnosměrné demagnetizaci jde o jednorázové přepólování magnetického pole opačným proudem. Nejčastěji se však pro kvalitní odmagnetování používá střídavá metoda demagnetizace. Zmagetovaný předmět se vloží do dutiny cívky, do které se přivádí střídavý proud tzv. Tunelový typ. Tato metoda se často využívá pro demagnetizaci v automatizovaných provozech s dopravníkovým pásem nebo samospádem po nakloněné plošině.

Obrobky propadávají dutinou cívky a snižuje se hodnota jejich magnetické remanence. Dutina cívky je vystavena střídavému magnetickému poli, jehož amplituda dosahuje nejméně hodnoty remanentní indukce B_r v obrobku. Demagnetizátory pracující na síťové frekvenci jsou účinné jen u tenkých předmětů. Vlivem skinefektu se dostane střídavé pole pod povrch materiálu pouze do určité hloubky δ . Ta závisí na frekvenci magnetického pole, vodivosti a permeabilitě. U oceli je dosahovaná hloubka cca 0,1 až 1 mm. Pro větší efektivitu demagnetizace se vytvářejí magnetické pole buzené frekvenci kolem 10 Hz. Konečná remanentní indukce je po procesu demagnetizace přibližně $B_r \leq 1$ mT. Hloubka vniku střídavého magnetického pole se s klesající frekvencí zmenšuje. [6]

Určí se dle vztahu:

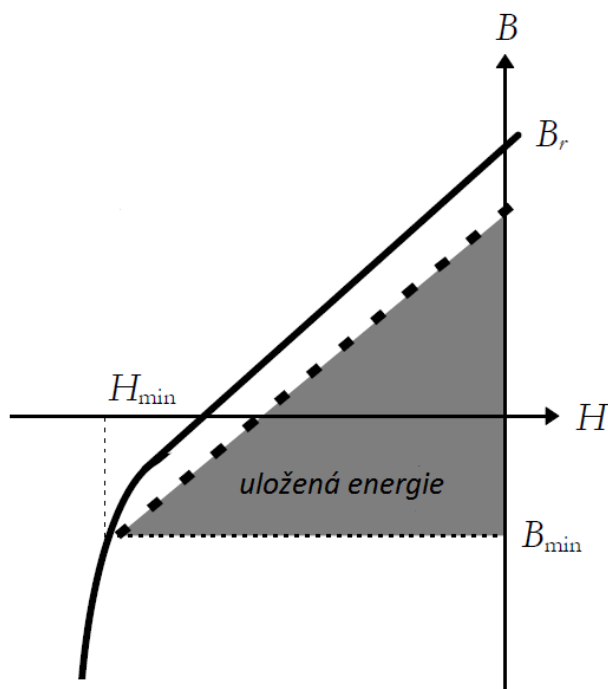
$$\delta_v = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (4.2)$$

kde : δ_v - hloubka vniku, ρ - měrný odpor materiálu, ω - úhlový kmitočet,
 μ - permeabilita



Obr 4-3 Princip odmagnetování v zmenšujícím se střídavém magnetickém poli, převzato z [10]

Při překročení koercitivní intenzity magnetického pole H_c se i po odeznění působící síly proti permanentnímu magnetu, magnet trvale demagnetizuje a vrací se zpět na novou hodnotu remanentní indukce B_r po své nové hysterézní křivce (čárkovaná) viz. Obr 4-4.

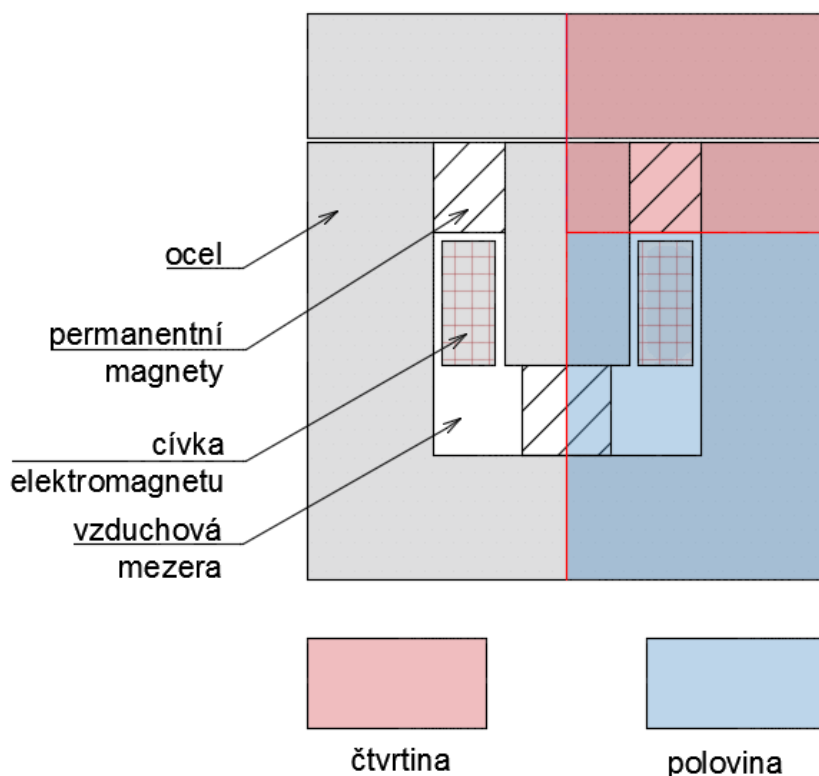


Obr 4-4 Demagnetizace permanentního magnetu, převzato z [13]

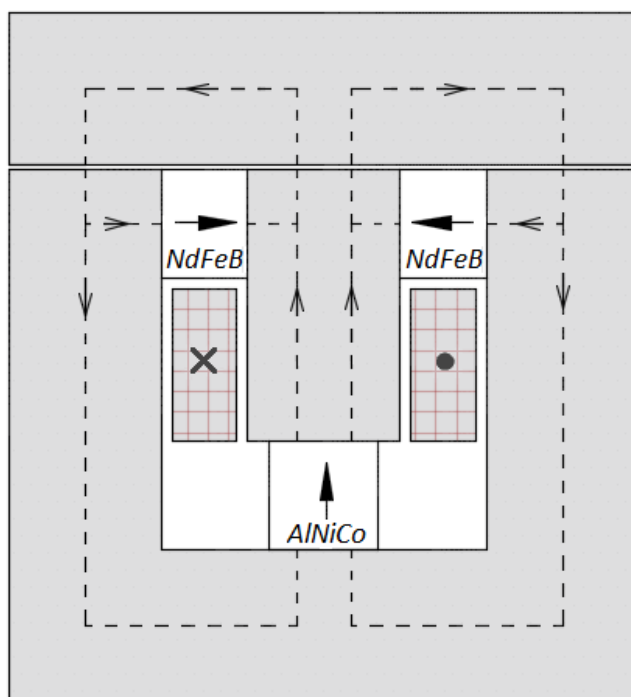
5 VLASTNÍ NÁVRH A ŘEŠENÍ

Pro numerické i analytické řešení daného elektropermanentního upínacího systému bylo zvoleno řešení postupným zjednodušováním na tři menší části viz. *Obr 5-1*. Následné porovnání výsledků dílčích částí bude použito pro zhodnocení výpočetních metod a rozdílů mezi numerickým a analytickým řešením. V první části bude zahrnuta pouze čtvrtina upínače, tedy jeden nedýmový permanentní magnet působící na kotvu. V druhé části bude již polovina upínače s magnetem AlNiCo. Zde již bude uvažováno i působení obou magnetů navzájem a na přidržovanou kotvu. V prvních dvou částech je uvažována dvojnásobná šířka ocelového jádra i celého modelu z důvodu překlopení zrcadlového obrazu na jednu počítanou polovinu. Tím pádem by měla být výsledná síla, působící na přitahovanou kotvu, všech tří dílčích částí téměř stejná. V třetí části je uvažován celkový výsledný analytický model elektromagnetického upínače se stejnými rozměry i parametry jako experimentální vyrobený model. Na závěr bude spočtena energie a elektrický proud potřebný pro změnu polarizace permanentního magnetu, velikost a parametry cívky elektromagnetu a další parametry napájecího elektrického obvodu.

Model upínacího systému byl prováděn v programu FEMM (Finite Element Method Magnetism). Je to sada programů vytvořena pro řešení nízkofrekvenčních elektromagnetických problémů v plošných, dvourozměrných souřadnicích. Program dokáže řešit lineární i nelineární magnetostatické problémy, lineární i nelineární časově harmonické magnetické problémy, lineární elektrostatické problémy a problémy v rovnovážném stavu tepelného toku. [9]



Obr 5-1 Rozdělení celkového modelu na dílčí části



Obr 5-2 Naznačení orientace polarity permanentních magnetů

5.1 Čtvrtina obvodu

5.1.1 Numerický výpočet

Navrhne si náhradní schéma, kde nahradíme permanentní magnet jeho magnetickou reluktancí s lineární charakteristikou R_{rn} a ekvivalentem elektromagnetu $(NI)_{ekviv}$ s ampérzávity.

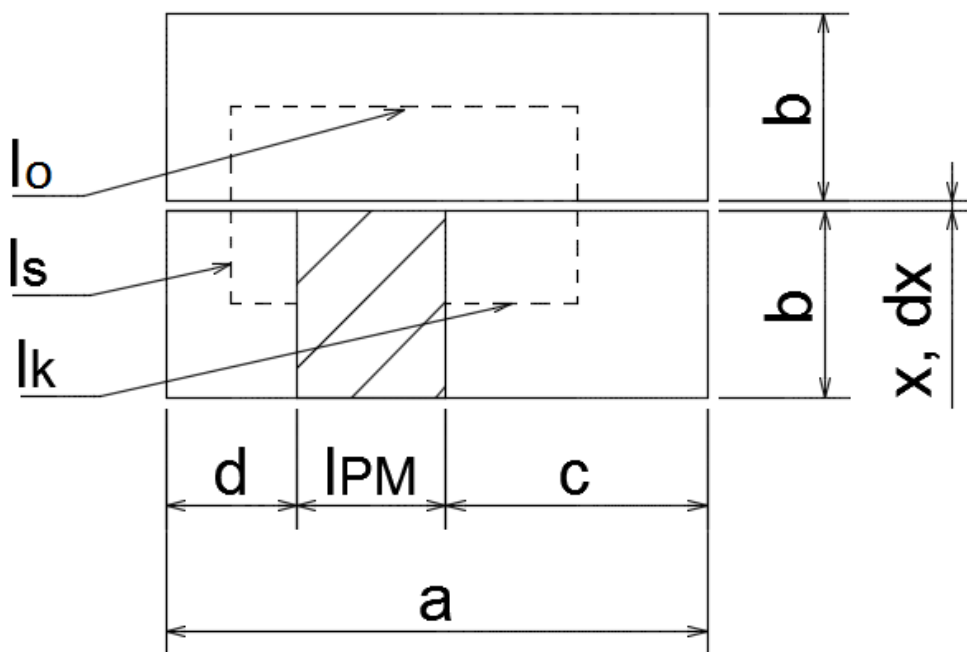
Všechny rozměry a parametry jsou brány se stejnou hodnotou jak pro numerický tak analytický model. Hodnoty remanentní indukce neodymového magnetu B_r a relativní permeability permanentního magnetu μ_{rN} a oceli μ_{ro} byly zjištěny z technické dokumentace podle použitých materiálů při výrobě experimentálního modelu. Šířka D je v tomto případě dvojnásobná od reálného modelu.

Parametry obvodu : $\delta = x \text{ mm}$, $l_s = 7 \text{ mm}$, $l_k = 14 \text{ mm}$, $l_o = 29 \text{ mm}$, $l_{PM} = 8 \text{ mm}$,

$\mu_{rN} = 1,06$, $\mu_{ro} = 8000$, $D = 18 \text{ mm}$

$a = 29 \text{ mm}$, $b = 10 \text{ mm}$, $c = 14 \text{ mm}$, $d = 7 \text{ mm}$

$B_r = 1,25 \text{ T}$, $H_c = 950\,000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$



Obr 5-3 Technická dokumentace čtvrtiny

Výpočet magnetického napětí permanentního magnetu:

$$U_{m1} = (NI)_{ekviv} = -H_c \cdot l_{PM} \quad (5.1)$$

$$U_{m1} = -(-950000) \cdot 0,008 = 7600 \text{ A} \quad (5.2)$$

Výpočet magnetických reluktancí obvodu a vzduchových mezer pomocí obecného vzorce

$$R = \frac{l}{\mu_0 \cdot S} \quad (5.3)$$

$$R_\delta = \frac{x}{\mu_0 \cdot d \cdot D} = \frac{x}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,007 \cdot 0,018} = \frac{x}{1,583 \cdot 10^{-10}} \text{ H}^{-1} \quad (5.4)$$

$$R_{\delta 2} = \frac{x}{\mu_0 \cdot c \cdot D} = \frac{x}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,018} = \frac{x}{3,167 \cdot 10^{-10}} \text{ H}^{-1} \quad (5.5)$$

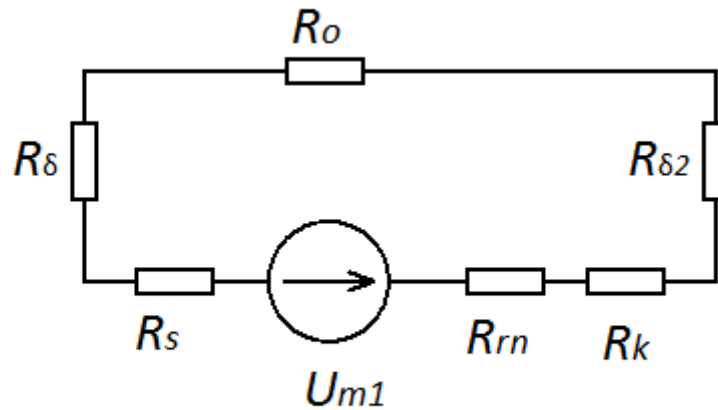
$$R_{rn} = \frac{l_{PM}}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot b \cdot D} = \frac{0,008}{1,06 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,010 \cdot 0,018} = 33,366 \text{ MH}^{-1} \quad (5.6)$$

$$R_s = \frac{l_s}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot b \cdot D} = \frac{0,007}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,010 \cdot 0,018} = 3,868 \text{ kH}^{-1} \quad (5.7)$$

$$R_k = \frac{l_k}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot b \cdot D} = \frac{0,014}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,010 \cdot 0,018} = 7,737 \text{ kH}^{-1} \quad (5.8)$$

$$R_o = \frac{l_o}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot c \cdot D} = \frac{0,029}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,018} = 11,447 \text{ kH}^{-1} \quad (5.9)$$

Podle Obr 5-3 bylo sestaveno schéma ekvivalentních magnetických veličin obvodu, ze kterých lze následně pomocí Hopkinsonova zákona vypočítat magnetický tok Φ .

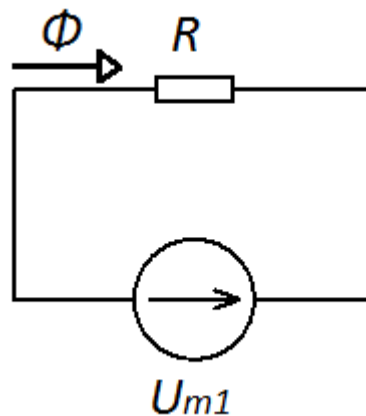


Obr 5-4 Schéma magnetického obvodu čtvrtiny

Pro zjednodušení si určíme celkovou reluktanci obvodu R sériovým sečtením všech reluktancí z rovnic (5.4)-(5.9.) :

$$R = R_{\delta} + R_{\delta 2} + R_{rn} + R_s + R_k + R_o \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} R &= \frac{x}{1,583 \cdot 10^{-10}} + \frac{x}{3,167 \cdot 10^{-10}} + 33,366 \cdot 10^6 + (3,868 + 7,737 + 11,447) \\ &= \frac{3 \cdot x}{3,167 \cdot 10^{-10}} + 333,891 \cdot 10^5 = \frac{3 \cdot x + 0,0106}{3,167 \cdot 10^{-10}} \text{ H}^{-1} \end{aligned} \quad (5.11)$$



Obr 5-5 Zjednodušené schéma magnetického obvodu čtvrtiny

Podle Hopkinsonova zákona, který je obdobou Ohmova zákona pro magnetické obvody platí tento vzorec:

$$\Phi = \frac{U_m}{R} = \frac{-H_c \cdot l_{PM}}{R} \quad (5.12)$$

Dané hodnoty pro výpočet magnetického toku Φ získáme ze vzorců (5.2) a (5.11). Počítaný čtvrtina systému znázorňuje jednoduchý magnetický obvod, tedy v každém bodě celého magnetického obvodu bude magnetický tok Φ konstantní.

$$\Phi = \frac{U_m}{R} = \frac{7600}{\frac{3 \cdot x + 0,0106}{3,167 \cdot 10^{-10}}} = \frac{2,409 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot x + 0,0106} \text{ Wb} \quad (5.13)$$

Nyní můžeme vypočítat magnetickou indukci ve vzduchové mezeře B , která je lineárním znázorněním magnetického toku Φ na každém bodě v řezu vzduchové mezery S . Jelikož počítaný model čtvrtiny systému nemá stejné průřezy ve vzduchové mezeře, budeme počítat magnetické indukce B_1 a B_2 pro průřezy S_1 a S_2 .

Obecný vzorec pro výpočet magnetické indukce B :

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (5.14)$$

Výpočet magnetické indukce B_1 a B_2 ve vzduchové mezeře:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{\Phi}{d \cdot D} = \frac{2,409 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot x + 0,0106} \cdot \frac{1}{0,007 \cdot 0,018} \quad (5.15)$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{\Phi}{c \cdot D} = \frac{2,409 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot x + 0,0106} \cdot \frac{1}{0,014 \cdot 0,018} \quad (5.16)$$

V následujícím kroku budou vzorově spočteny všechny hodnoty pro vzduchovou mezeru $x = 0,5 \text{ mm}$. Hodnota magnetického toku Φ ze vzorce (5.13) a hodnoty magnetické indukce B ze vzorců (5.15) a (5.16)

$$\Phi = \frac{U_m}{R} = \frac{7600}{\frac{3 \cdot x + 0,0106}{3,167 \cdot 10^{-10}}} = \frac{2,409 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 0,0005 + 0,0106} = 1,989 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} \quad (5.17)$$

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{\Phi}{d \cdot D} = \frac{\frac{2,409 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 0,0005 + 0,0106}}{0,007 \cdot 0,018} = \frac{1,989 \cdot 10^{-4}}{0,007 \cdot 0,018} = 1,579 \text{ T} \quad (5.18)$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{\Phi}{c \cdot D} = \frac{\frac{2,409 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 0,0005 + 0,0106}}{0,014 \cdot 0,018} = \frac{1,989 \cdot 10^{-4}}{0,014 \cdot 0,018} = 0,789 \text{ T} \quad (5.19)$$

Výpočet energií čtvrtiny magnetického systému:

Můžeme vypočítat dva druhy energií systému. Je to energie obsažena v permanentním magnetu W_{PM} a energie ve vzduchové mezeře W složená ze dvou energií W_1 a W_2 .

Obecně pro výpočet energie v určitém objemu platí:

$$W = \frac{1}{2} \cdot H \cdot B \cdot V = \frac{1}{2} \cdot \frac{B}{\mu_0} \cdot B \cdot V = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot S \cdot x \quad (5.20)$$

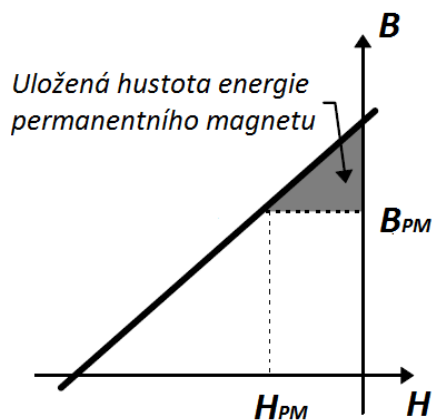
Z aplikace Ampérova zákona o zachování magnetického toku (2.13), kde index 1 a 2 popisuje vzduchové mezery a index PM je pro pracovní bod permanentního magnetu. Grafické znázornění hustoty energie obsažené v permanentním magnetu je zobrazeno na Obr 5-6 Pro výpočet lineárního systému dostaneme následující vzorec:

$$\left(\frac{B_1}{\mu_0} \cdot x + \frac{B_2}{\mu_0} \cdot x \right) + H_{PM} \cdot l_{PM} = 0 \quad (5.21)$$

$$B_1 \cdot b + B_2 \cdot c = B_{PM} \cdot b \quad (5.22)$$

$$B_{PM} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H_{PM} + B_r \quad (5.23)$$

$$W_{PM} = (l_{PM} \cdot b \cdot D) \cdot \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H_{PM}^2 \quad (5.24)$$



Obr 5-6 Hustota energie permanentního magnetu

Vzhledem ke zjednodušení výpočtů, můžeme zanedbat velikost energie permanentního magnetu, protože převážná většina energie systému je obsažena ve vzduchové mezeře mezi upínacím systémem a upínaným obrobkem. Metoda (1)

$$W_1 = \frac{1}{2} H \cdot B_1 \cdot S_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_1^2}{\mu_0} \cdot S_1 \cdot x = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,579^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,007 \cdot 0,018) \cdot 0,0005 \quad (5.25)$$

$$= 62,577 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

$$W_2 = \frac{1}{2} H \cdot B_2 \cdot S_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_2^2}{\mu_0} \cdot S_2 \cdot x = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,789^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,014 \cdot 0,018) \cdot 0,0005 \quad (5.26)$$

$$= 31,289 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

Pro celkovou energii obsaženou ve vzduchové mezeře platí:

$$W = W_1 + W_2 = 62,577 \cdot 10^{-3} + 31,289 \cdot 10^{-3} = 93,859 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad (5.27)$$

Celkovou sílu působící na upínaný obrobek vypočteme derivací celkové energie k velikosti vzduchové mezery.

$$F = \frac{\partial W}{\partial \delta} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{B_1^2}{\mu_0} \cdot S \cdot x + \frac{1}{2} \cdot \frac{B_2^2}{\mu_0} \cdot S \cdot x = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_1^2}{\mu_0} \cdot S + \frac{1}{2} \cdot \frac{B_2^2}{\mu_0} \cdot S \quad (5.28)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{1,579^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,007 \cdot 0,018) + \frac{1}{2} \cdot \frac{0,789^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,014 \cdot 0,018) = 187,43 \text{ N}$$

Stejného výsledku lze dosáhnout i dosazením vzorce (5.14) do vzorce (5.20) a výpočtem výsledné síly rovnou z magnetického toku Φ . Metoda (2)

$$\begin{aligned}
 F &\approx \frac{\partial W}{\partial \delta} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot S \cdot x = \frac{\partial W}{\partial \delta} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot S^2} \cdot S \cdot x = - \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot S_1} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot S_2} \right) \\
 &= - \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{(1,989 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,007 \cdot 0,018} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(1,989 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,018} \right) = \mathbf{187,39 \text{ N}}
 \end{aligned} \quad (5.29)$$

Další možností jak je možné spočítat koenergií celého systému je nahradit veličiny pro výpočet koenergie elektromagnetu ekvivalenty pro magnetický obvod. Metoda (3)

$$\begin{aligned}
 W_{ko} &= \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{(NI)_{ekviv}^2}{R} = \frac{1}{2} \cdot \frac{7600^2}{\frac{3 \cdot x + 0,0106}{3,167 \cdot 10^{-10}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{7600^2}{\frac{3 \cdot 0,0005 + 0,0106}{3,167 \cdot 10^{-10}}} \\
 &= \mathbf{0,79 \text{ J}}
 \end{aligned} \quad (5.30)$$

Následnou derivací vypočtené energie systému dostaneme výslednou hodnotu přídržné síly.

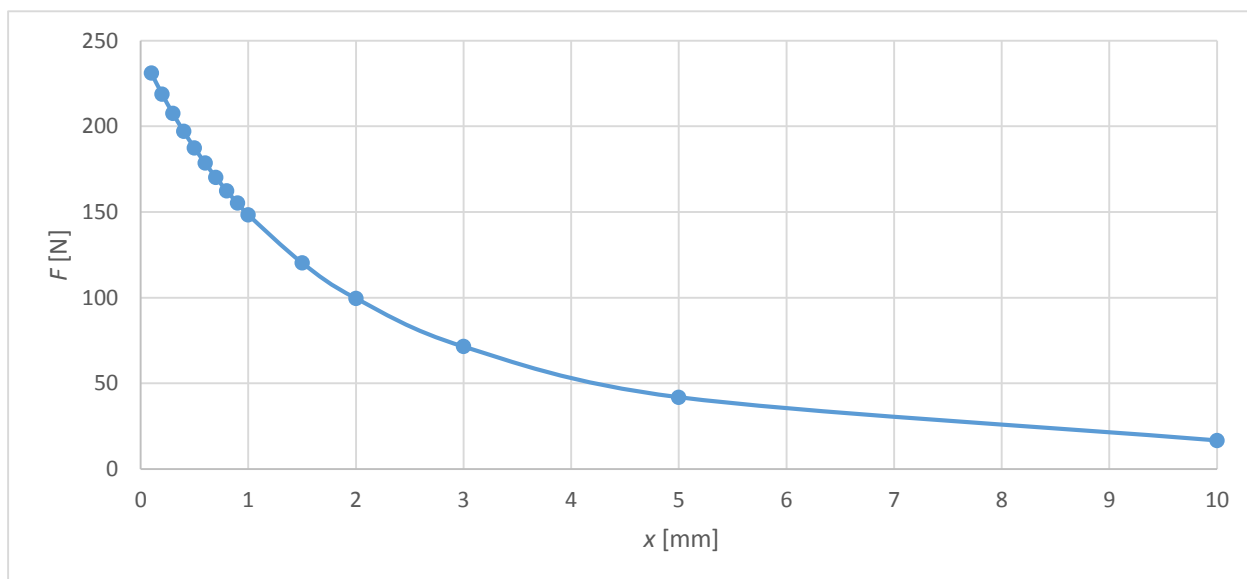
$$\begin{aligned}
 &= \frac{\partial W}{\partial \delta} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{7600^2}{\frac{3 \cdot x + 0,0106}{3,167 \cdot 10^{-10}}} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{7600^2}{\frac{6 \cdot x + 0,0212}{3,167 \cdot 10^{-10}}} \\
 &= \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{0,0183}{(6 \cdot x + 0,0212)} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot 0,0183 \cdot (6 \cdot x + 0,0212)^{-1} \\
 &= \frac{-1 \cdot 0,0183 \cdot 6}{(6 \cdot x + 0,0212)^2} \quad x = 0,5 \text{ mm} = \frac{-1 \cdot 0,0183 \cdot 6}{(6 \cdot 0,0005 + 0,0212)^2} \\
 &= \mathbf{187,49 \text{ N}}
 \end{aligned} \quad (5.31)$$

Minimální rozdíly ve výsledcích jsou způsobeny zaokrouhlováním mezivýpočtů.

Tab. 5-1 a Obr 5-6 zobrazují výsledky získané výpočtem pomocí metody (1). Tato metoda se osvědčila jako nejefektivnější a proto bude touto metodou počítáno i výpočty dále v této práci.

x [mm]	F [N]	B_1 [T]	B_2 [T]	Φ [mWb]
0,1	230,97	1,753	0,876	0,221
0,2	218,76	1,706	0,853	0,215
0,3	207,50	1,661	0,831	0,209
0,4	197,08	1,619	0,809	0,204
0,5	187,43	1,579	0,789	0,199
0,6	178,47	1,541	0,770	0,194
0,7	170,14	1,504	0,752	0,190
0,8	162,37	1,469	0,735	0,185
0,9	155,13	1,436	0,718	0,181
1	148,36	1,405	0,702	0,177
1,5	120,35	1,265	0,633	0,159
2	99,58	1,151	0,575	0,145
3	71,43	0,975	0,487	0,123
5	41,87	0,746	0,373	0,094
10	16,65	0,471	0,235	0,059

Tab. 5-1 Tabulka vypočtených hodnot pro čtvrtinu systému

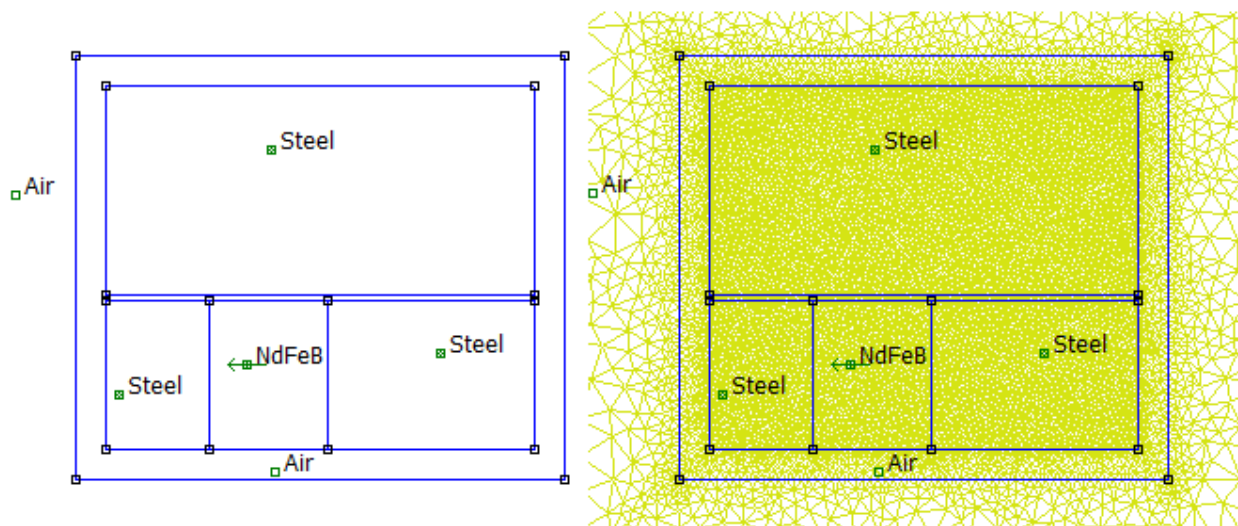


Obr 5-7 Vypočtená závislost přídržné síly čtvrtiny systému na velikosti vzduchové mezery

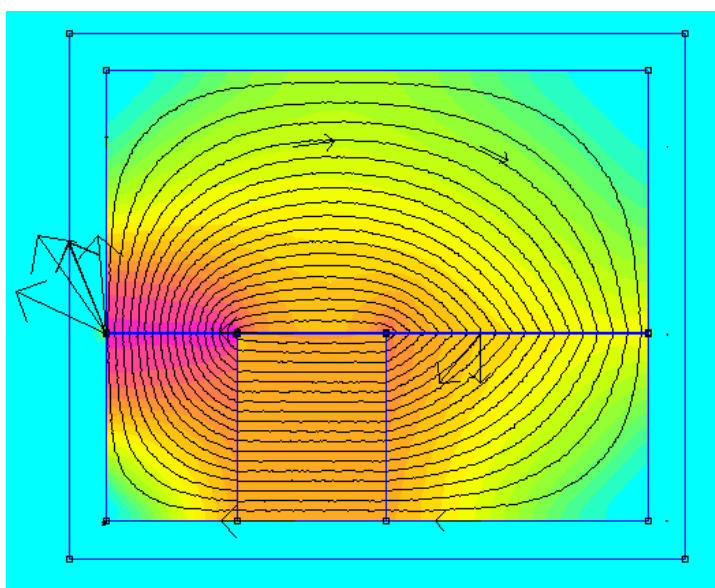
5.1.2 Analytický model

Pro vytvoření analytického modelu v prostředí FEMM je zapotřebí nejprve vytvořit model a přiřadit jednotlivým částem vlastní materiály. Materiálům byly přiřazeny parametry stejné, jaké se použily u numerického výpočtu aby se výsledné hodnoty byly co nejvíce blížily numerickým výsledkům.

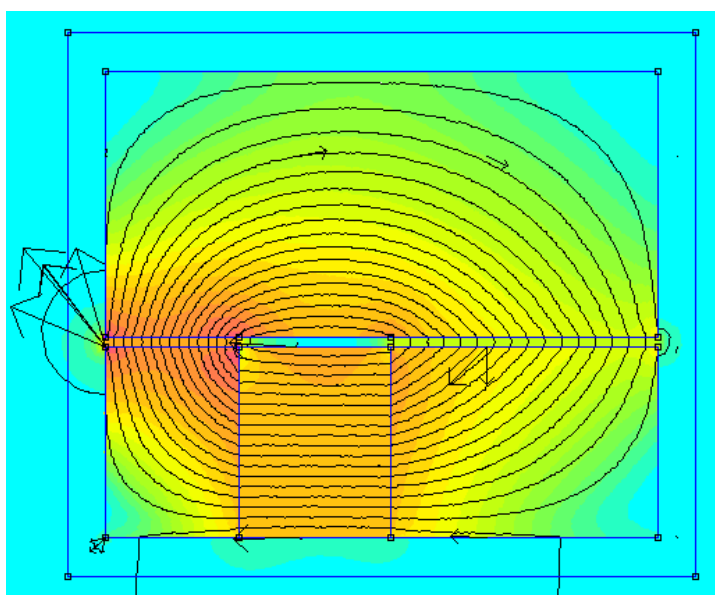
Následně byla vygenerovaná trojúhelníková síť, na které se aproximuje potenciál vypočtených oblastí. Pro přesnější výsledek byla vytvořena kolem modelu oblast s jemnou sítí i pro vzduch, aby se eliminovaly nepřesnosti ve vzduchové mezeře tak i pro přesnější výsledky programu.



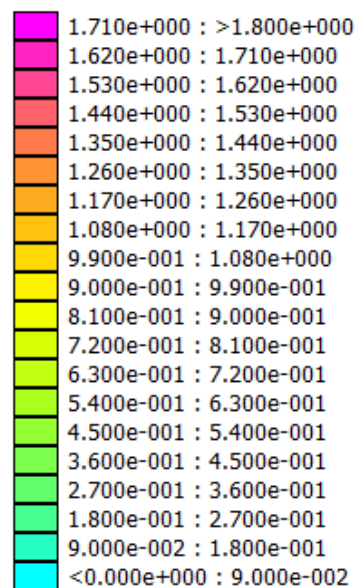
Obr 5-8 Vytvoření modelu čtvrtiny



a)



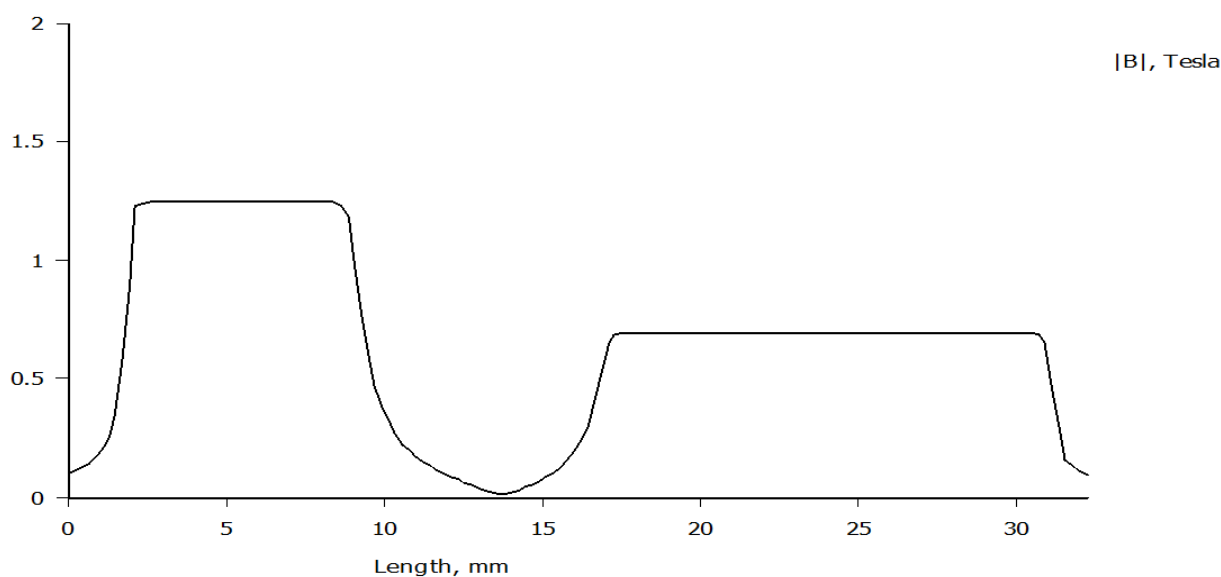
b)



Density Plot: |B|, Tesla

c)

Obr 5-9 Zobrazení magnetické indukce a toku: a) 0,1 mm , b) 0,5 mm , c) legenda magnetické indukce B



Obr 5-10 Zobrazení absolutní hodnoty magnetického toku ve vzduchové mezeře čtvrtiny systému ve vzdálenosti 0,5 mm

Podle Obr. 5-9 a Obr 5-10 lze vidět, že magnetická indukce B není stejná ve vzduchové mezeře nad oběma pólovými nástavci. To je způsobeno rozdílnou plochou ocelového jádra. Pro správnost a porovnání s numerickým výsledkem bylo uvažován průměr těchto hodnot.

Porovnání hodnoty magnetického toku vypočtené a získané z FEMMu pro vzduchovou mezeru $x = 0,5$ mm.

$$\Phi_{FEMM} = 1,823 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} \quad \Phi_{vypočtená} = 1,992 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} \quad (5.32)$$

Porovnání hodnoty magnetické indukce B vypočtené a získané z FEMMu pro vzduchovou mezeru $x = 0,5$ mm.

$$B_{1 FEMM} = 1,241 \text{ T} \quad B_{1 vypočtená} = 1,579 \text{ T} \quad (5.33)$$

$$B_{2 FEMM} = 0,692 \text{ T} \quad B_{2 vypočtená} = 0,789 \text{ T}$$

Porovnání hodnoty energie ve vzduchové mezeře W vypočtené pomocí metody (1) a získané z FEMMu pro vzduchovou mezeru $x = 0,5$ mm.

$$W_{FEMM} = 71,517 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad W_{vypočtená} = 93,859 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad (5.34)$$

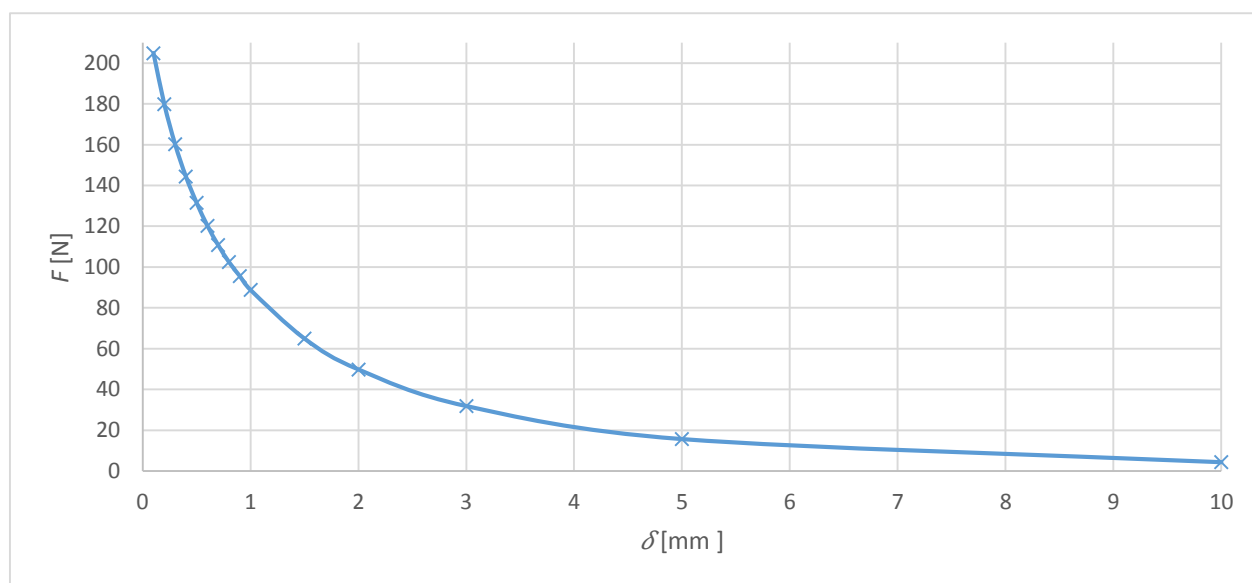
Porovnání hodnoty koenergie v celém systému W_{co} vypočtené pomocí metody (3) a získané z FEMMu pro vzduchovou mezeru $x = 0,5$ mm.

$$W_{co \text{ FEMM}} = 0,772 \text{ J} \qquad W_{co \text{ vypočtená}} = 0,79 \text{ J} \qquad (5.35)$$

Tabulka výsledků vypočtená metodou konečných prvků.

δ [mm]	F [N]	B_1 [T]	B_2 [T]	Φ [mWb]
0,1	204,87	1,61	0,844	0,213
0,2	179,9	1,502	0,796	0,208
0,3	160,25	1,4	0,756	0,2
0,4	144,44	1,315	0,722	0,193
0,5	131,52	1,241	0,692	0,187
0,6	120,27	1,178	0,665	0,181
0,7	110,75	1,121	0,64	0,177
0,8	102,45	1,071	0,618	0,169
0,9	95,61	1,025	0,596	0,166
1	88,79	0,984	0,578	0,164
1,5	64,98	0,82	0,499	0,141
2	49,85	0,706	0,441	0,128
3	31,91	0,554	0,358	0,108
5	15,73	0,371	0,259	0,079
10	4,4	0,198	0,144	0,048

Tab. 5-2 Výsledné hodnoty čtvrtiny systému vypočítané metodou konečných prvků programem FEMM



Obr 5-11 Velikost přidržované síly čtvrtiny systému v závislosti na velikosti vzduchové mezery

5.2 Polovina obvodu

5.2.1 Numerický výpočet

V této části výpočtů se již objeví i permanentní magnet AlNiCo, který bude mít ve výsledném modelu funkci měnit vlastní polaritu za působení elektromagnetu umístěného na středním sloupku magnetického jádra. V této části bereme v úvahu pouze polovinu magnetického obvodu s dvojnásobnou tloušťkou D výsledného systému. To znamená, že výsledná síla by měla být přibližně podobná reálnému modelu. V této části ještě také zanedbáváme elektromagnet a jeho působení na obvod.

V návrhu jsou šrafovaně označeny permanentní magnety.

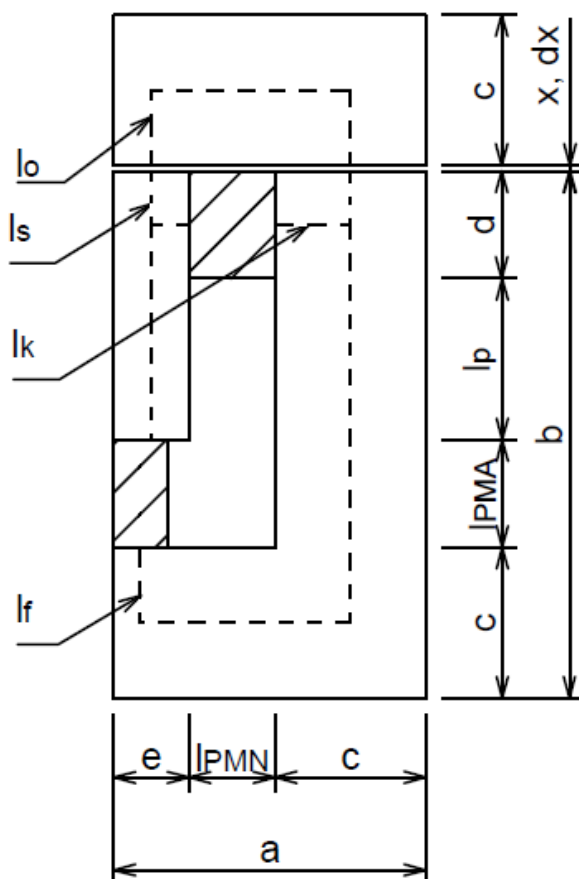
Parametry obvodu : $\delta = x \text{ mm}$, $l_s = 7 \text{ mm}$, $l_k = 14 \text{ mm}$, $l_o = 29 \text{ mm}$, $l_f = 64 \text{ mm}$,

$l_p = 15 \text{ mm}$, $l_{PMA} = 10 \text{ mm}$, $l_{PMN} = 8 \text{ mm}$,

$\mu_{rN} = 1,06$, $\mu_{rA} = 1,5$, $\mu_{ro} = 8000$, $D = 18 \text{ mm}$

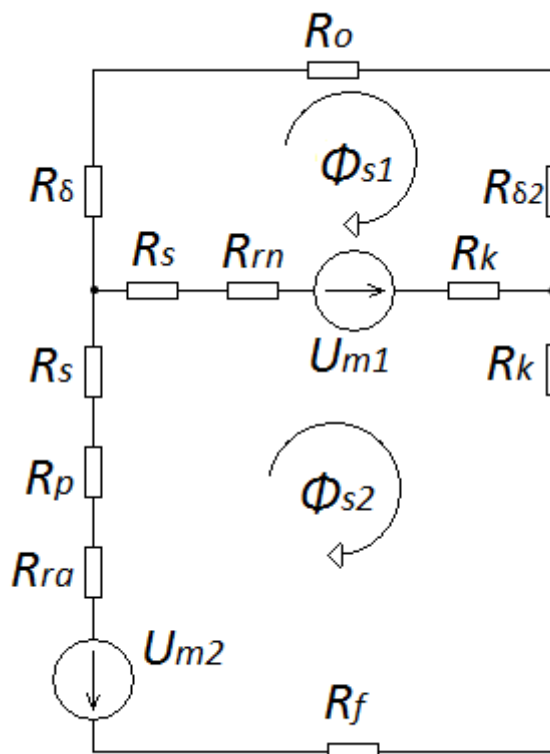
$a = 29 \text{ mm}$, $b = 49 \text{ mm}$, $c = 14 \text{ mm}$, $d = 10 \text{ mm}$, $e = 7 \text{ mm}$

$H_{cN} = 950000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, $H_{cA} = 50000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$



Obr 5-12 Technická dokumentace poloviny systému

Jelikož tento magnetický obvod již nelze počítat stejně jako čtvrtinu obvodu, je za vhodné užít pro výpočet výsledného magnetického toku Φ metodu smyčkových proudů (MSP).



Obr 5-13 Schéma magnetického obvodu poloviny

Výpočet magnetických napětí pomocí obecného vzorce (7.1) :

$$U_{m1} = (NI)_{ekviv NdFeB} = -H_c \cdot l_{PMN} = -(-950000) \cdot 0,008 = 7600 \text{ A} \quad (5.36)$$

$$U_{m2} = (NI)_{ekviv AlNiCo} = -H_c \cdot l_{PMA} = -(-50000) \cdot 0,01 = 500 \text{ A} \quad (5.37)$$

Výpočet magnetických reluktancí obvodu a vzduchových mezer pomocí vzorce (7.3) :

$$R_{\delta} = \frac{x}{\mu_0 \cdot S} = \frac{x}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,007 \cdot 0,018} = \frac{x}{1,583 \cdot 10^{-10}} = \frac{2 \cdot x}{3,167 \cdot 10^{-10}} H^{-1} \quad (5.38)$$

$$R_{\delta 2} = \frac{x}{\mu_0 \cdot S} = \frac{x}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,018} = \frac{x}{3,167 \cdot 10^{-10}} H^{-1} \quad (5.39)$$

$$R_{rn} = \frac{l_{PMN}}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,008}{1,06 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,010 \cdot 0,018} = 33,366 \text{ MH}^{-1} \quad (5.40)$$

$$R_{ra} = \frac{l_{PMA}}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,01}{1,5 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,05 \cdot 0,018} = 58,946 \text{ MH}^{-1} \quad (5.41)$$

$$R_p = \frac{l_p}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,015}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,007 \cdot 0,018} = 11,842 \text{ kH}^{-1} \quad (5.42)$$

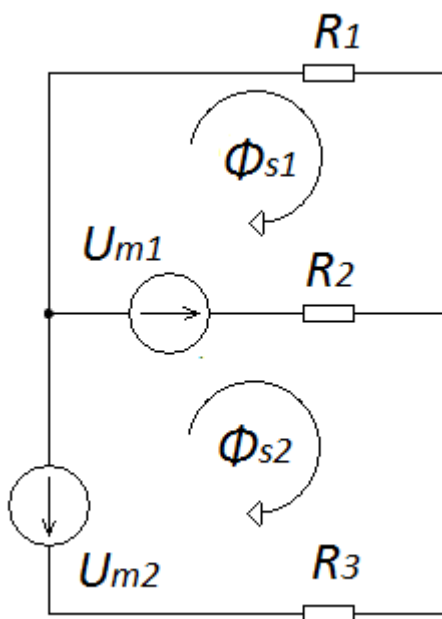
$$R_f = \frac{l_f}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,064}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,018} = 25,263 \text{ kH}^{-1} \quad (5.43)$$

$$R_s = \frac{l_s}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,007}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,010 \cdot 0,018} = 3,868 \text{ kH}^{-1} \quad (5.44)$$

$$R_k = \frac{l_k}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,014}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,018} = 5,526 \text{ kH}^{-1} \quad (5.45)$$

$$R_o = \frac{l_o}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,029}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,018} = 11,447 \text{ kH}^{-1} \quad (5.46)$$

Pro zjednodušení výpočtů zjednodušíme daný obvod a pro přehlednější výpočty sečteme všechny sériové reluktance v daném úseku.



Obr 5-14 Zjednodušené schéma poloviny magnetického obvodu

$$R_1 = R_\delta + R_{\delta 2} + R_o = \frac{2 \cdot x}{3,167 \cdot 10^{-10}} + \frac{x}{3,167 \cdot 10^{-10}} + 11,447 \cdot 10^3 \quad (5.47)$$

$$= \frac{3 \cdot x + 3,625 \cdot 10^{-6}}{3,167 \cdot 10^{-10}} H^{-1}$$

$$R_2 = R_{rn} + R_s + R_k = 33,366 \cdot 10^6 + (3,868 + 5,526) \cdot 10^3 \quad (5.48)$$

$$= 33,375 MH^{-1}$$

$$R_3 = R_{ra} + R_s + R_k + R_f + R_p \quad (5.49)$$

$$= 58,946 \cdot 10^6 + (3,868 + 5,526 + 25,263 + 11,842) \cdot 10^3$$

$$= 58,993 MH^{-1}$$

Podle Hopkinsonova zákona nyní dosadíme vzorec (7.12) pro výpočet magnetického toku Φ do rovnice matic vzniklé užitím metody smyčkových proudů (MSP). Touto metodou můžeme lehce vypočítat velikosti a směry magnetického toku ve smyčkách Φ_{s1} a Φ_{s2} .

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_2 & -R_2 \\ -R_2 & R_3 + R_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{s1} \\ \Phi_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{m1} \\ U_{m2} - U_{m1} \end{bmatrix} \quad (5.50)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{3 \cdot x + 3,625 \cdot 10^{-6}}{3,167 \cdot 10^{-10}} + 33,375 \cdot 10^6 & -(33,375 \cdot 10^6) \\ -(33,375 \cdot 10^6) & 58,993 \cdot 10^6 + 33,375 \cdot 10^6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{s1} \\ \Phi_{s2} \end{bmatrix} \quad (5.51)$$

$$= \begin{bmatrix} 7600 \\ 500 - 7600 \end{bmatrix}$$

Nyní vypočteme determinant Δ z matice magnetických reluktancí, který použijeme při dalších výpočtech.

$$\begin{bmatrix} \frac{3 \cdot x + 10,573 \cdot 10^{-3}}{3,167 \cdot 10^{-10}} & -(33,375 \cdot 10^6) \\ -(33,375 \cdot 10^6) & 92,368 \cdot 10^6 \end{bmatrix} \quad (5.52)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta &= \left(\frac{3 \cdot x + 10,573 \cdot 10^{-3}}{3,167 \cdot 10^{-10}} \cdot 92,368 \cdot 10^6 \right) & (5.53) \\
 &- ((-33,375 \cdot 10^6) \cdot (-33,375 \cdot 10^6)) \\
 &= \frac{277,104 \cdot 10^6 \cdot x + 976,607 \cdot 10^3}{3,167 \cdot 10^{-10}} - 1,114 \cdot 10^{15} \\
 &= \frac{277,104 \cdot 10^6 \cdot x + 623,803 \cdot 10^3}{3,167 \cdot 10^{-10}}
 \end{aligned}$$

Nyní se nahradí první sloupec matice magnetických reluktancí 2x2 sloupcem s velikostmi magnetických napětí a vypočítá se další determinant Δ_1 .

$$\begin{bmatrix} 7600 & -(33,375 \cdot 10^6) \\ -7100 & 92,368 \cdot 10^6 \end{bmatrix} \quad (5.54)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta_1 &= (7600 \cdot 92,368 \cdot 10^6) - (-33,375 \cdot 10^6 \cdot (-7100)) & (5.55) \\
 &= 7,02 \cdot 10^{11} - (2,37 \cdot 10^{11}) = 4,65 \cdot 10^{11}
 \end{aligned}$$

Dále se nahradí druhý sloupec matice magnetických reluktancí 2x2 sloupcem s velikostmi magnetických napětí a vypočítá se další determinant Δ_2 .

$$\begin{bmatrix} \frac{3 \cdot x + 10,573 \cdot 10^{-3}}{3,167 \cdot 10^{-10}} & 7600 \\ -(33,375 \cdot 10^6) & -7100 \end{bmatrix} \quad (5.56)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta_2 &= \left(\frac{3 \cdot x + 10,573 \cdot 10^{-3}}{3,167 \cdot 10^{-10}} \cdot (-7100) \right) - ((-33,375 \cdot 10^6) \cdot (7600)) & (5.57) \\
 &= -\frac{21300 \cdot x + 75,068}{3,167 \cdot 10^{-10}} - (-2,537 \cdot 10^{11}) \\
 &= -\frac{21300 \cdot x + 155,415}{3,167 \cdot 10^{-10}}
 \end{aligned}$$

S vypočtenými determinanty můžeme konečně vypočítat hodnoty smyčkových magnetických toků Φ_{s1} a Φ_{s2} .

$$\Phi_{s1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{4,65 \cdot 10^{11}}{\frac{277,104 \cdot 10^6 \cdot x + 623,803 \cdot 10^3}{3,167 \cdot 10^{-10}}} \quad (5.58)$$

$$= \frac{147,266}{277,104 \cdot 10^6 \cdot x + 623,803 \cdot 10^3}$$

$$\Phi_{s2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-\frac{21300 \cdot x + 155,415}{3,167 \cdot 10^{-10}}}{\frac{277,104 \cdot 10^6 \cdot x + 623,803 \cdot 10^3}{3,167 \cdot 10^{-10}}} \quad (5.59)$$

$$= \frac{21300 \cdot x + 155,415}{277,104 \cdot 10^6 \cdot x + 623,803 \cdot 10^3}$$

Výpočet magnetické indukce B_1 a B_2 ve vzduchové mezeře podle vzorce (5.14) :

$$B_1 = \frac{\Phi_{s1}}{S} = \frac{147,266}{\frac{277,104 \cdot 10^6 \cdot x + 623,803 \cdot 10^3}{S}} \quad (5.60)$$

$$B_2 = \frac{\Phi_{s2}}{S} = \frac{21300 \cdot x + 155,415}{\frac{277,104 \cdot 10^6 \cdot x + 623,803 \cdot 10^3}{S}} \quad (5.61)$$

V následujícím kroku budou vzorově spočteny všechny hodnoty pro vzduchovou mezeru $x = 0,5 \text{ mm}$. Hodnoty magnetického toku Φ budou vzorově spočteny pro obě smyčky ze vzorců (5.58) a (5.59). Protože se vzduchová mezera nachází ve smyčce $s1$, budou dále hodnoty magnetické indukce B spočteny ze vzorce (5.60).

$$\Phi_{s1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{147,266}{277,104 \cdot 10^6 \cdot 0,0005 + 623,803 \cdot 10^3} = \frac{147,266}{762355} \quad (5.62)$$

$$= 1,932 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Phi_{s2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{21300 \cdot 0,0005 - 155,415}{277,104 \cdot 10^6 \cdot 0,0005 - 623,803 \cdot 10^3} = \frac{-144,765}{-485251} \quad (5.63)$$

$$= 2,983 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

Výpočet magnetické indukce B_1 a B_2 ve vzduchové mezeře. Pro výpočet budeme uvažovat hodnotu magnetického toku Φ_{s1} ze vzorce (5.62)

$$B_1 = \frac{\Phi_{s1}}{S_1} = \frac{1,932 \cdot 10^{-4}}{0,007 \cdot 0,018} = 1,533 \text{ T} \quad (5.64)$$

$$B_2 = \frac{\Phi_{s1}}{S_2} = \frac{1,932 \cdot 10^{-4}}{0,014 \cdot 0,018} = 0,767 \text{ T} \quad (5.65)$$

Výpočet energie obsažené v obou vzduchových mezerách systému

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{1}{2} H \cdot B_1 \cdot S_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_1^2}{\mu_0} \cdot S_1 \cdot x = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,533^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,007 \cdot 0,018) \cdot 0,0005 \\ &= 58,909 \cdot 10^{-3} \text{ J} \end{aligned} \quad (5.66)$$

$$\begin{aligned} W_2 &= \frac{1}{2} H \cdot B_2 \cdot S_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_2^2}{\mu_0} \cdot S_2 \cdot x = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,767^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,014 \cdot 0,018) \cdot 0,0005 \\ &= 14,747 \cdot 10^{-3} \text{ J} \end{aligned} \quad (5.67)$$

Součtem dostaneme celkovou energii ve vzduchové mezeře

$$W = W_1 + W_2 = 58,909 \cdot 10^{-3} + 14,747 \cdot 10^{-3} = 73,656 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad (5.68)$$

Derivací této celkové energie přes vzduchovou mezeru dostaneme výslednou sílu působící na upínaný obrobek.

$$\begin{aligned} F &= \frac{\partial W}{\partial \delta} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{B_1^2}{\mu_0} \cdot S \cdot x + \frac{1}{2} \cdot \frac{B_2^2}{\mu_0} \cdot S \cdot x = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_1^2}{\mu_0} \cdot S + \frac{1}{2} \cdot \frac{B_2^2}{\mu_0} \cdot S \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{1,533^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,007 \cdot 0,018) + \frac{1}{2} \cdot \frac{0,767^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,014 \cdot 0,018) = 176,75 \text{ N} \end{aligned} \quad (5.69)$$

Výpočet síly z magnetického toku Φ z rovnice (5.62)

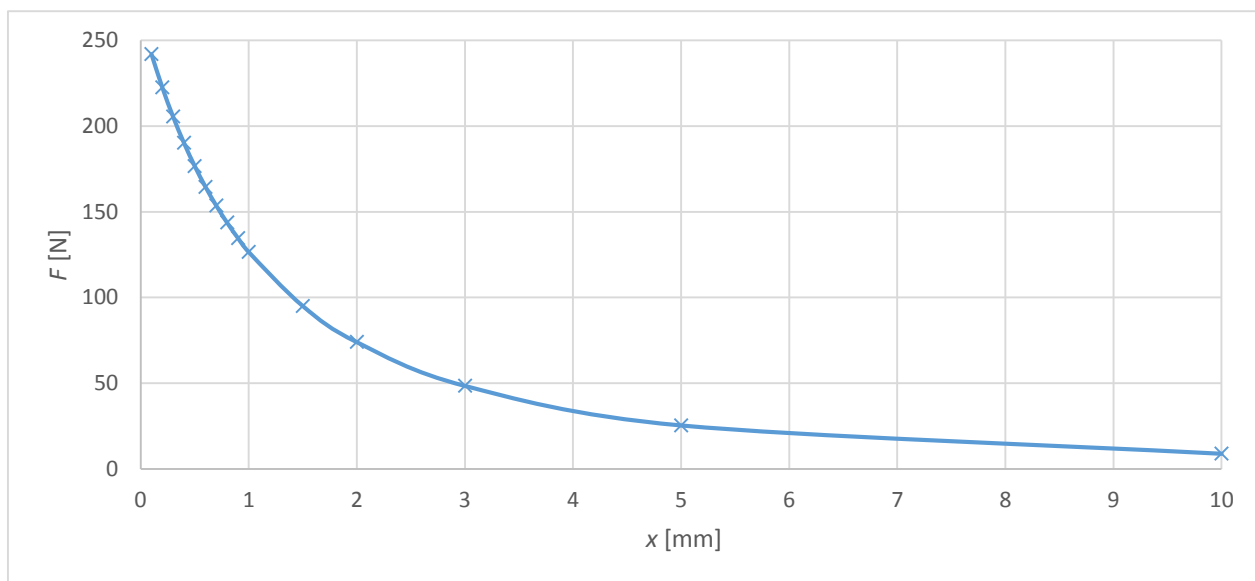
$$F \approx \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot S} = - \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot S_1} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot S_2} \right) \quad (5.70)$$

$$= - \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{(1,932 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,007 \cdot 0,018} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(1,932 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,018} \right) = \mathbf{176,81 \text{ N}}$$

Tabulka vypočtených hodnot pro polovinu systému metodou (1), kterou se vyhodnocovaly výsledky i při výpočtech čtvrtiny systému.

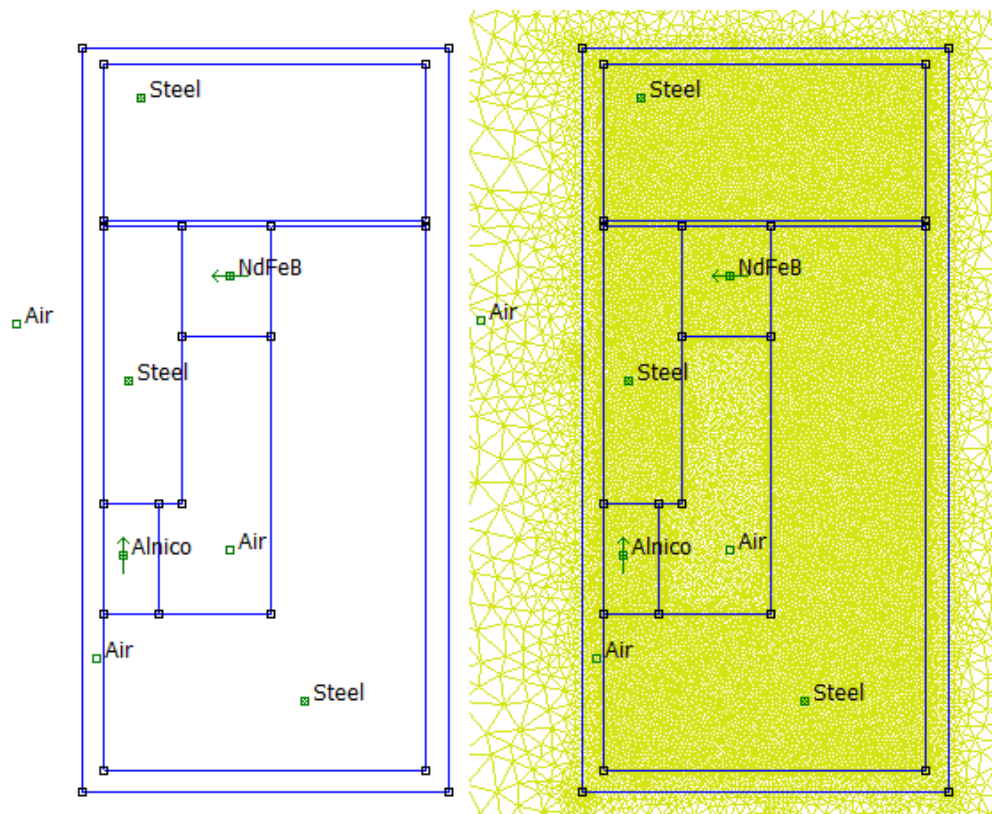
δ [mm]	F [N]	$B1$ [T]	$B2$ [T]	Φ [mWb]
0,1	242,01	1,794	0,897	0,226
0,2	222,67	1,721	0,860	0,217
0,3	205,55	1,653	0,827	0,208
0,4	190,34	1,591	0,795	0,201
0,5	176,75	1,533	0,767	0,193
0,6	164,57	1,479	0,740	0,186
0,7	153,61	1,429	0,715	0,180
0,8	143,71	1,382	0,691	0,174
0,9	134,73	1,339	0,669	0,169
1	126,57	1,297	0,649	0,164
1,5	95,08	1,124	0,562	0,142
2	74,03	0,992	0,496	0,125
3	48,52	0,803	0,402	0,101
5	25,44	0,582	0,291	0,073
10	8,91	0,344	0,172	0,043

Tab. 5-3 Tabulka vypočtených hodnot pro polovinu systému



Obr 5-15 Vypočtená závislost přídržné síly poloviny systému na velikosti vzduchové mezery

5.2.2 Analytický model

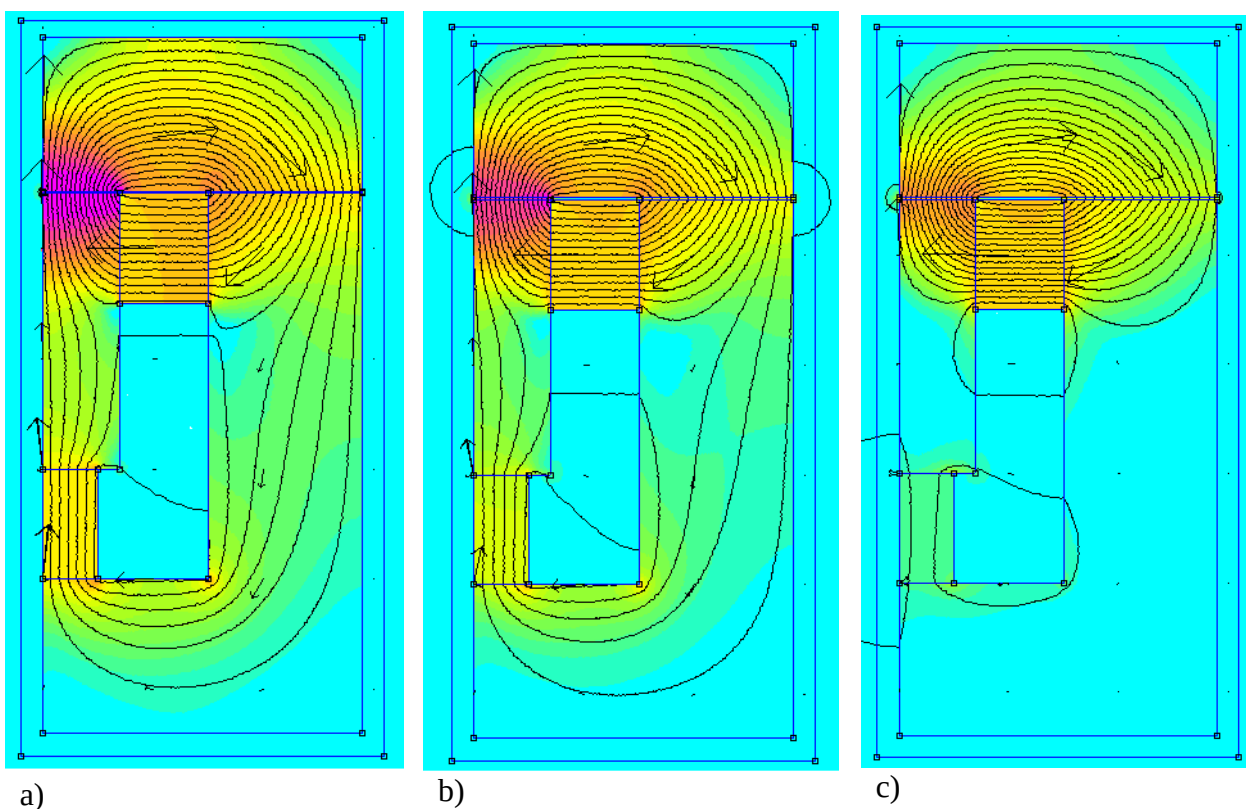


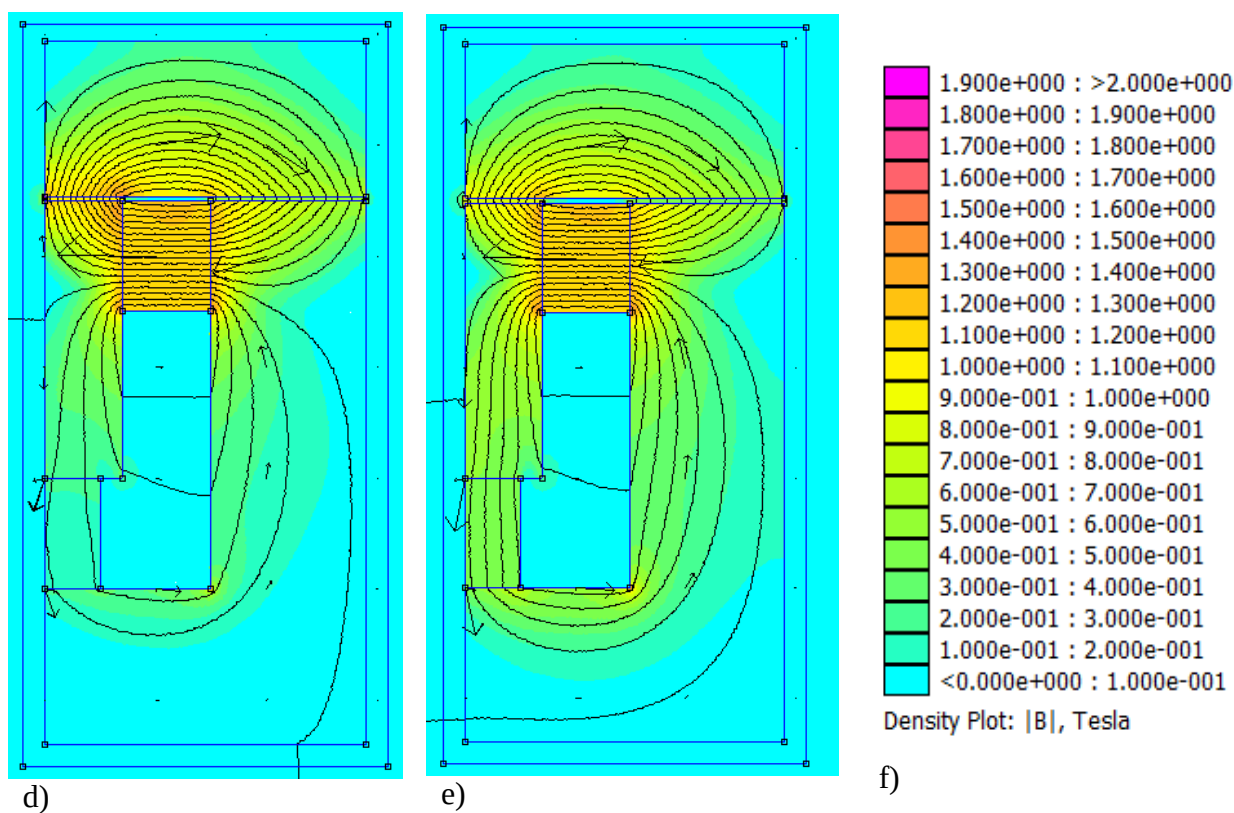
Obr 5-16 Vytváření modelu poloviny

Provozní verze

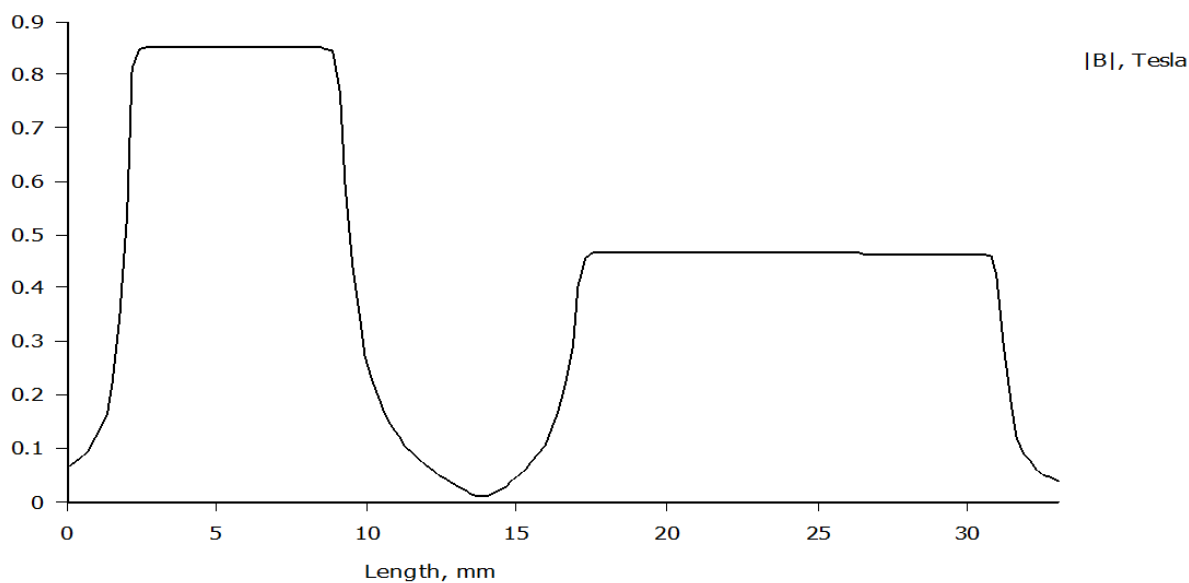
Kolem vzdálenosti 0,3 – 0,4 mm kotvy od upínače začíná vlivem úzké hysterezní křivky AlNiCo magnetu převládat silnější magnet NdFeB s tvrdou magnetizační charakteristikou. Od této vzdálenosti se otáčí polarizace magnetu AlNiCo přičemž vzniká ve velikosti síly působící na přidržovanou kotvu skok, při kterém výrazně poklesne výsledná síla. Oddalujeme-li kotvu energií W_{mech} , působíme proti energii obvodu W_m . Tím pádem se při oddalování kotvy zmenšuje magnetický tok Φ procházející kotvou a tedy i vzduchovou mezerou. Energie akumulovaná v magnetickém obvodu zdrojem magnetického napětí (permanentním magnetem) je stlačována mechanickou energií působící proti ní. Permanentní magnet AlNiCo již má malé vnitřní magnetomotorické napětí a jeho vnitřní koenergie nedokáže dále působit proti silnějšímu NdFeB. Tímto se začne demagnetizovat, přičemž se postupně otáčejí Weissovy domény ve směru působení neodymového magnetu.

Díky své úzké hysterezní křivce AlNiCo magnetu můžeme po opětovném přiložení upínaného obrobku (kotvy) znova zpolarizovat Weissovy domény v žádaném směru silným elektrickým proudovým pulsem přivedeným na cívku elektromagnetu.





Obr 5-18 Zobrazení toku magnetické indukce a směru toku při postupném oddalování obrobku v polovičním provedení: a) 0,1 mm , b) 0,2 mm , c) 0,3 mm , d) 0,4 mm , e) 0,5 mm , f) legenda intenzity magnetické indukce B



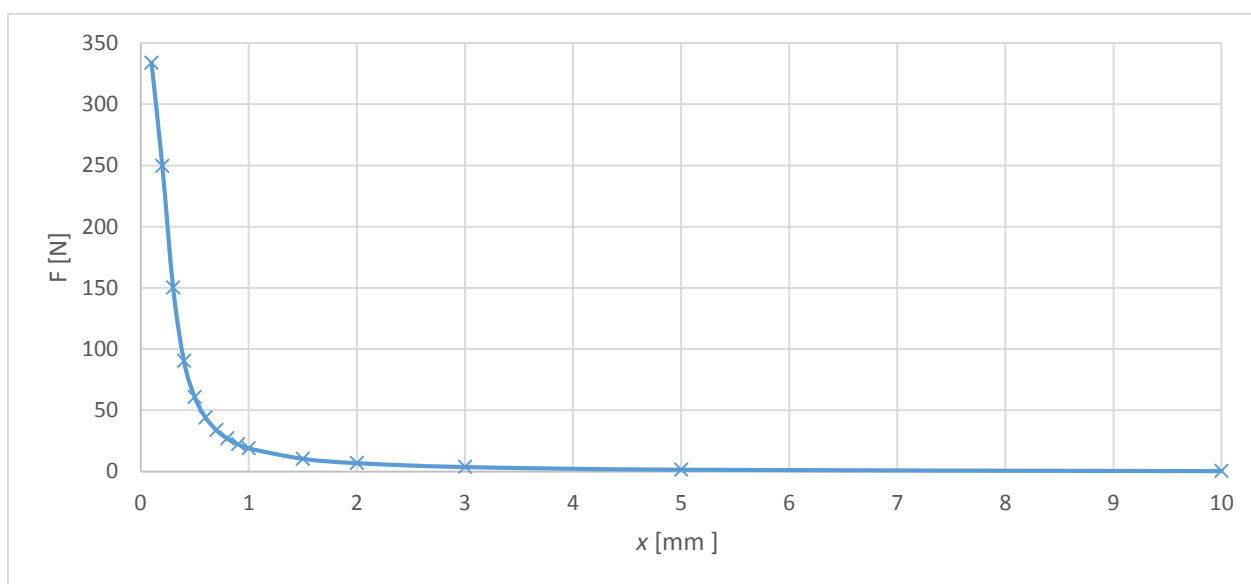
Obr 5-17 Zobrazení absolutní hodnoty magnetického toku ve vzduchové mezeře poloviny systému ve vzdálenosti 0,5 mm

Tabulka hodnot vypočtených metodou konečných prvků:

Pracovní verze

$\delta [mm]$	$F [N]$	$B_1 [T]$	$B_2 [T]$	$\Phi [mWb]$
0,1	333,98	2,25	1,158	2,913
0,2	249,68	1,865	0,981	2,531
0,3	150,27	1,366	0,73	1,912
0,4	90,38	1,045	0,565	1,508
0,5	60,77	0,85	0,464	1,251
0,6	44,21	0,719	0,397	1,072
0,7	33,86	0,625	0,348	0,952
0,8	27	0,555	0,311	0,849
0,9	22,28	0,501	0,283	0,772
1	18,93	0,46	0,261	0,725
1,5	10,47	0,335	0,194	0,543
2	6,91	0,269	0,158	0,465
3	3,71	0,196	0,116	0,356
5	1,54	0,125	0,075	0,239
10	0,38	0,039	0,037	0,149

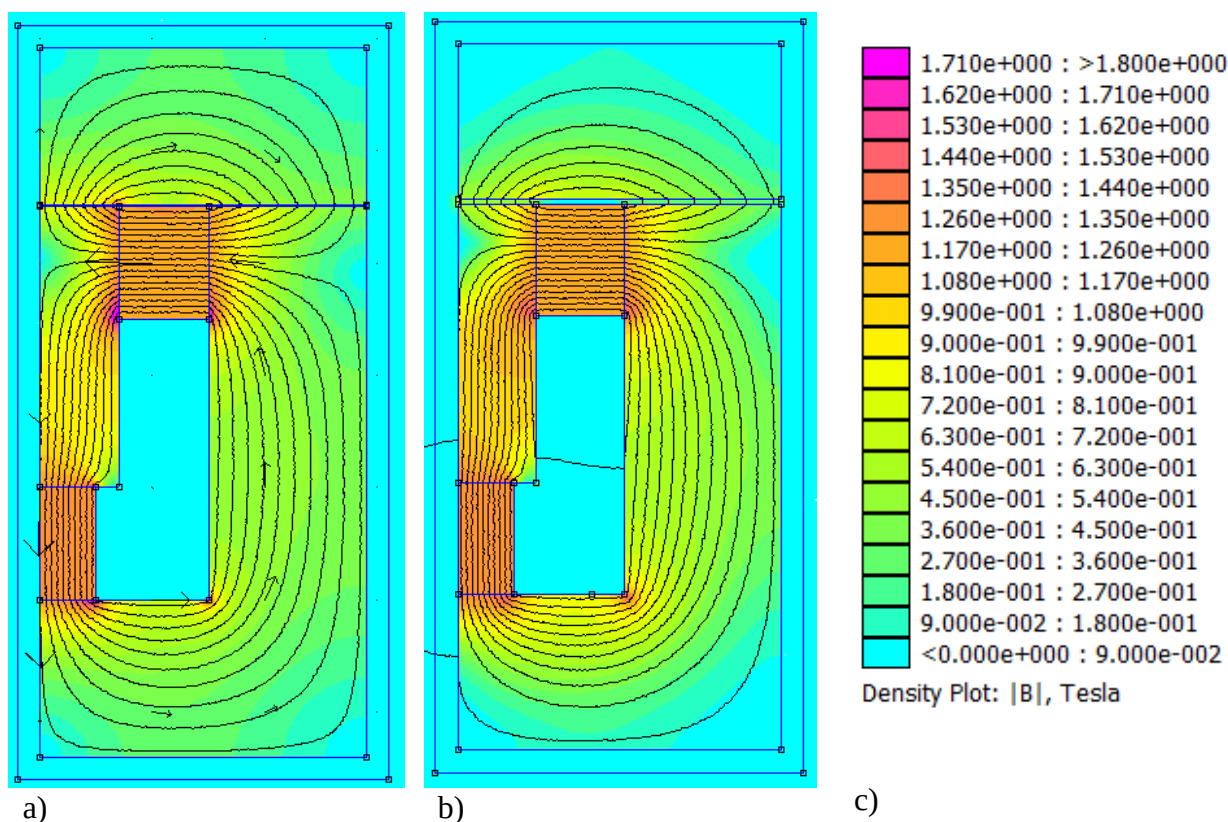
Tab. 5-4 Výsledné hodnoty poloviny systému vypočítané metodou konečných prvků programem FEMM



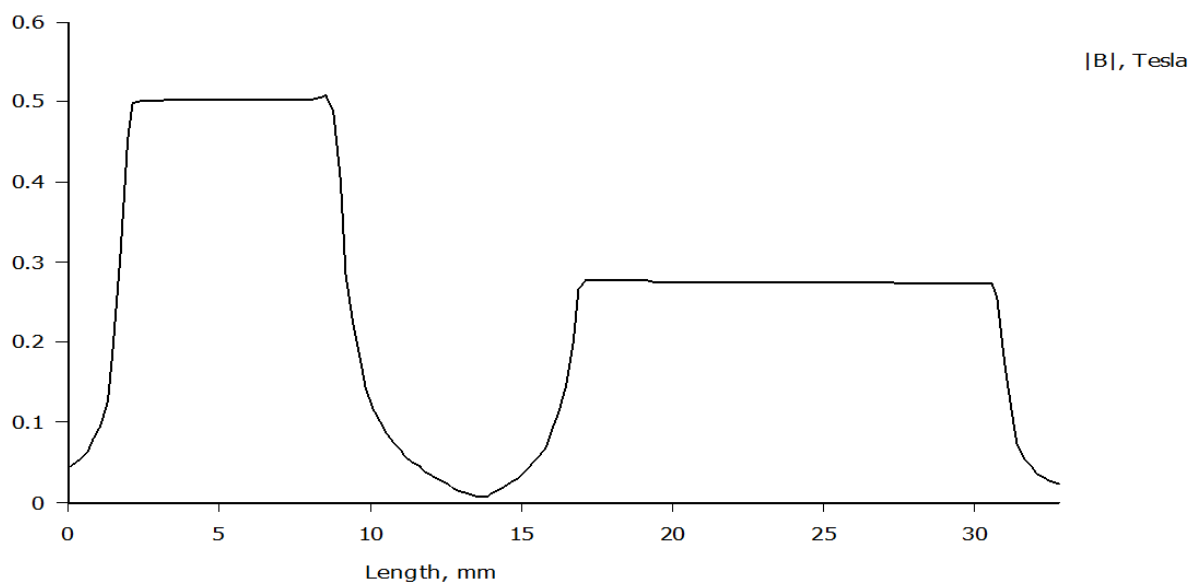
Obr 5-19 Velikost přidržované síly poloviny systému v závislosti na velikosti vzduchové mezery

Odpínací verze

Odepínací verzí se myslí stav, při kterém je polarizace, tedy Weissovy domény AlNiCo magnetu otočeny opačným směrem než při pracovní verzi. Tato reverzace magnetické polarity je způsobena silným proudovým pulsem přivedeným na elektromagnet celkového systému vypočteným v následující kapitole. Při otočeném AlNiCo magnetu nedosahuje v upínací oblasti (0,1 – 0,5 mm) magnetický systém velké upínací síly, tedy lze obrobek odejmout bez větší námahy. Ve vzdálenosti nad 1 mm jsou již síly téměř podobné a to z důvodu úzkého AlNiCo magnetu. Ten se při odepínání rychle přesytí magnetickou indukcí B , a není schopen přenést větší magnetický tok Φ . Z tohoto důvodu se magnetické siločáry neodymového magnetu stále uzavírají přes kotvu a nikoli přes ocelové jádro. Proto při vzdálenosti kotvy 0,1 mm stále působí na kotvu silou 46,26 N. Tato síla by se ještě zmenšila při použití AlNiCo magnetu s větším průřezem, který by dokázal efektivněji přitáhnout a umožnit průchod většího objemu magnetické indukce B bez přesycení.



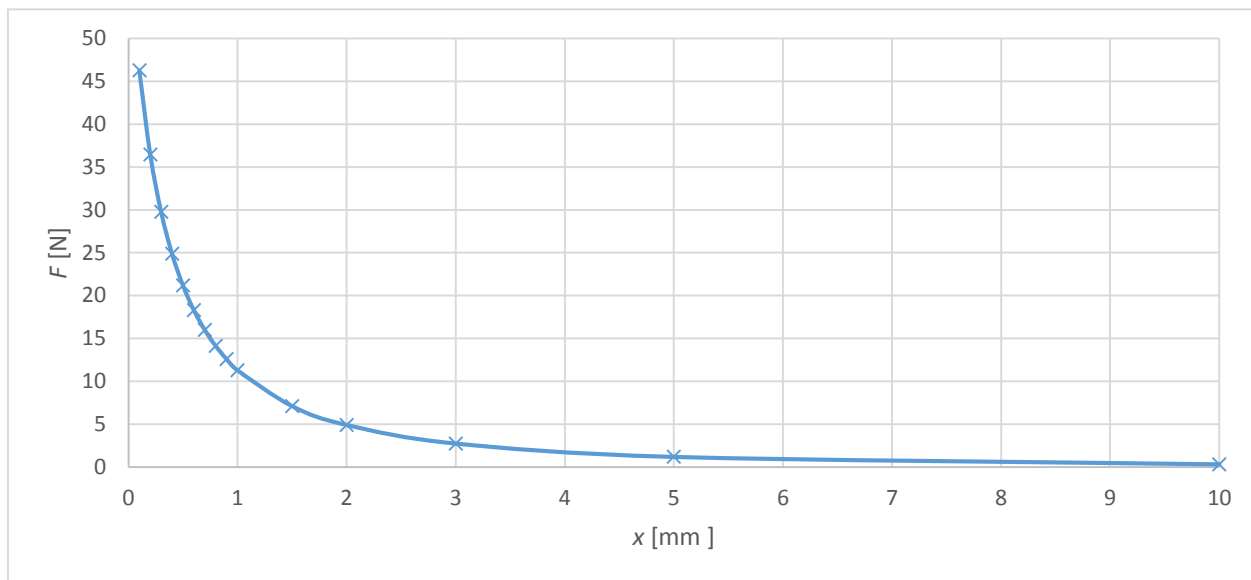
Obr 5-20 Zobrazení toku magnetické indukce a směru magnetického toku při otočené polaritě AlNiCo magnetu (odpínací verze) : a) 0,1 mm , b) 0,5 mm , c) legenda magnetické indukce B



Obr 5-21 Zobrazení absolutní hodnoty magnetického toku ve vzduchové mezeře poloviny systému ve vzdálenosti 0,5 mm při otočené polaritě AlNiCo magnetu

x [mm]	F [N]	B_1 [T]	B_2 [T]	Φ [mWb]
0,1	46,26	0,771	0,399	1,008
0,2	36,46	0,677	0,358	0,91
0,3	29,74	0,606	0,325	0,83
0,4	24,86	0,548	0,298	0,778
0,5	21,17	0,502	0,275	0,728
0,6	18,28	0,463	0,256	0,684
0,7	15,98	0,43	0,24	0,645
0,8	14,11	0,402	0,226	0,612
0,9	12,56	0,377	0,213	0,582
1	11,27	0,355	0,202	0,056
1,5	7,09	0,276	0,16	0,045
2	4,89	0,227	0,133	0,038
3	2,72	0,167	0,099	0,03
5	1,16	0,108	0,066	0,019
10	0,29	0,061	0,036	0,014

Tab. 5-5 Výsledné hodnoty poloviny systému při otočené polaritě AlNiCo magnetu vypočítané metodou konečných prvků programem FEMM



Obr 5-22 Velikost přidržované síly poloviny systému při otočeném AlNiCo magnetu v závislosti na velikosti vzduchové mezery

5.3 reálný magnetický obvod

V této části budeme již uvažovat celkový magnetický obvod s reálnými rozměry. Teoreticky by měla výsledná síla působící na obrobek být stejná jako v předchozím případě polovičního modelu z důvodu jeho dvojnásobné šířky. Zde již uvažujeme šířku magnetického modelu jen 9 mm.

5.3.1 Numerický výpočet

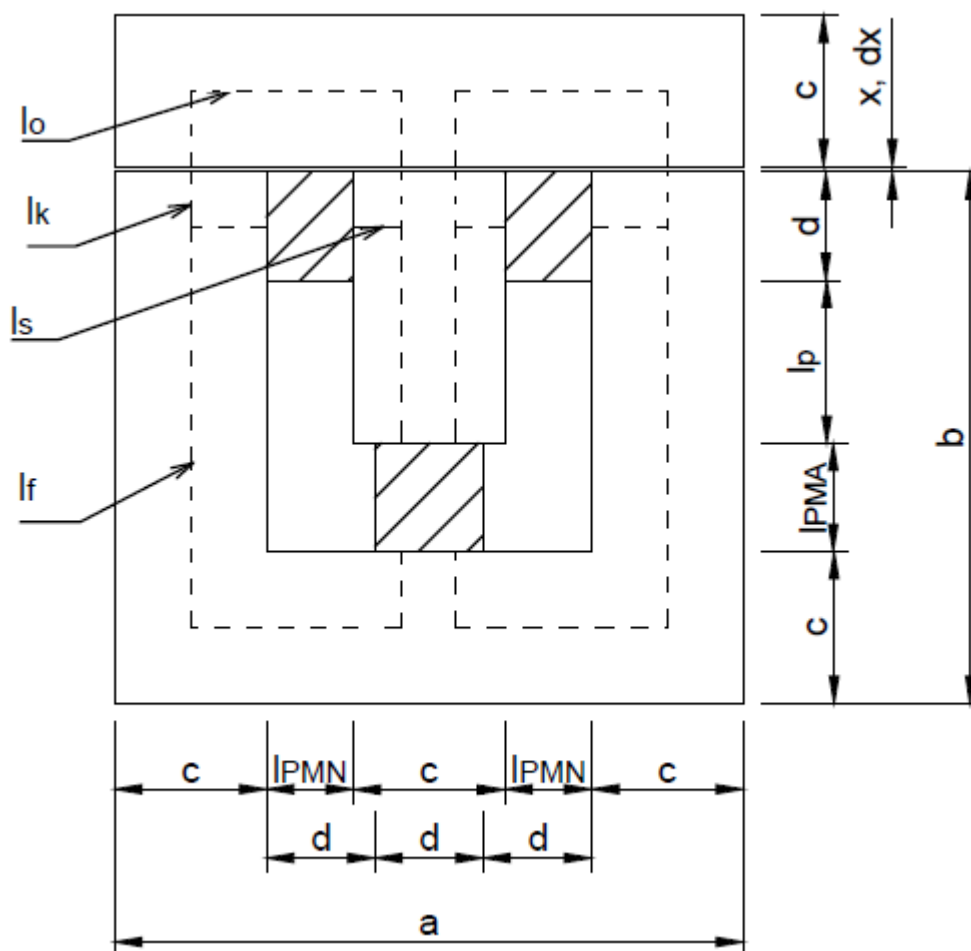
Parametry obvodu : $\delta = x \text{ mm}$, $l_s = 14 \text{ mm}$, $l_k = 14 \text{ mm}$, $l_o = 29 \text{ mm}$, $l_f = 64 \text{ mm}$,

$l_p = 15 \text{ mm}$, $l_{PMA} = 10 \text{ mm}$, $l_{PMN} = 8 \text{ mm}$,

$\mu_{rN} = 1,06$, $\mu_{rA} = 1,5$, $\mu_{ro} = 8000$, $D = 9 \text{ mm}$

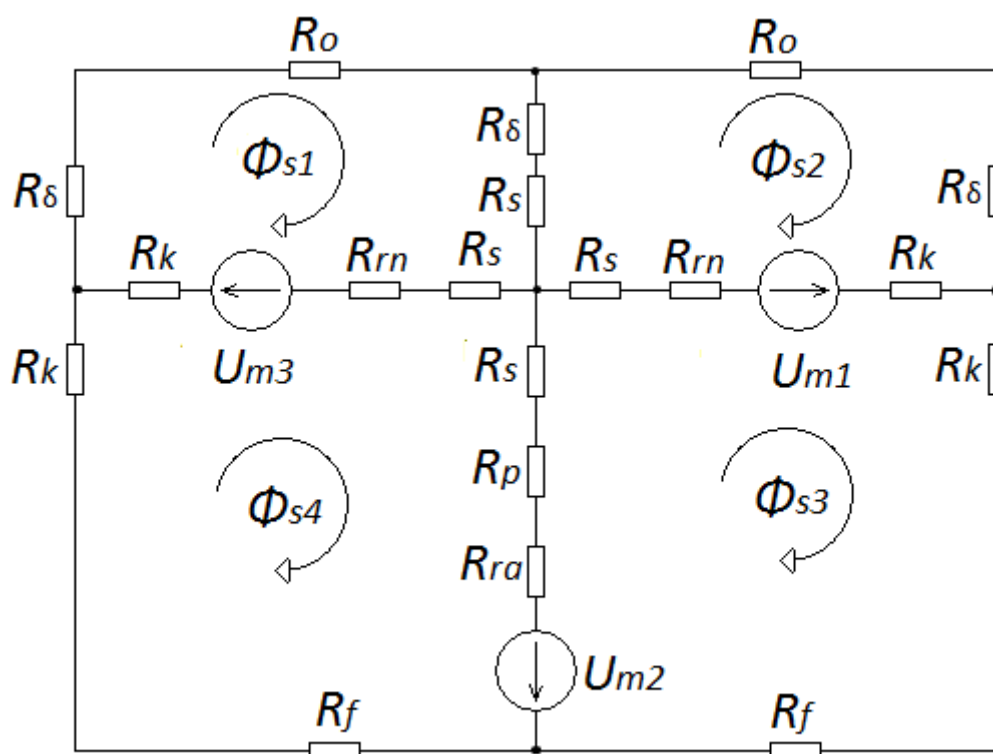
$a = 58 \text{ mm}$, $b = 49 \text{ mm}$, $c = 14 \text{ mm}$, $d = 10 \text{ mm}$,

$H_{cN} = 950000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, $H_{cA} = 50000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$



Obr 5-23 Technická dokumentace celkového magnetického obvodu

Jak lze vidět na Obr 5-24, pro přesnější výsledky numerického modelu byly rozděleny hraniční části magnetického obvodu se vzduchovou mezerou na více stejných magnetických reluktancí. Tímto krokem bereme ohled na to, že procházející magnetický tok se může rozdělit do více směrů a tedy by nebylo vhodné uvažovat tyto části magnetického obvodu jako jeden celek. I když přes svou minimální reluktanci je jen zanedbatelnou částí celkového magnetického odporu.



Obr 5-24 Schéma magnetického obvodu celku

Výpočet magnetického napětí permanentních magnetů podle vzorce (5.1). Oba neodýmové permanentní magnety jsou totožné, proto magnetická napětí U_{m1} a U_{m3} jsou totožné.

$$U_{m1} = U_{m3} = (NI)_{ekviv NdFeB} = -H_c \cdot l_{PMN} = -(-950000) \cdot 0,008 = 7600 \quad (5.71)$$

$$U_{m2} = (NI)_{ekviv AlNiCo} = -H_c \cdot l_{PMA} = -(-50000) \cdot 0,01 = 500 \quad (5.72)$$

Výpočet magnetických reluktancí obvodu a vzduchových mezer pomocí vzorce (5.3). V tomto magnetickém obvodu jsou všechny vzduchové mezery se stejným průřezem, tedy počítáme pouze s jednou reluktancí R_δ .

$$R_\delta = \frac{x}{\mu_0 \cdot S} = \frac{x}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,018} = \frac{x}{3,167 \cdot 10^{-10}} H^{-1} \quad (5.73)$$

$$R_{rn} = \frac{l_{PMN}}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,008}{1,06 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,010 \cdot 0,009} = 66,731 MH^{-1} \quad (5.74)$$

$$R_{ra} = \frac{l_{PMA}}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,01}{1,5 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,010 \cdot 0,009} = 58,946 MH^{-1} \quad (5.75)$$

$$R_p = \frac{l_p}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,015}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,009} = 11,842 kH^{-1} \quad (5.76)$$

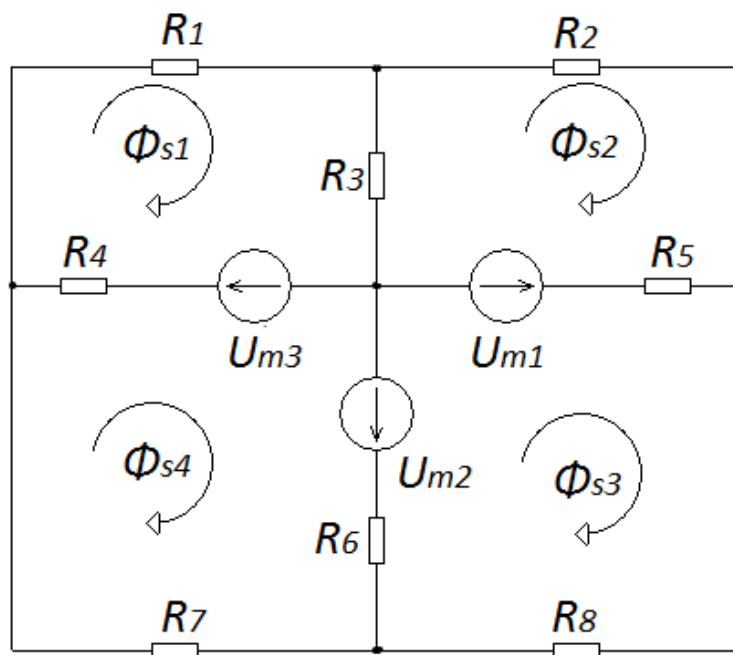
$$R_f = \frac{l_f}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,064}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,009} = 50,525 kH^{-1} \quad (5.77)$$

$$R_s = \frac{l_s}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,007}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,009 \cdot 4} = 1,382 kH^{-1} \quad (5.78)$$

$$R_k = \frac{l_k}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,014}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,009 \cdot 2} = 5,526 kH^{-1} \quad (5.79)$$

$$R_o = \frac{l_o}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{0,058}{8000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,009 \cdot 2} = 22,894 kH^{-1} \quad (5.80)$$

Pro výpočet magnetického toku Φ bude opět nejvýhodnější použít metodu smyčkových proudů (MSP). Zjednodušením obvodu podle Obr 5-25 bude snazší následně vypočítat všechny magnetické toky Φ a následně i celkovou přídržnou sílu F působící na upínaný obrobek neboli kotvu magnetického systému.



Obr 5-25 Zjednodušené schéma magnetického obvodu celku

$$R_1 = R_2 = R_\delta + R_o = \frac{x}{3,167 \cdot 10^{-10}} + 22,894 \cdot 10^3 = \frac{x + 7,251 \cdot 10^{-6}}{3,167 \cdot 10^{-10}} H^{-1} \quad (5.81)$$

$$R_3 = \frac{x}{3,167 \cdot 10^{-10}} H^{-1} \quad (5.82)$$

$$R_4 = R_5 = R_s + R_k + R_{rn} = 66,731 \cdot 10^6 + (1,382 + 5,526) \cdot 10^3 = 66,738 MH^{-1} \quad (5.83)$$

$$R_6 = R_s + R_p + R_{ra} = 58,946 \cdot 10^6 + (1,382 + 11,842) \cdot 10^3 = 58,959 MH^{-1} \quad (5.84)$$

$$R_7 = R_8 = R_f + R_k = (50,525 + 5,526) \cdot 10^3 = 56,051 kH^{-1} \quad (5.85)$$

Sestavením rovnice matic metodou smyčkových proudů (MSP) pro výpočet smyčkových magnetických toků dostaneme pro výpočet matici 4x4.

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_3 + R_4 & -R_3 & 0 & -R_4 \\ -R_3 & R_2 + R_3 + R_5 & -R_5 & 0 \\ 0 & -R_5 & R_5 + R_6 + R_8 & -R_6 \\ -R_4 & 0 & -R_6 & R_4 + R_6 + R_7 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{s1} \\ \Phi_{s2} \\ \Phi_{s3} \\ \Phi_{s4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_{m3} \\ U_{m1} \\ U_{m2} - U_{m1} \\ U_{m3} - U_{m2} \end{bmatrix} \quad (5.86)$$

Dosazení vypočtených hodnot do rovnice (5.86) :

$$\begin{bmatrix} \frac{2 \cdot x + 21,143 \cdot 10^{-3}}{3,167 \cdot 10^{-10}} & -\frac{x}{3,167 \cdot 10^{-10}} & 0 & -66,738 \cdot 10^6 \\ -\frac{x}{3,167 \cdot 10^{-10}} & \frac{2 \cdot x + 21,143 \cdot 10^{-3}}{3,167 \cdot 10^{-10}} & -66,738 \cdot 10^6 & 0 \\ 0 & -66,738 \cdot 10^6 & 125,753 \cdot 10^6 & -58,959 \cdot 10^6 \\ -66,738 \cdot 10^6 & 0 & -58,959 \cdot 10^6 & 125,753 \cdot 10^6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{s1} \\ \Phi_{s2} \\ \Phi_{s3} \\ \Phi_{s4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7600 \\ 7600 \\ -7100 \\ 7100 \end{bmatrix} \quad (5.87)$$

Výsledné hodnoty determinantů pro matici magnetických reluktancí vypočteme obdobně jako u poloviny systému viz. rovnice (5.52) – (5.58) a postupným nahrazováním hodnot z matice magnetických napětí za určité sloupce v matici magnetických reluktancí získáme i determinanty 1-4 pro výpočet smyčkových toků.

$$\Delta = \left(\frac{(249,544 \cdot 10^{15} \cdot x^2 + 150,373 \cdot 10^{13} \cdot x + 507,904 \cdot 10^{10})}{1,003 \cdot 10^{-19}} \right) \quad (5.88)$$

$$\Delta_1 = \left(\frac{-241,92 \cdot 10^{18} \cdot x - 250,489 \cdot 10^{16}}{3,167 \cdot 10^{-10}} \right) \quad (5.89)$$

$$\Delta_2 = \left(\frac{241,92 \cdot 10^{18} \cdot x + 250,489 \cdot 10^{16}}{3,167 \cdot 10^{-10}} \right) \quad (5.90)$$

$$\Delta_3 = \left(\frac{398,999 \cdot 10^{10} \cdot x^2 + 544,287 \cdot 10^6 \cdot x + 226,586 \cdot 10^6}{1,003 \cdot 10^{-19}} \right) \quad (5.91)$$

$$\Delta_4 = \left(\frac{315,277 \cdot 10^{10} \cdot x^2 + 194,86 \cdot 10^8 \cdot x + 172,539 \cdot 10^6}{1,003 \cdot 10^{-19}} \right) \quad (5.92)$$

Výpočet jednotlivých smyčkových magnetických toků z podílů jednotlivých determinantů:

$$\Phi_{s1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-24,265 \cdot x - 251,124 \cdot 10^{-3}}{790,306 \cdot 10^5 \cdot x^2 + 476,231 \cdot 10^3 \cdot x + 1,608 \cdot 10^3} \quad (5.93)$$

$$\Phi_{s2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{24,265 \cdot x + 251,124 \cdot 10^{-3}}{790,306 \cdot 10^5 \cdot x^2 + 476,231 \cdot 10^3 \cdot x + 1,608 \cdot 10^3} \quad (5.94)$$

$$\Phi_{s2} = -\Phi_{s1} \quad (5.95)$$

$$\Phi_{s3} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = 159,891 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 361,958 \cdot 10^{-9} \cdot x + 446,12 \cdot 10^{-7} \quad (5.96)$$

$$\Phi_{s4} = \frac{\Delta_4}{\Delta} = -159,891 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 361,958 \cdot 10^{-9} \cdot x - 446,12 \cdot 10^{-7} \quad (5.97)$$

$$\Phi_{s3} = -\Phi_{s4} \quad (5.98)$$

Nyní je z rovnic (5.95) a (5.98) patrné pravé směry magnetických toků. Magnetické toky Φ_{s1} a Φ_{s2} jsou velikostně totožné jen s opačnou polaritou stejně jako toky Φ_{s3} a Φ_{s4} . Tyto teoretické hodnoty nepočítají s možností působení magnetického toku proti slabšímu AlNiCo magnetu. Toto působení by bylo možno zahrnout do výpočtu s ohledem na výpočet magnetické susceptibility χ_m , která popisuje chování materiálu v magnetickém poli.

Vzorový výpočet všech hodnot pro velikost vzduchové mezery $x = 0,5$ mm.

Velikosti smyčkových magnetických toků Φ_s :

$$\Phi_{s1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-24,265 \cdot 0,0005 - 251,124 \cdot 10^{-3}}{790,306 \cdot 10^5 \cdot 0,0005^2 + 476,231 \cdot 10^3 \cdot 0,0005 + 1,608 \cdot 10^3} \quad (5.99)$$

$$= \frac{-263,356 \cdot 10^{-3}}{1,865 \cdot 10^3} = -1,411 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Phi_{s2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{24,265 \cdot 0,0005 + 251,124 \cdot 10^{-3}}{790,306 \cdot 10^5 \cdot 0,0005^2 + 476,231 \cdot 10^3 \cdot 0,0005 + 1,608 \cdot 10^3} \quad (5.100)$$

$$= \frac{-263,356 \cdot 10^{-3}}{1,865 \cdot 10^3} = 1,411 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Phi_{s3} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = 159,891 \cdot 10^{-7} \cdot 0,0005^2 + 361,958 \cdot 10^{-9} \cdot 0,0005 + 446,12 \quad (5.101)$$

$$\cdot 10^{-7} = 4,46 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}$$

$$\Phi_{s4} = \frac{\Delta_4}{\Delta} = -159,891 \cdot 10^{-7} \cdot 0,0005^2 - 361,958 \cdot 10^{-9} \cdot 0,0005 \quad (5.102)$$

$$- 446,12 \cdot 10^{-7} = -4,46 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}$$

Pro výpočet magnetické indukce B a přídržné síly F , budeme počítat s hodnotami toků Φ_{s1} a Φ_{s2} . Budeme uvažovat, že na krajních sloupcích magnetického obvodu bude indukce B_2 . Střední sloupek obvodu má sice stejný průřez jako krajní, ovšem jsou zde sečteny oba magnetické toky Φ_{s1} a Φ_{s2} a tedy i magnetická indukce B_1 bude dvojnásobná.

$$B_2 = \frac{-\Phi_{s1}}{S} = \frac{\Phi_{s2}}{S} \quad (5.103)$$

$$= \frac{24,265 \cdot 0,0005 + 251,124 \cdot 10^{-3}}{790,306 \cdot 10^5 \cdot 0,0005^2 + 476,231 \cdot 10^3 \cdot 0,0005 + 1,608 \cdot 10^3}$$

$$= \frac{1,411 \cdot 10^{-4}}{(0,014 \cdot 0,009)} = 1,12 \text{ T}$$

$$\Phi_1 = \Phi_{s1} + \Phi_{s2} = 1,411 \cdot 10^{-4} + 1,411 \cdot 10^{-4} = \mathbf{2,822 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}} \quad (5.104)$$

$$B_1 = 2 \cdot B_2 = 2 \cdot 1,12 = \mathbf{2,24 \text{ T}} \quad (5.105)$$

Výpočet energií ve vzduchových mezerách podle vzorce (5.20) :

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{B_1^2}{\mu_0} \cdot S \cdot x = \frac{1}{2} \cdot \frac{2,24^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,014 \cdot 0,009) \cdot 0,0005 \\ &= \mathbf{125,776 \cdot 10^{-3} \text{ J}} \end{aligned} \quad (5.106)$$

$$\begin{aligned} W_2 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{B_2^2}{\mu_0} \cdot S \cdot x = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,12^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,014 \cdot 0,009) \cdot 0,0005 \\ &= \mathbf{31,44 \cdot 10^{-3} \text{ J}} \end{aligned} \quad (5.107)$$

$$W = W_1 + 2 \cdot W_2 = 125,776 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 31,44 \cdot 10^{-3} = \mathbf{188,656 \cdot 10^{-3} \text{ J}} \quad (5.108)$$

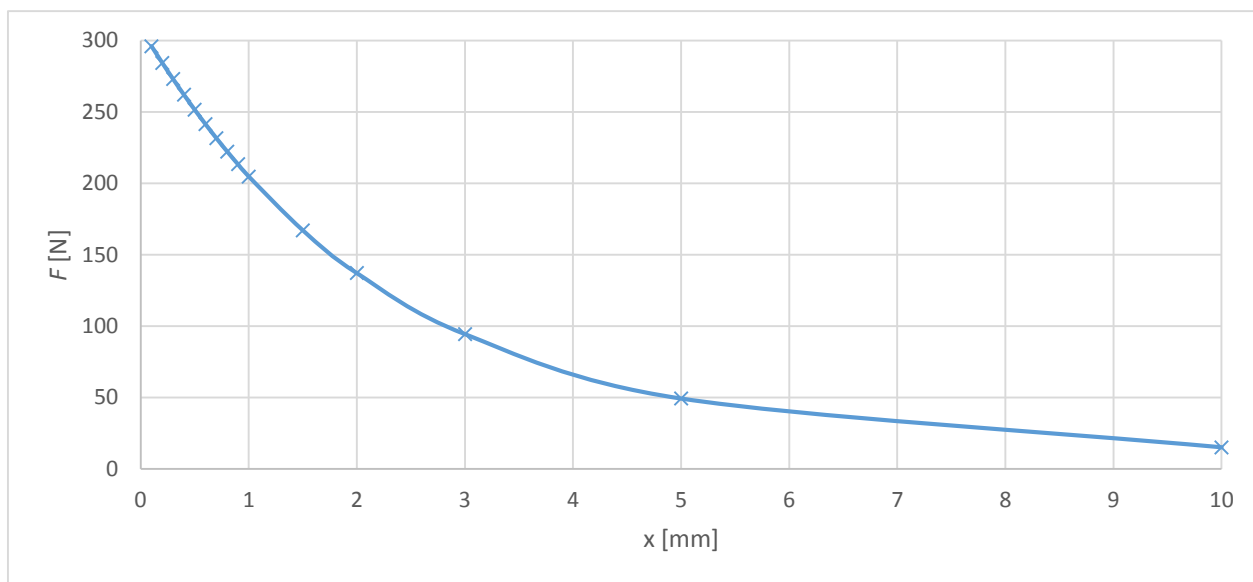
$$\begin{aligned} F &= \frac{\partial W}{\partial \delta} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{B_1^2}{\mu_0} \cdot S \cdot x + 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{B_2^2}{\mu_0} \cdot S \cdot x = \frac{1}{3} \cdot \frac{B_1^2}{\mu_0} \cdot S + 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{B_2^2}{\mu_0} \cdot S \\ &= \frac{1}{3} \cdot \frac{2,24^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,014 \cdot 0,009) + 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1,12^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,014 \cdot 0,009) = \mathbf{251,45 \text{ N}} \end{aligned} \quad (5.109)$$

Výpočet síly z magnetického toku Φ z rovnice (5.62)

$$\begin{aligned} F &\approx \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot S} = - \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{\Phi_1^2}{\mu_0 \cdot S} + 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{\Phi_2^2}{\mu_0 \cdot S} \right) \\ &= - \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{(2,822 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,009} + 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{(1,411 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,014 \cdot 0,009} \right) = \mathbf{251,44 \text{ N}} \end{aligned} \quad (5.110)$$

δ [mm]	F [N]	$B1$ [T]	$B2$ [T]	$\Phi1$ [mWb]	$\Phi2$ [mWb]
0,1	295,97	2,430	1,215	0,306	0,153
0,2	284,24	2,381	1,191	0,300	0,15
0,3	272,91	2,333	1,167	0,294	0,147
0,4	261,98	2,286	1,143	0,288	0,144
0,5	251,45	2,240	1,120	0,282	0,141
0,6	241,32	2,194	1,097	0,276	0,138
0,7	231,58	2,149	1,075	0,271	0,135
0,8	222,24	2,105	1,053	0,265	0,133
0,9	213,28	2,063	1,031	0,259	0,13
1	204,70	2,021	1,010	0,255	0,127
1,5	167,05	1,825	0,913	0,230	0,115
2	137,07	1,653	0,827	0,208	0,104
3	94,35	1,372	0,686	0,173	0,086
5	49,25	0,991	0,496	0,125	0,062
10	15,12	0,549	0,275	0,069	0,035

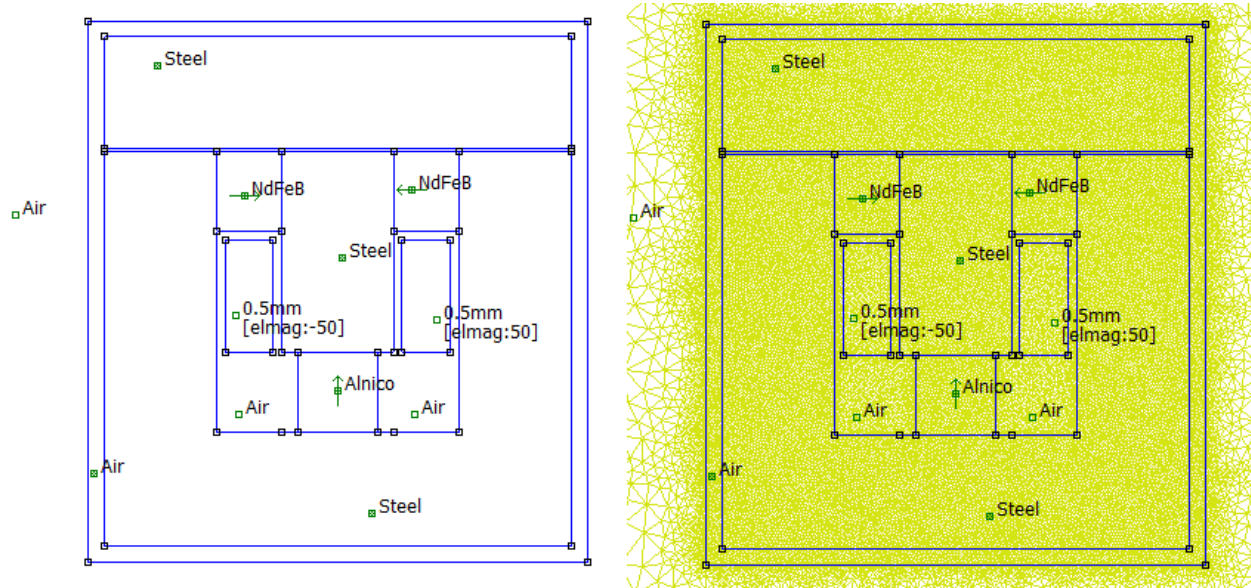
Tab. 5-6 Tabulka vypočtených hodnot celého systému



Obr 5-26 Vypočtená závislost přídržné síly celého systému na velikosti vzduchové mezery

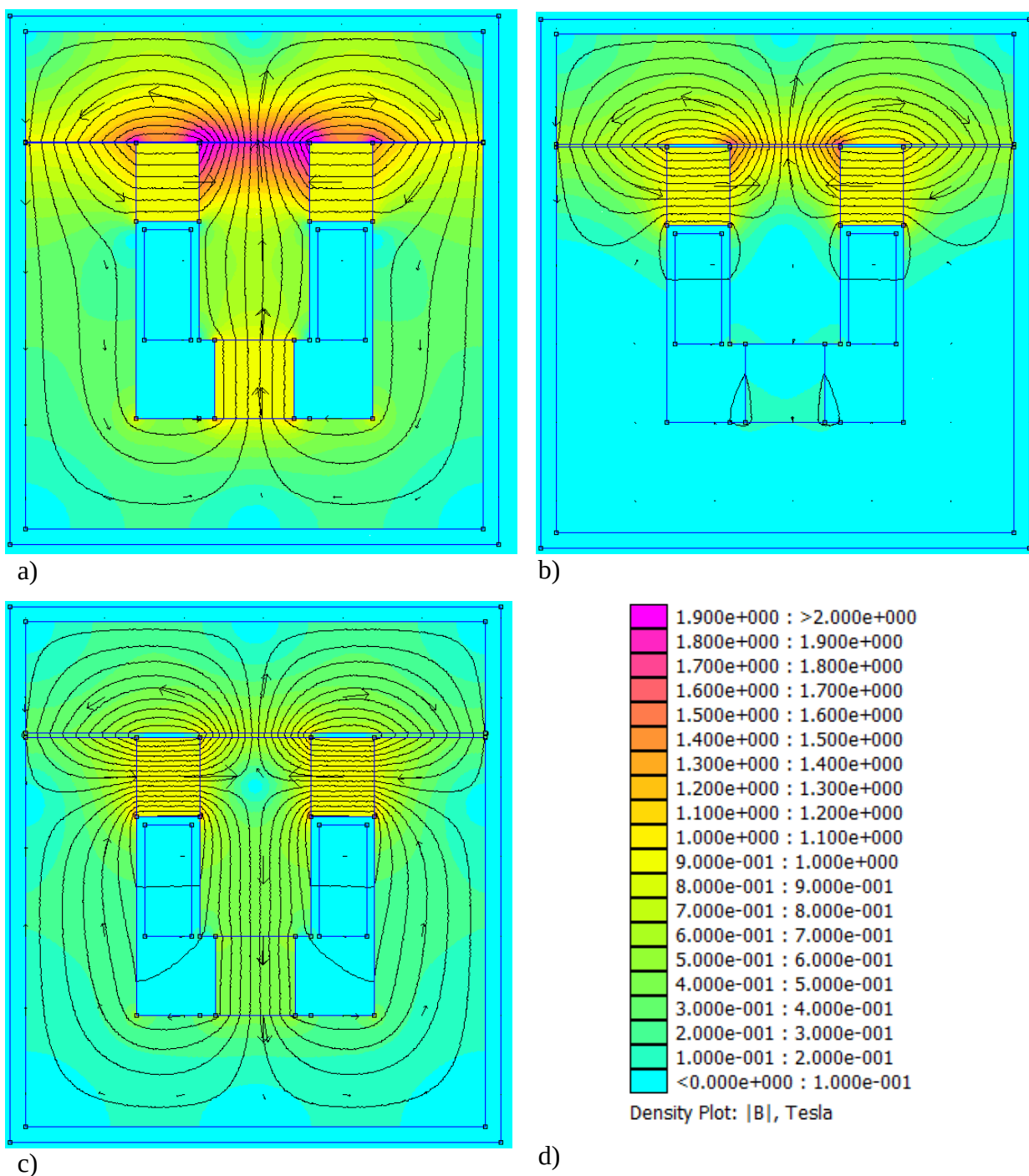
5.3.2 Analytický model

V celkovém modelu je již možno zahrnout i elektromagnet nacházející se v okně magnetického obvodu. Pomocí proudového pulsu procházejícím cívku elektromagnetu bude následně prováděna změna polarizace permanentního magnetu AlNiCo.

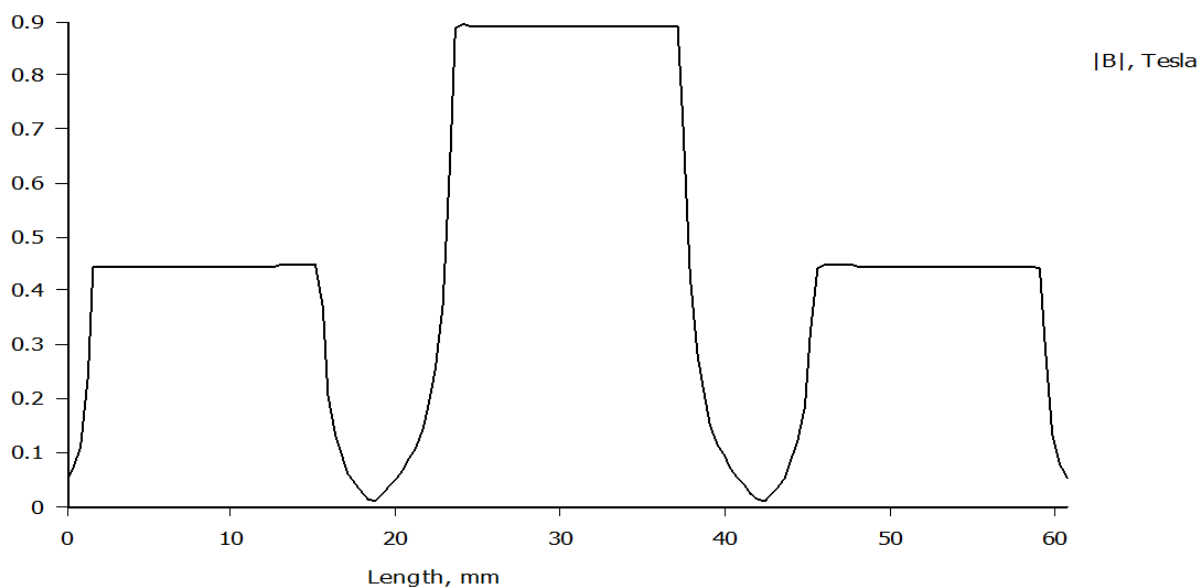


Obr 5-27 Vytvoření celkového modelu v programu FEMM

Na následujícím obrázku lze vidět postupná demagnetizace a otočení polarizace permanentního magnetu AlNiCo. Tato změna polarizace je způsobena působením obou NdFeB magnetů proti směru polarizace AlNiCo magnetu. Tímto důvodem je působení mechanické energie proti magnetickému toku systému, který se následně uzavírá ve vlastním magnetickém systému místo přes upínaný obrobek.



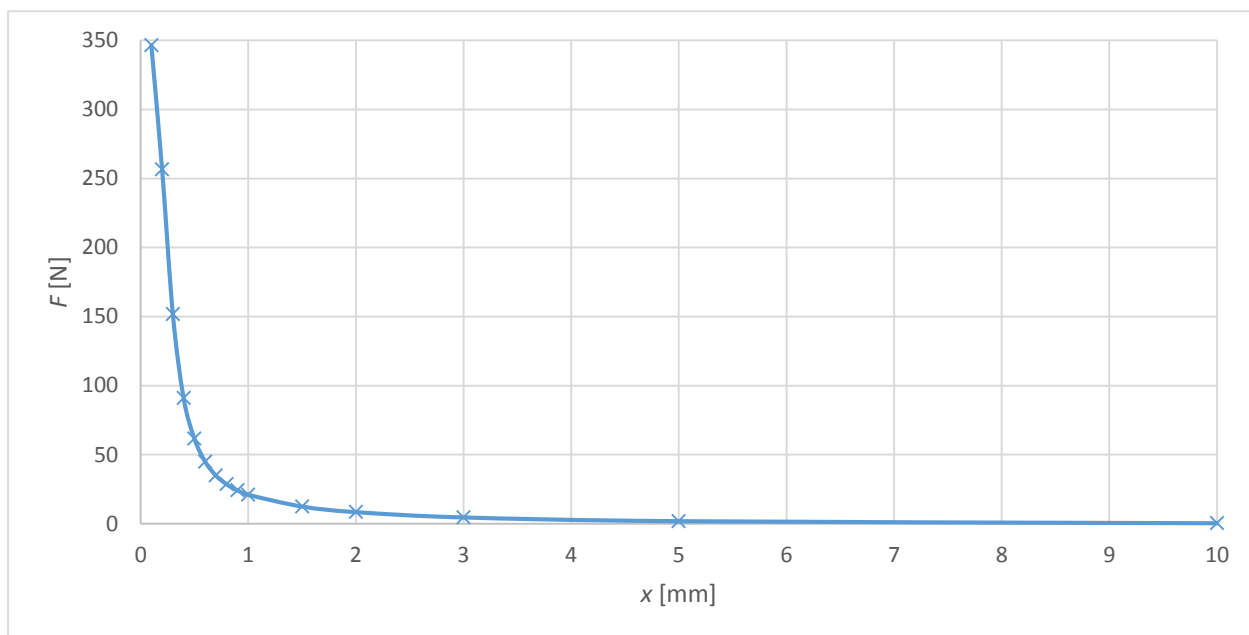
Obr 5-28 Zobrazení toku magnetické indukce a směru toku při postupném oddalování obrobku ve finálním (celkovém) provedení: a) 0,1 mm , b) 0,3 mm , c) 0,5 mm , d) legenda magnetické indukce B



Obr 5-29 Zobrazení absolutní hodnoty magnetického toku ve vzduchové mezeře celého systému ve vzdálenosti 0,5 mm

δ [mm]	F [N]	B_1 [T]	B_2 [T]	Φ_1 [mWb]	Φ_2 [mWb]
0,1	346,59	2,066	1,088	0,277	0,14
0,2	256,75	1,805	0,923	0,244	0,121
0,3	151,8	1,407	0,705	0,191	0,093
0,4	91,02	1,082	0,541	0,149	0,072
0,5	61,78	0,89	0,444	0,124	0,06
0,6	45,06	0,759	0,371	0,107	0,052
0,7	34,98	0,668	0,332	0,095	0,045
0,8	28,644	0,604	0,299	0,087	0,041
0,9	24,24	0,555	0,274	0,08	0,038
1	21,08	0,517	0,254	0,076	0,035
1,5	12,55	0,399	0,193	0,06	0,027
2	8,5	0,329	0,156	0,051	0,022
3	4,65	0,246	0,112	0,039	0,016
5	1,94	0,166	0,07	0,026	0,01
10	0,45	0,091	0,034	0,014	0,005

Tab. 5-7 Výsledné hodnoty celého systému vypočítané metodou konečných prvků programem FEMM



Obr 5-30 Velikost přidržené síly celého systému v závislosti na velikosti vzduchové mezeře

Podle Obr 5-29 lze vidět, že magnetická indukce B ve vzduchové mezeře je dvojnásobná nad středním sloupkem magnetického systému než nad krajními.

Na Obr 5-30 o velikosti celkové přidržené síly je patrná značná strmá poklesu maximální síly. To je způsobeno postupnou změnou polarizace AlNiCo magnetu, takže přibližně nad 0,5 mm spíše ubírá, než přispívá vlastním tokem k celkové přidržené síle.

Díky změně polarity AlNiCo magnetu velmi je nepřesné porovnávat hodnoty magnetického toku vypočtené a získané z FEMMu pro vzduchovou mezeru $x = 0,5$ mm. Následné hodnoty budou tedy porovnány pro $x = 0,1$ mm, kde se ještě systém chová podle vypočteného předpokladu.

$$\Phi_{FEMM} = 1,404 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} \quad \Phi_{vypočtená} = 1,531 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} \quad (5.111)$$

Porovnání hodnoty magnetické indukce B vypočtené a získané z FEMMu pro vzduchovou mezeru $x = 0,1$ mm.

$$B_{1 FEMM} = 2,066 \text{ T} \quad B_{1 vypočtená} = 2,43 \text{ T} \quad (5.112)$$

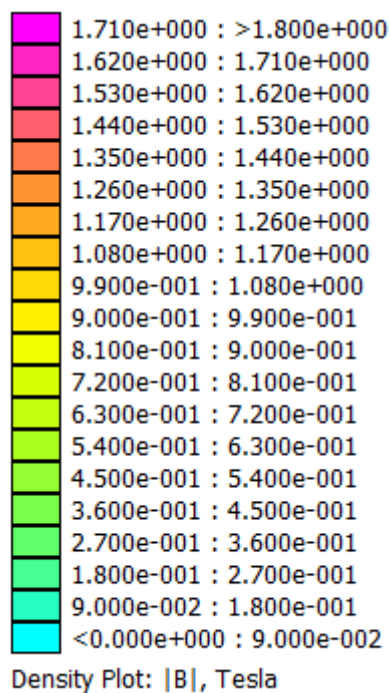
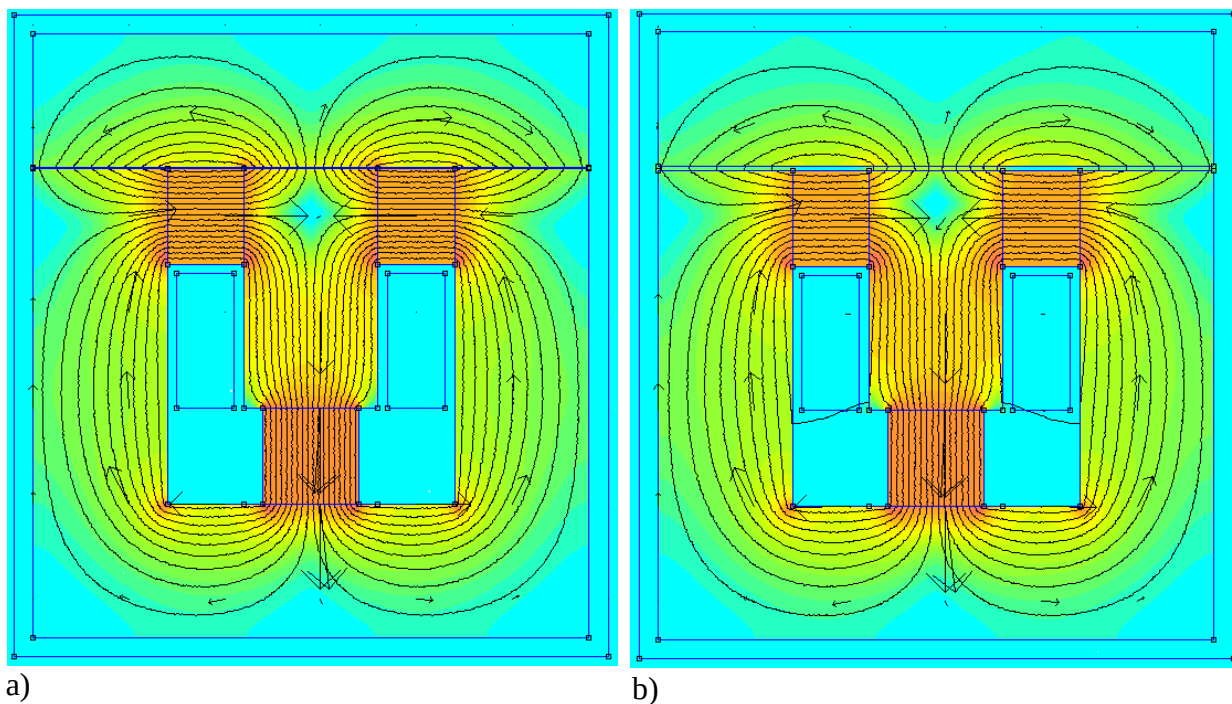
$$B_{2 FEMM} = 1,088 \text{ T} \quad B_{2 vypočtená} = 1,215 \text{ T}$$

Porovnání hodnoty energie ve vzduchové mezeře W vypočtené a získané metodou konečných prvků z FEMMu pro vzduchovou mezeru $x = 0,1$ mm.

$$W_{FEMM} = 34,85 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad W_{vypočtená} = 29,597 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad (5.113)$$

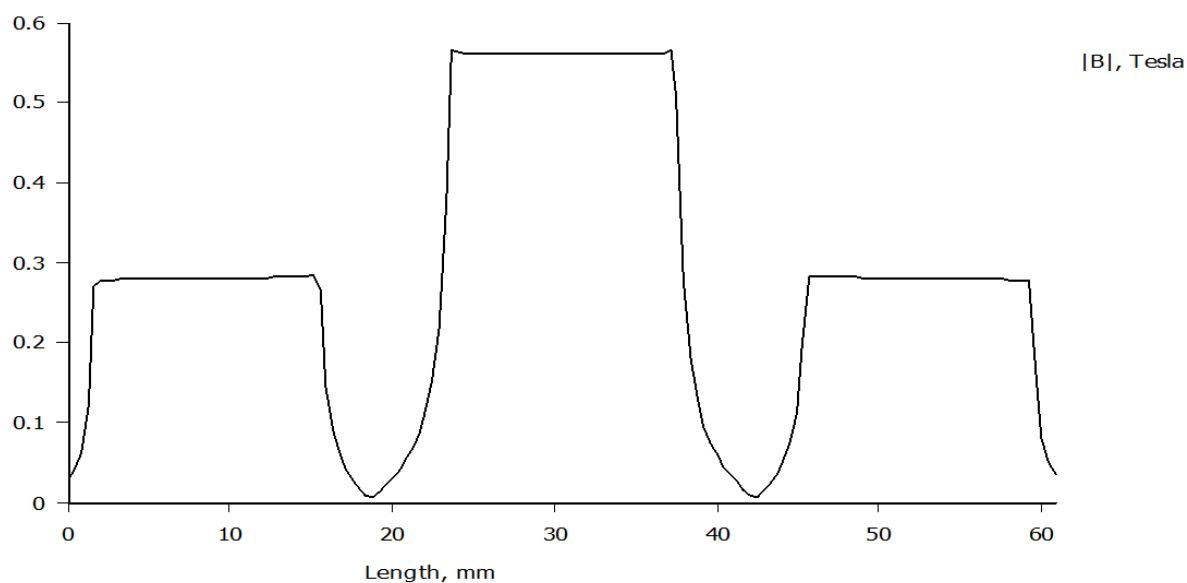
Odepínací verze celého systému:

V této části uvažujeme, že permanentní magnet AlNiCo má otočenou polaritu, tedy síla by měla být dostatečně malá na to, aby se obrobek dal jednodušeji odejmout.



c)

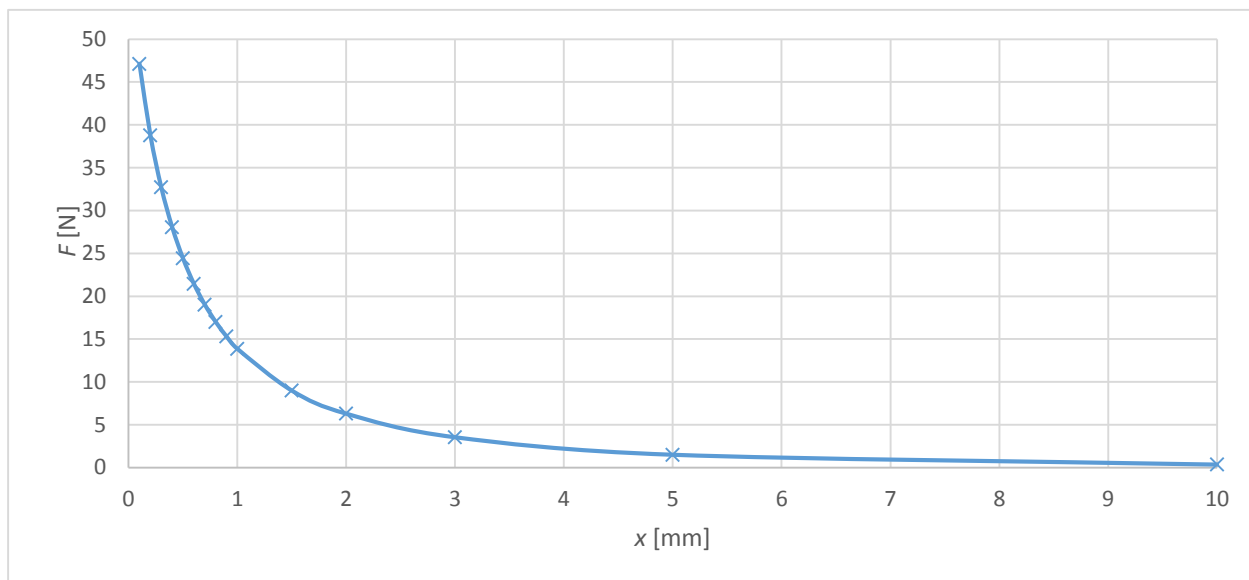
Obr 5-31 Zobrazení magnetické indukce při otočené polaritě AlNiCo magnetu a oddalování obrobku : a) 0,1 mm , b) 0,5 mm , c) legenda intenzity magnetické indukce B



Obr 5-32 Zobrazení absolutní hodnoty magnetického toku ve vzduchové mezeře celého systému při otočené polaritě AlNiCo magnetu ve vzdálenosti 0,5 mm

x [mm]	F [N]	B_1 [T]	B_2 [T]	Φ_1 [mWb]	Φ_2 [mWb]
0,1	47,11	0,79	0,398	0,102	0,051
0,2	38,79	0,71	0,358	0,093	0,046
0,3	32,71	0,651	0,326	0,087	0,043
0,4	28,07	0,6	0,3	0,082	0,04
0,5	24,41	0,56	0,279	0,078	0,037
0,6	21,45	0,524	0,261	0,074	0,035
0,7	19,02	0,492	0,245	0,069	0,033
0,8	17,01	0,465	0,23	0,067	0,031
0,9	15,3	0,441	0,218	0,064	0,029
1	13,85	0,419	0,206	0,061	0,028
1,5	8,98	0,337	0,163	0,051	0,023
2	6,29	0,283	0,134	0,044	0,019
3	3,54	0,215	0,098	0,034	0,014
5	1,5	0,146	0,062	0,023	0,009
10	0,35	0,079	0,029	0,013	0,004

Tab. 5-8 Výsledné hodnoty celého systému při otočené polaritě AlNiCo magnetu vypočítané metodou konečných prvků programem FEMM



Obr 5-33 Velikost přidržované síly celého systému při otočené polaritě AlNiCo magnetu v závislosti na velikosti vzduchové mezery

I vzhledem k otočenému AlNiCo magnetu, kdy by měla být přidržná síla co nejmenší je při vzduchové mezeře $x = 0,1$ mm stále síla působící na obrobek 47,11 N. Tato zbytková síla je způsobena jednou zásadním faktem a tím jsou rozměry AlNiCo magnetu. Analytický model jako i výpočty jsou vztaženy k parametrům a rozměrům vyrobeného praktického vzorku tohoto navrženého segmentu. Jelikož se mi povedlo koupit pouze váleček AlNiCo magnetu 10x10 mm byly tyto rozměry i přizpůsobeny modelu. Ten, jak je vidno na Obr. 5-31 a) je zatížen velkou magnetickou indukcí B a, systém neplní svou funkci jak nejlépe by mohl. Například pokud-li zvětšíme šířku AlNiCo magnetu na stejné rozměry jako má střední sloupek magnetického obvodu, klesne výsledná síla na $F = 16,87$ N.

5.4 Výpočet elektromagnetu

Změna polarizace:

Pro výpočet potřebného proudu pro změnu polarity permanentního magnetu AlNiCo je nutno prvně spočítat počet závitů kdyby obvod sloupku byl 1 m. Tedy počet skutečných závitů za obvod jednoho závitu cívky. Následně se vypočte velikost potřebného proudu z hodnoty koercitivní síly H_c AlNiCo magnetu. Pro výrobu cívky elektromagnetu byl použit měděný drát o průměru 0,5 mm. Bereme v potaz, že obvod cívky elektromagnetu není přesně 0,05 m, ale z důvodu obdélníkového průřezu bereme v potaz i činitel plnění železa a mědi jako $k_p = 1,087$.

$$n = \frac{N}{o} = \frac{N}{(2 \cdot c + 2 \cdot D) \cdot k_p} = \frac{50}{(2 \cdot 0,014 + 2 \cdot 0,009) \cdot 1,087} \cong \frac{50}{0,05} = 1000 \text{ } ^z/m \quad (5.114)$$

$$H_c = n \cdot I \rightarrow I = \frac{H_c}{n} = \frac{50000}{1000} = 50 \text{ A} \quad (5.115)$$

Proudová hustota:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{50}{\pi \cdot 0,25^2} = 254,65 \text{ A/mm}^2 \quad (5.116)$$

Tavení mědi:

Nyní si spočteme čas, po který může být elektromagnet napájen s touto proudovou hustotou, než se začne vlivem vysoké teploty tavit. Protože pro změnu polarity stačí pouze proudový impuls, čas, po který prochází proud tímto elektromagnetem by neměl překročit tuto hodnotu.

Teplo potřebné pro tavení mědi je $Q_t = 682,5 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$

$$Q_t = \frac{I \cdot t}{S} \rightarrow t = \frac{Q \cdot S}{I} = \frac{682,5 \cdot \pi \cdot 0,25^2}{50} = 2,68 \text{ s} \quad (5.117)$$

Nyní si spočteme vlastní parametry cívky elektromagnetu a následně i napětí, nutné pro vytvoření žádaného proudu $I = 50 \text{ A}$:

$$\rho_{Cu} = 0,0169 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1} \quad (5.118)$$

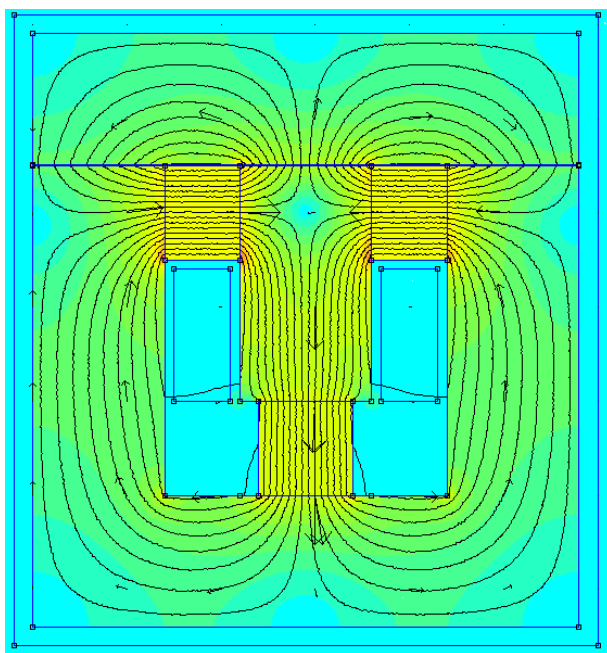
$$r_{elmag} = 9 \text{ mm} \rightarrow S = \pi \cdot r^2 = 254,47 \text{ mm}^2 \quad (5.119)$$

$$\rightarrow o = 2 \cdot \pi \cdot r = 56,55 \text{ mm}$$

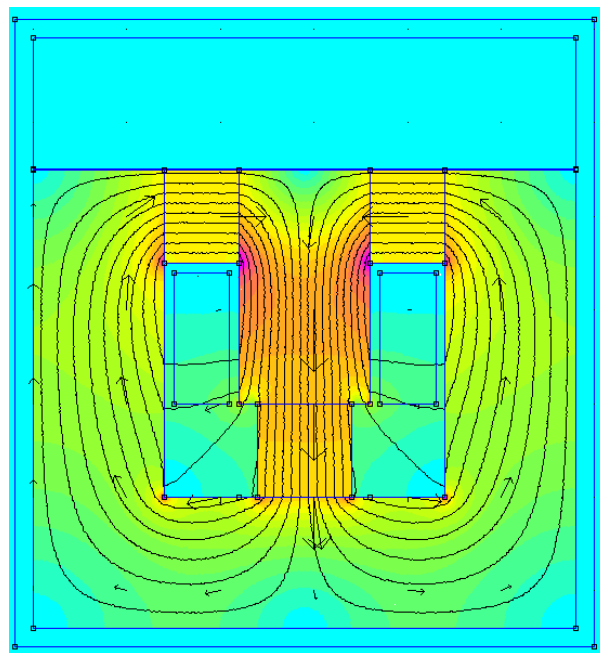
$$l = o \cdot N = 56,55 \cdot 50 = 2827,5 \text{ mm} = 2,8275 \text{ m} \quad (5.120)$$

$$R = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{S} = 0,0169 \cdot \frac{2,8275}{\pi \cdot 0,25^2} = 0,243 \text{ } \Omega \quad (5.121)$$

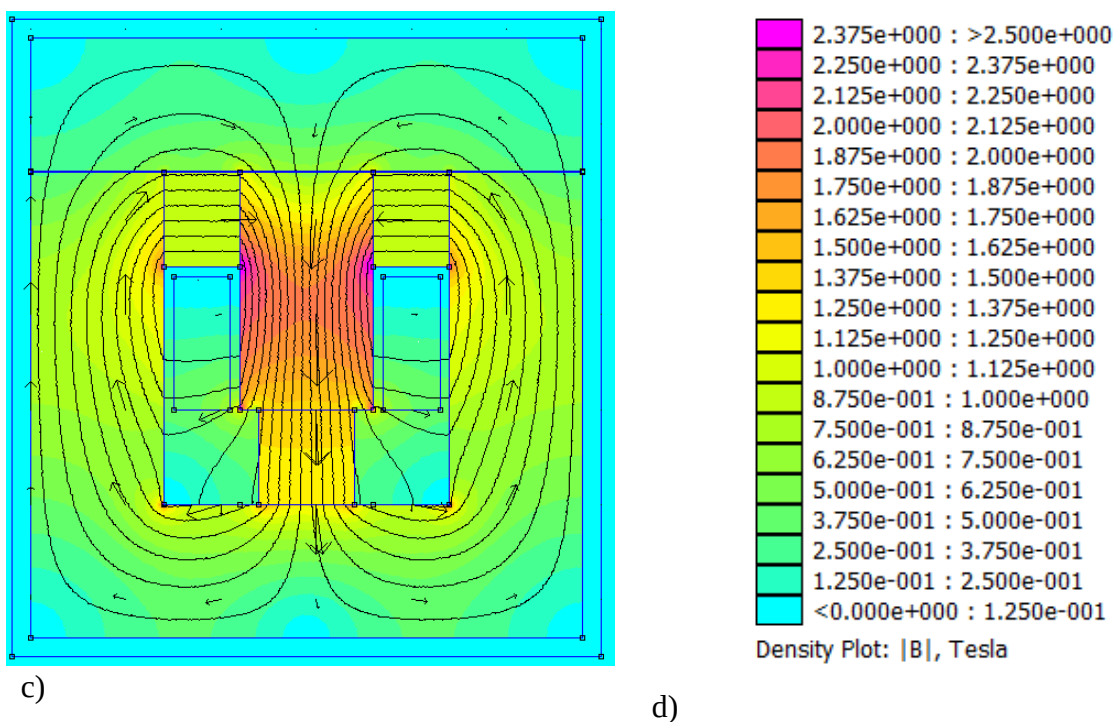
$$U = I \cdot R = 50 \cdot 0,243 = 12,15 \text{ V} \quad (5.122)$$



a)



b)



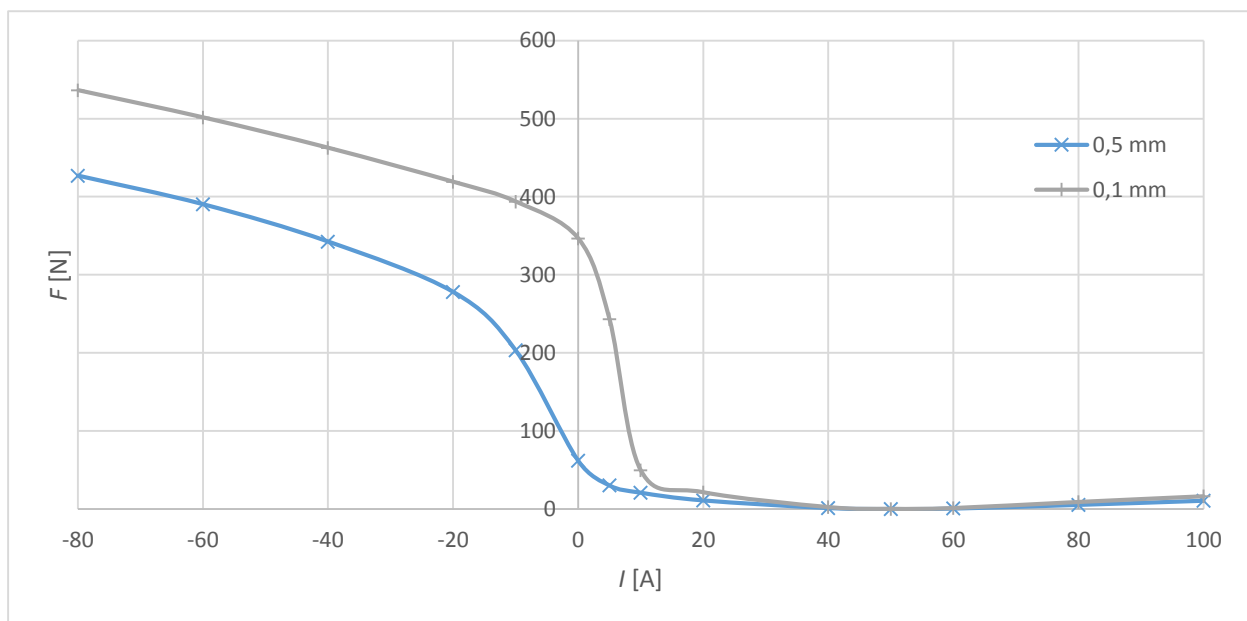
Obr 5-34 Zobrazení magnetické indukce systému, při průchodu proudem elektromagnetem :
a) 10 A , b) 50 A , c) 100A , d) legenda magnetické indukce B

Následující tabulka popisuje sílu, působící na upínaný obrobek za působení průchodu proudem elektromagnetem. Jak lze vidět, proudem opačné polarizace proudů můžeme zvýšit výslednou sílu magnetického systému.

I [A]	F [N]	
	x = 0,5 mm	x = 0,1 mm
-80	426,87	536,46
-60	390,25	501,61
-40	342,47	462,7
-20	277,98	419,11
-10	203,14	393,82
0	61,78	346,59
5	30,18	243,14
10	20,88	49,45
20	11,01	21,32
40	1,23	2,3
50	0,01	0,03
60	0,57	1,01
80	5,32	8,82
100	10,59	16,11

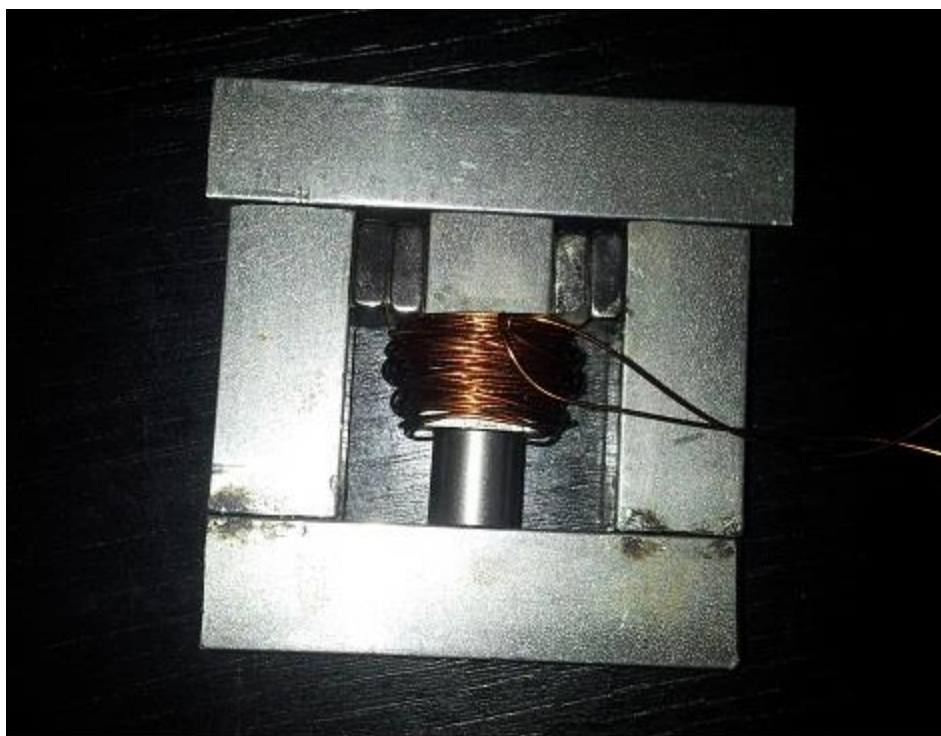
Tab. 5-9 Výsledná síla působící na upínaný obrobek za působení elektromagnetu

Protože použité materiály pro výpočet modelu ve FEMMu mají vlastní nelineární charakteristiku. Lze pozorovat při působení proudu větším jak 30 A v opačném směru silné přesycení ocelového jádra magnetického systému a dále již jen malý nárůst výsledné síly na obrobek.



Obr 5-35 Velikost přídržné síly v závislosti na velikosti proudu elektromagnetu

5.5 Měření výsledků pomocí reálného experimentálního modelu



Obr 5-36 Praktický model navrženého segmentu upínacího systému

Použité materiály pro výrobu :

4x permanentní magnet – NdFeB 37 10x10x4 mm

1x permanentní magnet – AlNiCo 5 válec 10x10 mm

1x elektromagnet – Cu drát průřezu 0,5 mm , 50 závitů

Magnetické jádro – Vysokopevnostní nízkouhlíková ocel - $\mu_r = 8000$

Spoje mezi ocelovými díly a permanentními magnety byly slepeny silným lepidlem na ložiska Loctite 577. Vzhledem k vzduchovým mezerám vzniklým při nepřesném opracování ocelových částí přibýly v magnetickém obvodu další reluktance příslušné těmto vzduchovým mezerám a tedy i výsledné hodnoty byly o tuto chybu zkresleny.

Měření probíhalo v dílnách UVEE na FEKT VUT v Brně. Zde je k dispozici pouze napájecí zdroj s maximálním odebíraným proudem 30A. Aby bylo dosaženo přibližně proudu 50A potřebného pro magnetizaci AlNiCo magnetu na požadovanou polaritu, proudový puls byl dodán paralelním zapojením nabitého kondenzátoru o kapacitě $8800\ \mu F$ nabitý přibližně na 35V viz. Obr 5-37.



a)



b)

Obr 5-37 a) Použitý kondenzátor , b) Průběh napájení vytvořeného upínacího systému

Vlastní měření bylo následně provedeno siloměrem na upnutém výrobku ve svěráku viz. Obr. 5-38 . Po každém prvním odtržení se demagnetizoval AlNiCo magnet a bylo nutno pro nové měření znova zpolarizovat tento magnet novým proudovým pulsem.



Obr 5-38 Měření upínací síly

V tabulkách *Tab. 5-10* a *Tab. 5-11* je z naměřených hodnot na reálném modelu vidět, vždy po polarizaci proudovým pulsem, bylo vždy efektivní pouze první odtrhnutí. Z naměřených hodnot pracovní verze magnetického systému viz. *Tab. 5-10* se po změření upínací síly a odtržení upínaného obrobku se demagnetizoval magnet AlNiCo vlivem působení neodýmového magnetu proti němu. Další měření na odtrhnutí 2 – 5 se přídržná síla již moc nemění a má poloviční velikost než při prvním odtrhnutí. Pro získání přesnější hodnoty získané z praktického měření bude pro pracovní i odpínací stav upínacího systému vypočten průměr z hodnot prvního odtrhnutí.

$F [N]$	pracovní			
měření	č.1	č.2	č.3	č.4
odtrhnutí 1	220	200	190	220
odtrhnutí 2	106	120	87	120
odtrhnutí 3	105	98	80	141
odtrhnutí 4	102	107	88	101
odtrhnutí 5	104	51	87	98

Tab. 5-10 Naměřené hodnoty pro pracovní verzi

$$F_p = \frac{\text{č. 1} + \text{č. 2} + \text{č. 3} + \text{č. 4}}{n} = \frac{220 + 200 + 190 + 220}{4} = 207,5 \text{ N} \quad (5.123)$$

$F [N]$	odpínací			
měření	č.1	č.2	č.3	č.4
odtrhnutí 1	68	62	57	68
odtrhnutí 2	72	58	65	75
odtrhnutí 3	80	65	63	63
odtrhnutí 4	48	62	70	50
odtrhnutí 5	65	60	60	56

Tab. 5-11 Naměřené hodnoty pro odpínací verzi

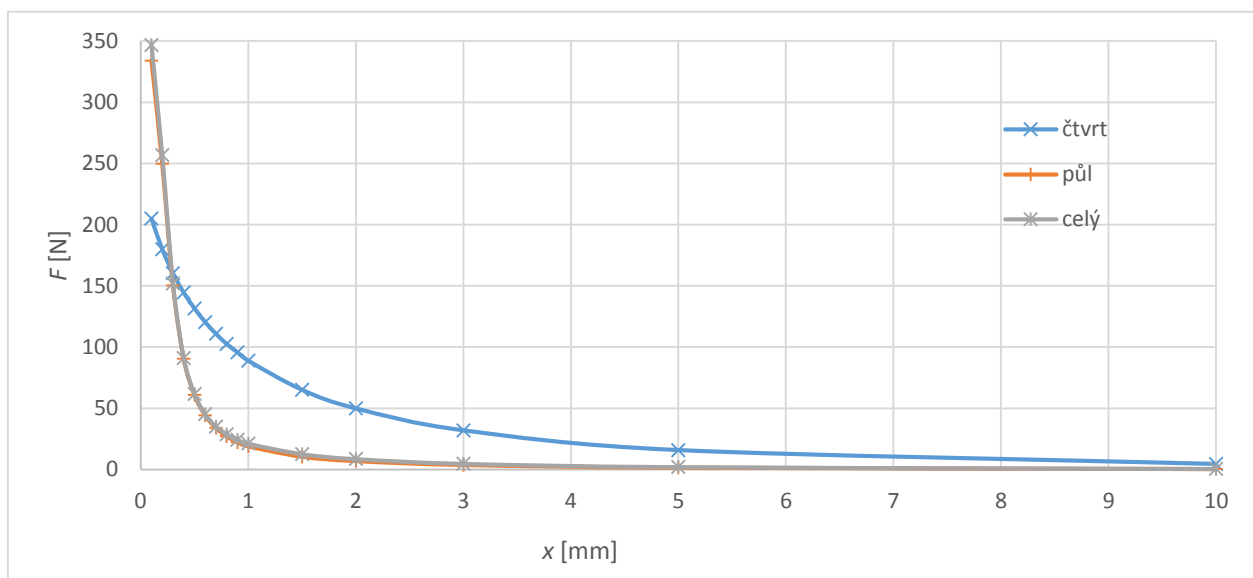
$$F_0 = \frac{\text{č. 1} + \text{č. 2} + \text{č. 3} + \text{č. 4}}{n} = \frac{68 + 62 + 57 + 68}{4} = 63,75 \text{ N} \quad (5.124)$$

5.6 Přehled výsledků a zhodnocení

V této kapitole bude provedeno zhodnocení všech dílčích výsledků vypočtených numerickou metodou a analytickým návrhem v programu FEMM. V následující tabulce Tab. 5-12 je znázorněn rozdíl mezi vypočtenými a hodnotami z programu FEMM při vzduchové mezeře $x = 0,5$ mm pro čtvrtinu, polovinu a celý systém. Určité odlišnosti jsou způsobeny uvažováním lineárních charakteristik u výpočtů provedených numerickou metodou a zaokrouhlováním dílčích výsledků na tři platná místa.

	porovnání pro vzduchovou mezeru $x = 0,5$ mm					
	čtvrtina		polovina		celý	
	vypočítaný	FEMM	vypočítaný	FEMM	vypočítaný	FEMM
Φ [mWb]	0,199	0,187	0,193	0,125	0,141	0,124
$B1$ [T]	1,579	1,241	1,533	0,85	2,24	0,89
$B2$ [T]	0,789	0,692	0,767	0,464	1,12	0,444
W [J]	0,094	0,072	0,088	0,033	0,141	0,032
F [N]	187,43	131,52	176,75	60,77	282,88	61,78

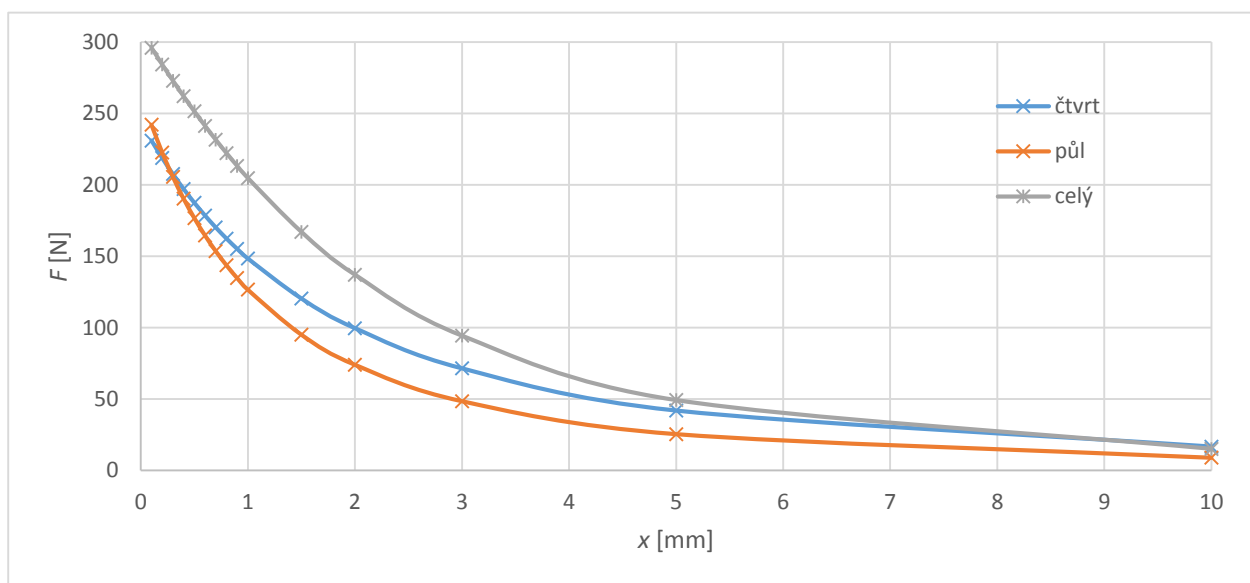
Tab. 5-12 Porovnání všech hodnot vypočtených a získaných z modelu pro vzduchovou mezeru $x = 0,5$ mm



Obr 5-39 Porovnání výsledných sil získaných z FEMMu metodou konečných prvků pro všechny uvažované případy

Na Obr 5-39 lze vidět značná odlišnost výsledné síly čtvrtiny systému od uvažované poloviny i celku magnetického systému. Tato odlišnost je způsobena chybějícím magnetem AlNiCo, který způsobí větší strmost křivky do vzdálenosti $x = 0,5$ mm obrobku od upínacího systému změnou vlastní polarity.

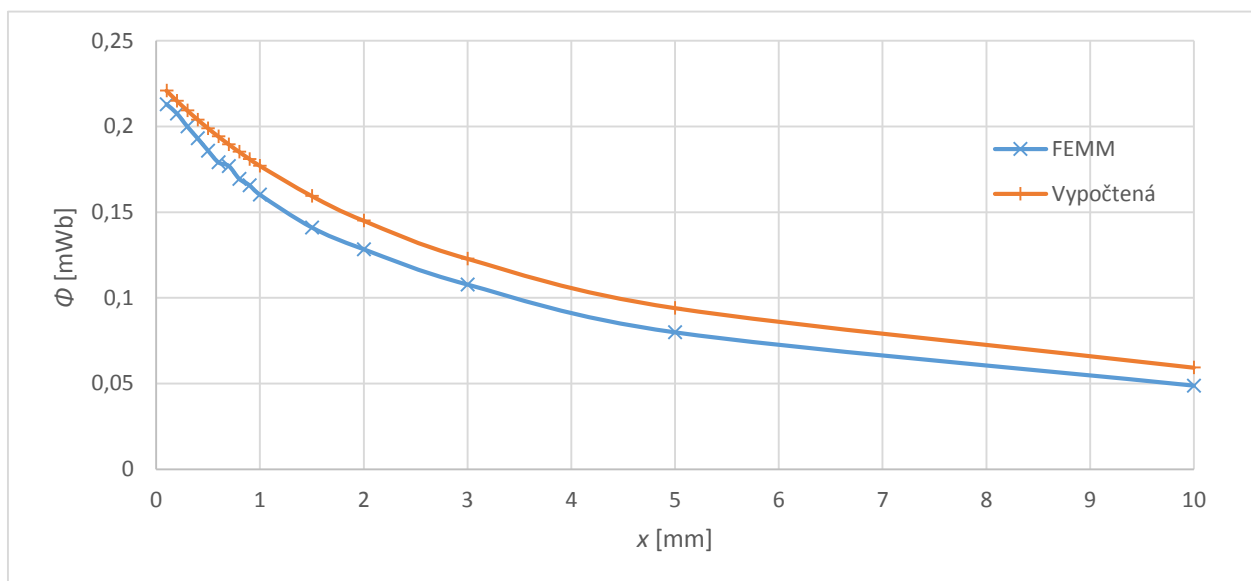
Na Obr 5-40 lze vidět že výpočty pro všechny uvažované případy je téměř totožný. Vzniklé odlišnosti jsou způsobeny zaokrouhlováním mezivýpočtů. Při řešení numerickou metodou jsou uvažovány všechny parametry jako lineární a tudíž má křivka výsledné síly menší strmost než u výsledků získaných analytickou metodou.



Obr 5-40 Porovnání výsledných sil získaných numerickým výpočtem pro všechny uvažované případy

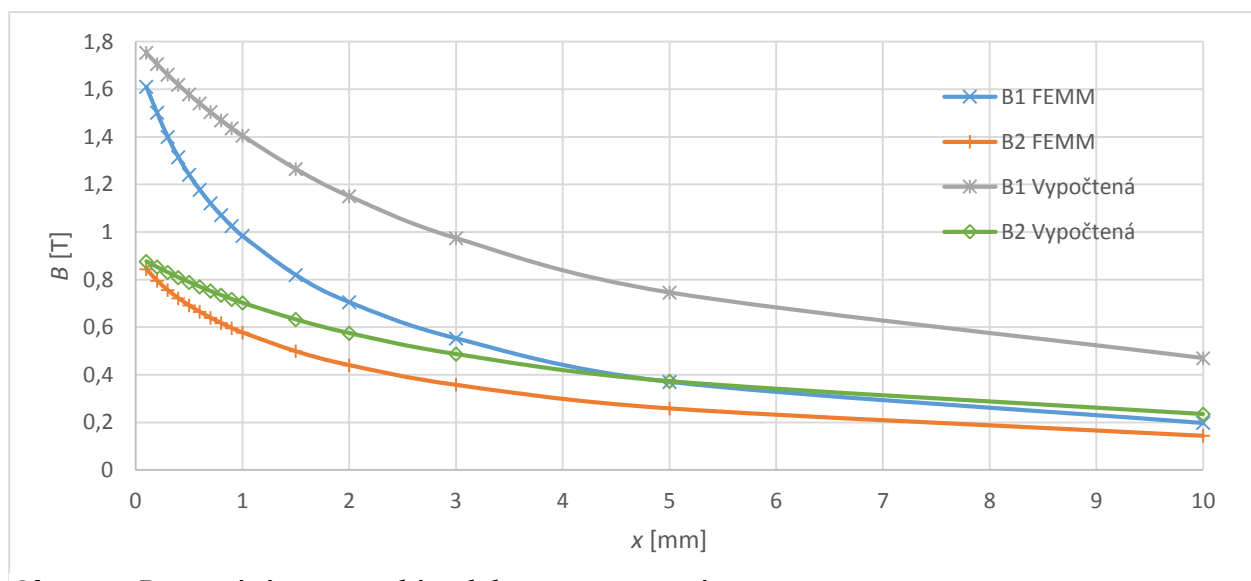
Nyní se zaměříme podrobněji na hodnoty pouze čtvrtiny magnetického obvodu s postupným porovnáváním všech mezivýsledků numerické a analytické metody v následujících grafech.

Na Obr 5-41 jsou porovnány hodnoty magnetického toku Φ . Je zde patrná odlišnost již u magnetického toku Φ mezi oběma křivkami. To znamená minimálně stejnou nepřesnost i u dalších výpočtů, protože magnetický tok B i výsledná síla F se počítají z této hodnoty.



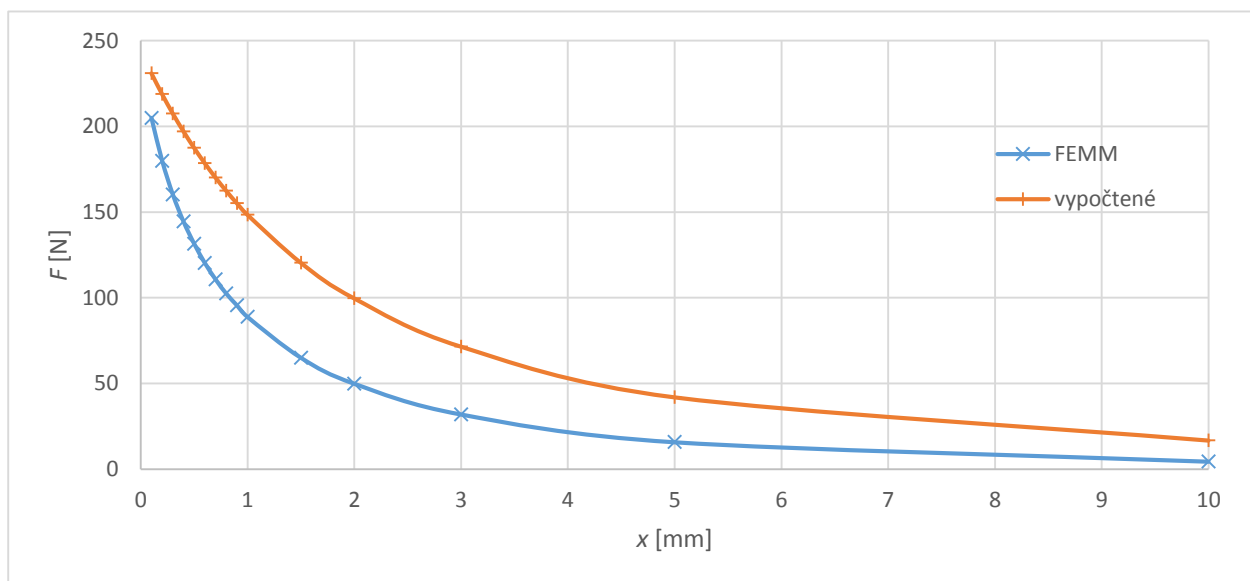
Obr 5-41 Porovnání magnetického toku čtvrtiny systému

Na Obr 5-42 je již vidět větší nepřesnost magnetické indukce B mezi hodnotami vypočtenými a naměřených na modelu ve FEMMu. Na hodnotách z analytického měření je patrná exponenciální závislost způsobená nelineárními charakteristikami použité oceli.



Obr 5-42 Porovnání magnetické indukce čtvrtiny systému

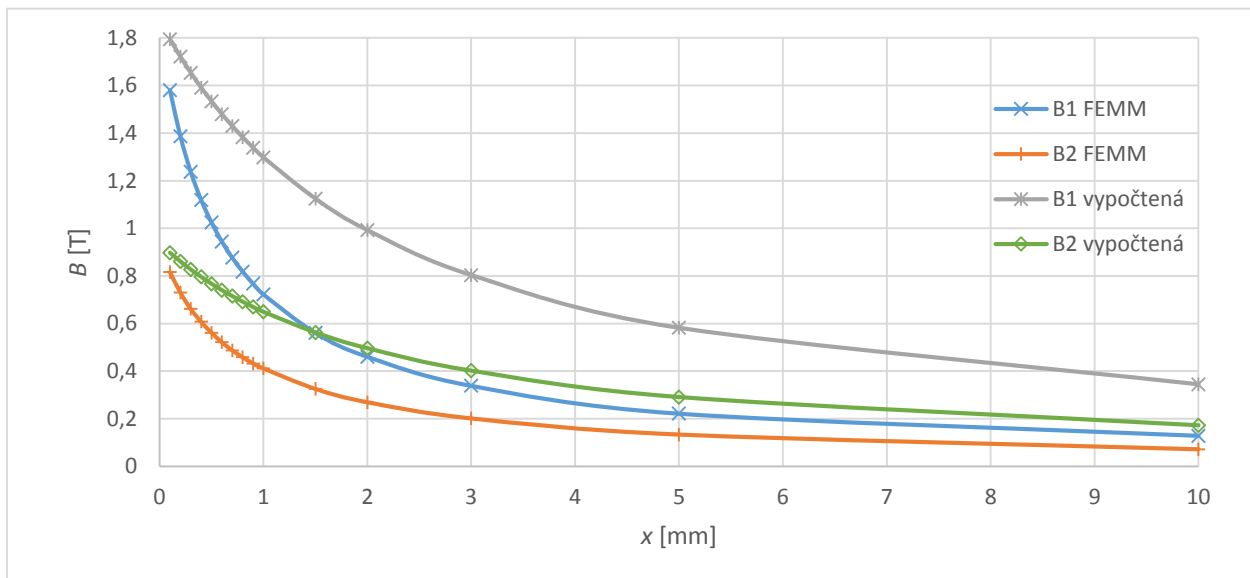
Vzhledem k celkovým výpočtům čtvrtiny magnetického obvodu, je výsledná síla působící na upínaný obrobek téměř stejná, jen s malou odchylkou viz. Obr 5-43.



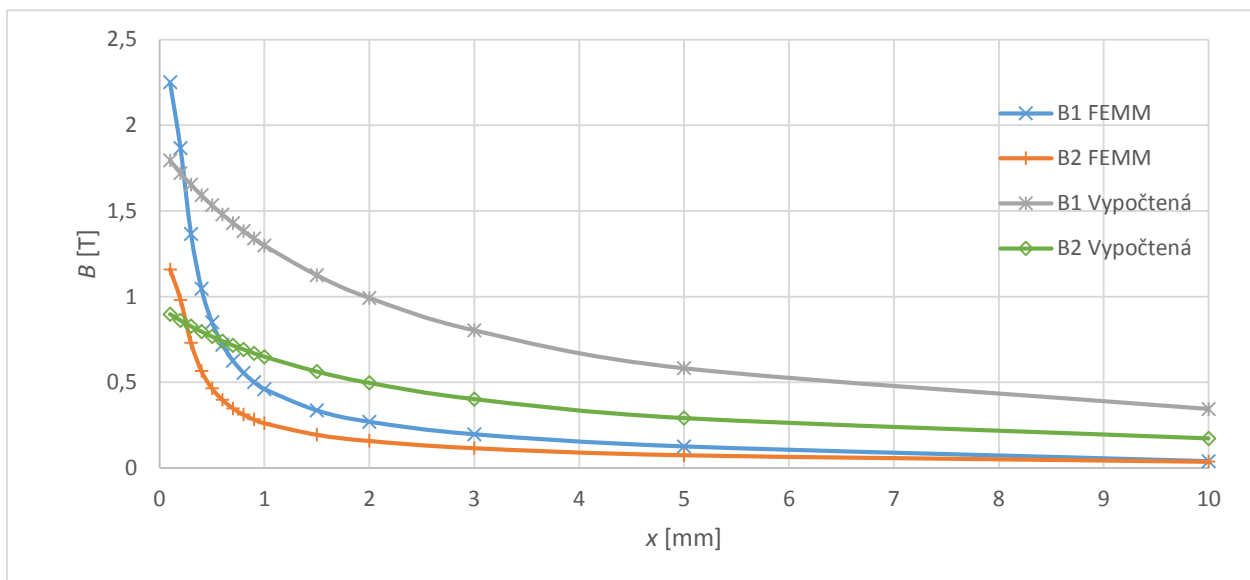
Obr 5-43 Porovnání přídržné síly pro čtvrtinu systému

V následující části budou porovnávány získané hodnoty pro polovinu magnetického obvodu.

Zde již nejsou porovnávány hodnoty magnetického toku Φ . Protože se v této části vyskytuje již i permanentní magnet AlNiCo, který se vlivem magnetického toku Φ postupně demagnetizuje a mění svou polaritu, bude uveden příklad rozdílů magnetické indukce B při dvou různých stavech. Na Obr 5-44 je uvedena závislost magnetické indukce B_1 a B_2 ve vzduchové mezeři za podmínky, že při analytickém výpočtu v programu FEMM uvažujeme lineární závislosti parametrů ocelového jádra a AlNiCo magnetu. Na Obr 5-45 jsou dále uvedeny závislosti magnetické indukce B_1 a B_2 při nelineárních závislostech parametrů materiálů magnetického obvodu.

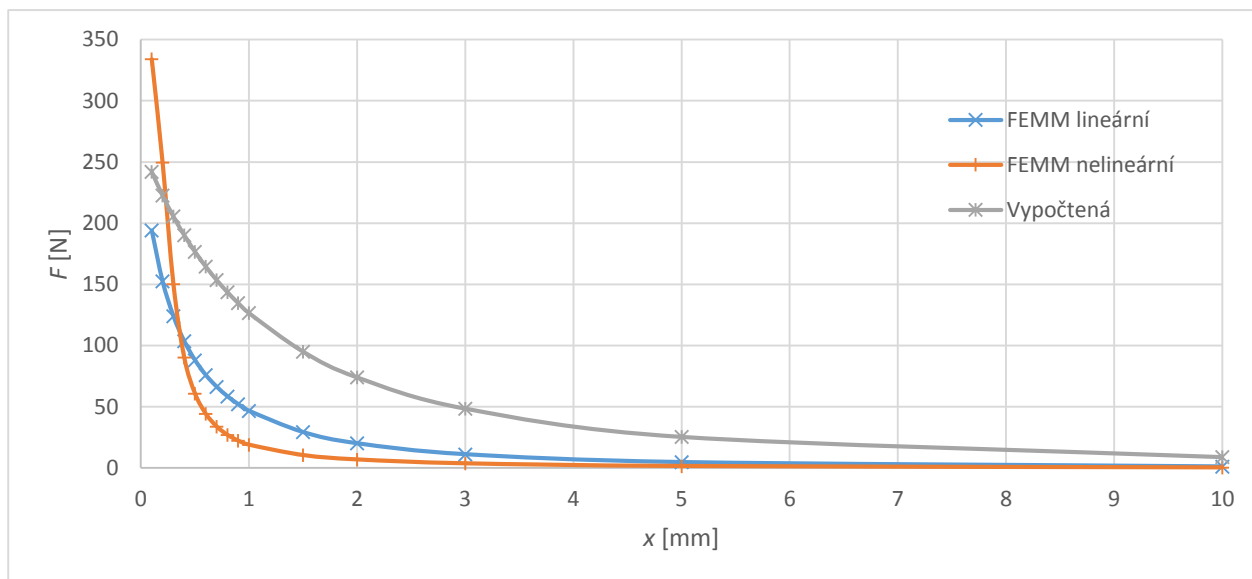


Obr 5-44 Porovnání magnetické indukce B v polovině systému při lineárních charakteristikách použitých materiálů



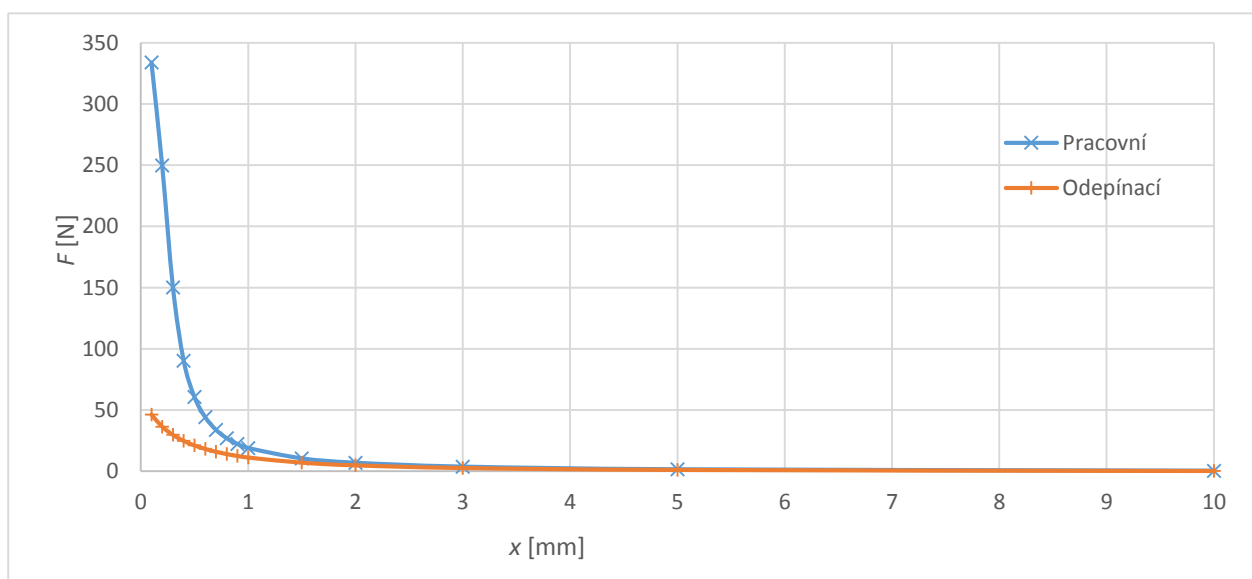
Obr 5-45 Porovnání magnetické indukce B v polovině systému při nelineárních charakteristikách použitých materiálů

Jak je vidět na Obr 5-46, kde jsou vypočtené hodnoty výsledných sil působících na upínaný obrobek porovnány s hodnotami z programu FEMM jak s lineárními tak s nelineárními charakteristikami použitých materiálů. Protože numerický výpočet byl proveden pro lineární hodnoty, křivka výsledné síly se také blíží křivce pro hodnoty síly z modelu s lineárními charakteristikami.



Obr 5-46 Porovnání výsledných sil v polovině systému

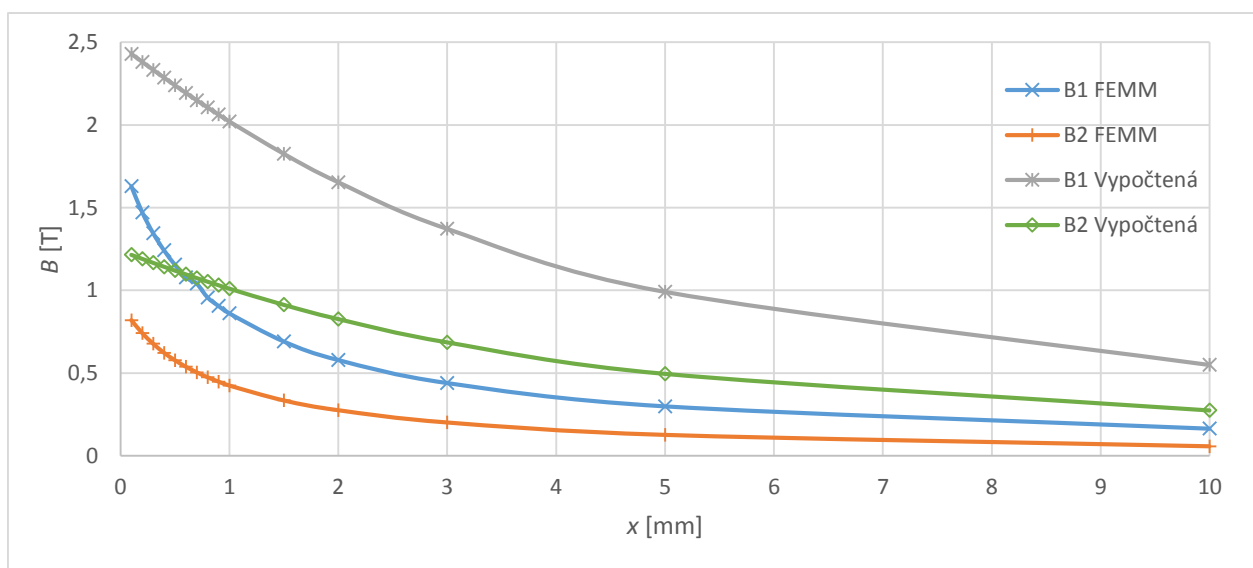
Na Obr 5-47 je zobrazen rozdíl mezi silami v pracovní a odepínací verzi navrženého magnetického systému. Naměřené hodnoty jsou z programu FEMM. Jelikož reálný magnetický systém má nelineární závislosti a charakteristiky materiálů, jsou i tyto hodnoty měřeny pro nelineární charakteristiky materiálů.



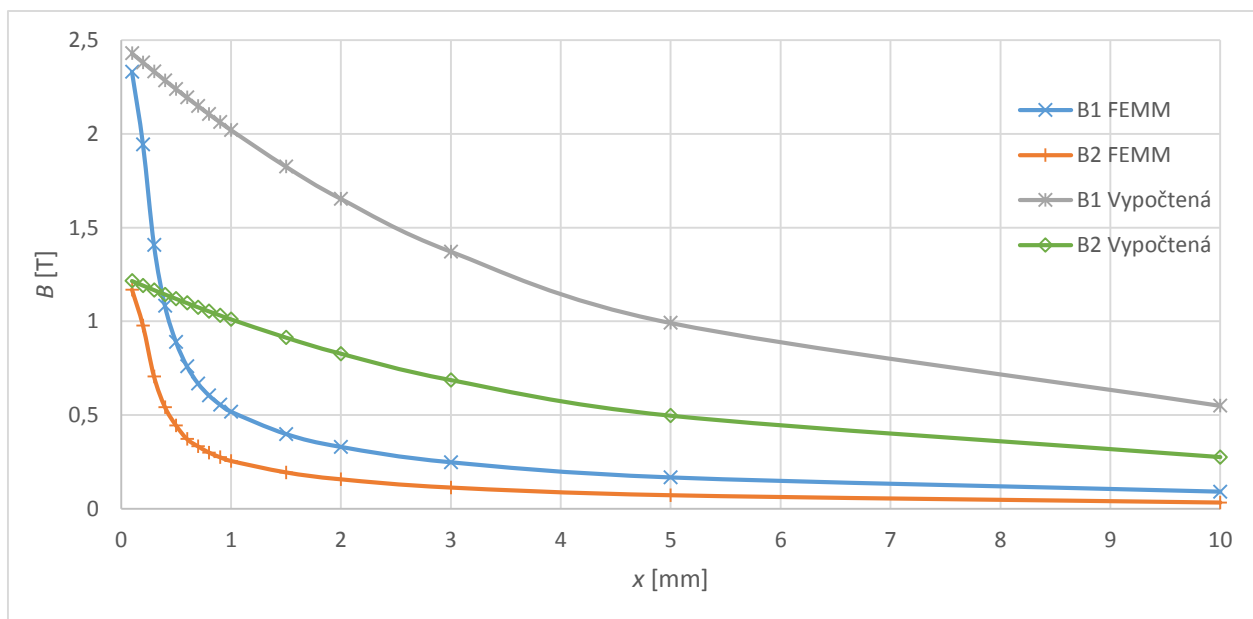
Obr 5-47 Porovnání výsledných sil v polovině systému pro pracovní a odepínací verzi

Nyní budou porovnány hodnoty pro celkový finální elektromagnetický upínací systém se souhlasnými parametry jako reálný vyrobený model.

Stejně jako u porovnávání hodnot poloviny systému, budou také i zde prvně porovnány hodnoty magnetických indukcí B_1 a B_2 ve vzduchové mezeře mezi magnetickým systémem a upínaným obrobkem. Na Obr 5-48 jsou závislosti magnetických indukcí s lineárními charakteristikami použitých materiálů a na Obr 5-49 závislosti s nelineárními charakteristikami.

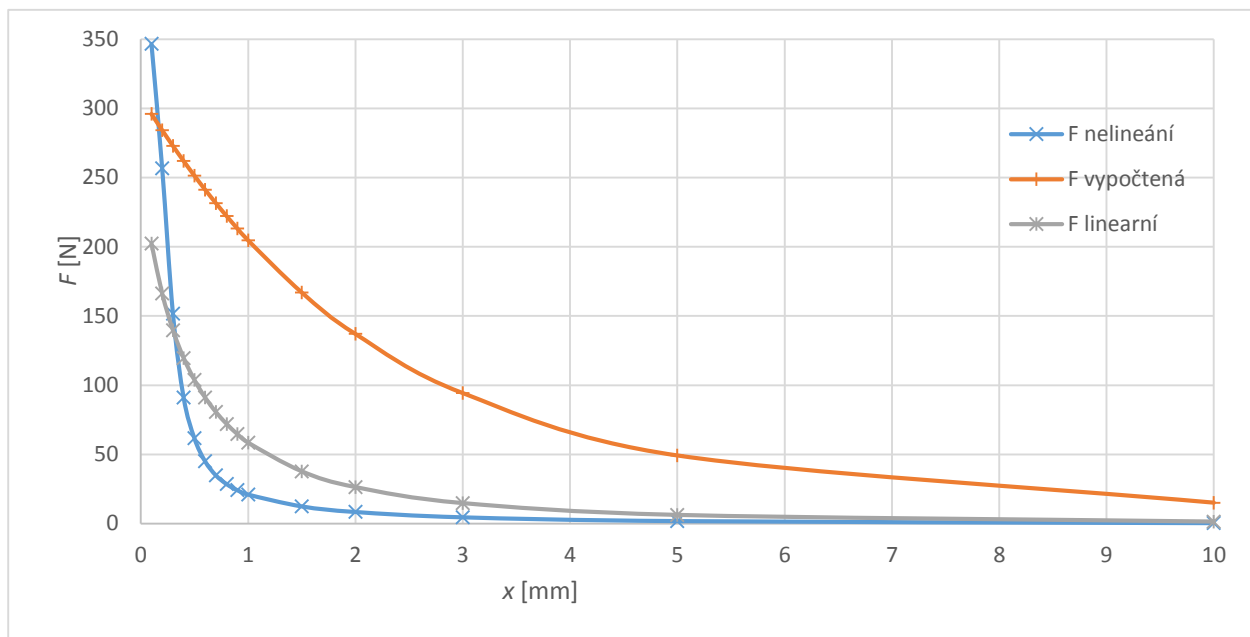


Obr 5-48 Porovnání magnetické indukce B celého systému při lineárních charakteristikách použitých materiálů



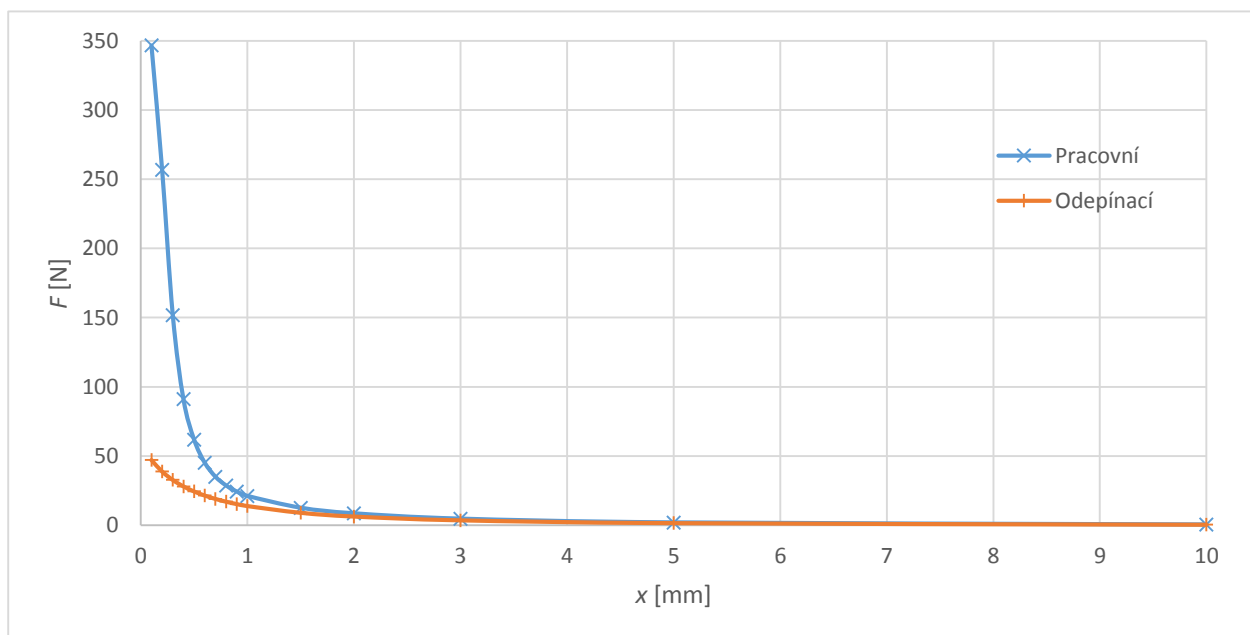
Obr 5-49 Porovnání magnetické indukce B celého systému při nelineárních charakteristikách použitých materiálů

Na Obr 5-50 jsou znázorněny závislosti výsledných sil jak vypočtených tak z analytického měření v programu FEMM pro lineární i nelineární charakteristiky použitých materiálů. Vypočítaná síla se liší od hodnot analytických z důvodu zaokrouhlování na tři platná místa u všech mezivýpočtů, a tedy postupně u každého mezivýpočtu vznikla chyba. Každé zaokrouhlení přispělo ke vzniku větší chyby u dalšího mezivýpočtu.



Obr 5-50 Porovnání výsledných sil v celkovém systému

Na Obr 5-51 je znázorněna závislost pro pracovní a odepínací verzi celkového elektromagnetického upínacího systému.



Obr 5-51 Porovnání výsledných sil v celkovém systému pro pracovní a odepínací verzi

6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem elektromagnetického upínacího systému. Cílem bylo navrhnout jeden segment tohoto systému a ověřit tento návrh numerickou metodou a následným porovnáním výsledků získaných analytickou metodou a výpočtem metodou konečných prvků z programu FEMM. Získané hodnoty výpočtem i analytickým modelem jsou graficky porovnány v přechozí kapitole 5.6 Přehled výsledků a zhodnocení.

Podle hodnot získaných z analytického modelu z programu FEMM vypočtených metodou konečných prvků pro výsledný segment magnetického systému je vidět, že při průchodu nulového proudu cívkou elektromagnetu má navržený upínací systém při vzduchové mezeře $x = 0,1$ mm přídržnou sílu rovnu $F_F = 346,59$ N. V porovnání s vypočtenou hodnotou, která je rovna $F_V = 295,97$ N vzniká rozdíl, jež je způsoben uvažováním lineárních charakteristik vlastností materiálu při výpočtech. Při zvětšování vzduchové mezery se hodnoty začínají značně lišit a to z důvodu zanedbání u výpočtu faktu, že permanentní magnet AlNiCo se začne demagnetizovat a měnit při vzduchové mezeře $x = 0,2 - 0,4$ mm svou polaritu a tím se zcela odliší od hodnot získaných z programu FEMM kde se uvažovaly nelineární charakteristiky všech použitých materiálů. Z tohoto důvodu budeme uvažovat, že hodnoty získané z programu FEMM jsou přesnější než hodnoty vypočtené numerickou metodou. Další chyba je způsobená zaokrouhlováním hodnot na tři platná místa i v případech kde byly rozdíly mezi hodnotami jednotlivých výpočtů i několik desítek řádů. Přídržná síla upínacího systému se zmenšuje s kvadrátem velikosti vzduchové mezery, tedy pro dosažení co největší síly působící na upínaný obrobek je vhodné zajistit co nejmenší vzdálenost obrobku od magnetických pólů upínacího systému. Vytvořený reálný model měl při testovacím měření výslednou sílu pouze $F_R = 207,5$ N. Tato velká chyba vznikla při nepřesné a nekvalitní výrobě upínacího systému, kdy vznikly nepřesným opracováním použité oceli vzduchové mezery na spojích a svou reluktancí zvyšovaly hodnotu magnetického toku Φ v místech, kde je žádaný tok malý, aby nezmenšoval výsledný magnetický tok Φ_1 a Φ_2 procházející vzduchovou mezerou. Právě magnetické toky Φ_1 a Φ_2 svou hodnotou určují velikost výsledné síly působící na upínaný obrobek. V teoretických výpočtech a analytickém modelu byl vytvořen graf závislosti výsledné síly F v závislosti na vzdálenosti obrobku do upínacího systému. Vytvořený reálný model má určité nepřesnosti i v místech upnutí a tedy podle naměřených a vypočtených hodnot závislosti můžeme stanovit přibližnou vzduchovou mezeru. Podle závislosti naměřené v programu FEMM souhlasí naměřená hodnota reálného modelu na vzduchovou mezeru o přibližné vzdálenosti $x = 0,25$ mm a podle vypočtených hodnot přibližně na $x = 1$ mm. Při upínání nerovných nebo nerovnoměrných objektů lze užít pólových nástavců pro lepší uchycení a zlepšení efektivity upnutí.

Důležitou částí návrhu elektromagnetického upínacího systému je také cívka elektromagnetu. Ta byla navržena na 50 závitů z měděného drátu o průměru 0,5 mm. V okamžiku průchodu vypočteného proudu o velikosti 50 A je přídržná síla upínacího systému na obrobek rovna síle 0,03 N. Velikost této síly je pouze v čase průchodu elektrického proudu elektromagnetem, protože po odeznění proudového pulsu, který tlačil všechen magnetický tok systému proti permanentnímu magnetu AlNiCo se sice tento magnet demagnetizuje a přepolarizuje, ale opět se část magnetických siločar neodymových magnetů uzavřou přes vzduchovou mezeru a upínaný obrobek silou o velikosti 47,11 N. Hodnota této síly při reálném měření vyrobeného segmentu

navrženého upínacího systému dosahovala hodnoty přibližně 63,75 N. Velikost této síly v tzv. odepínacím režimu lze eliminovat užitím širšího magnetu AlNiCo. Užitím tohoto magnetu širokého stejně jako ocelové jádro, by jsme se vyhlí přesycení AlNiCo magnetu vysokým magnetickým tokem a dosáhneme mnohem menší upínací síly v čase, kdy chceme obrobek odebrat nebo přesunout. Podle výpočtů z FEMMu by tato hodnota byla rovna síle 16,87 N.

Dle hodnot vypočtených a získaných z analytického modelu pro celý navržený systém a polovinu tohoto systému je patrné, že při dvojnásobné šířce poloviny systému dosáhneme téměř podobných výsledků jakožto u celého systému. Z tohoto důvodu by bylo možno uvažovat magnetický systém sestaven z více navržených segmentů jak z celých tak z uvažovaných polovin segmentů se stejnou účinností a upínací silou na stejné ploše. Vzhledem k reálnému použití v praxi, kde se užívají upínací systémy sestavené z těchto segmentů pospojovaných jak v radiálním tak axiálním směru v matici i víc jak 10x10 segmentů navazujících na sebe, bych doporučil spíše užití užšího systému s větším počtem menších magnetických pólů, vzhledem k různorodosti upínaných obrobků. Čím větší počet pólů bude obrobek překrývat, tím vyšší kvality upnutí dosáhneme. Více segmentů v navrženém upínacím systému budou pokrývat větší aktivní plochu s procházejícím magnetickým tokem, ale zato s menší hloubkou vniku magnetických siločar do upínaného obrobku. Dále již závisí na požadavcích uživatele, zda bude upínat nesouměrné či více obrobků současně, nebo velké obrobky z kovových materiálů určených k náročnějšímu a složitějšímu obrábění.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry*. 1. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012, 531 s. ISBN 978-80-7232-424-8.
- [2] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [3] BENEŠOVÁ, Zdeňka a Daniel MAYER. *Základní příklady z teorie elektromagnetického pole: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007, 168 s. ISBN 80-708-2818-8.
- [4] BORO VAN, Petr. Upínače nástrojů: Upínání nerotačních obrobků – 3. část. [online]. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/upinace-nastroju/upinace-nastroju-10-upinani-nerotacnich-obrobku-3-cast_18980.html
- [5] ASSFALG magnets: Knowledge base. [online]. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.assfalgmagnets.com/en/knowledge-base/magnaslot-without-t-slots.html>
- [6] VOLNÝ, Pavel. VÝVOJOVÉ TRENDY MAGNETICKÝCH UPÍNAČŮ PRO UPÍNÁNÍ FEROMAGNETICKÝCH PŘEDMĚTŮ. In: [online]. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/14-volny.pdf>
- [7] Neodymové magnety: Některé odborné výrazy a jejich význam. [online]. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://magnety.info/6.php>
- [8] Magnetické systémy. [online]. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.supermagnety.cz/cz/64/magneticke-systemy/>
- [9] MEEKER, David. Finite Element Method Magnetics: User's Manual. In: [online]. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>
- [10] SEDLÁČEK, Jiří a Miloslav STEINBAUER. *Elektrotechnika 1: Blok 6 - Magnetické obvody*.
- [11] BIANCHI, Nicola. *Electrical machine analysis using finite elements*. Boca Raton, FL: Talor, c2005, 275 p. ISBN 08-493-3399-7.
- [12] FITZGERALD, A, Charles KINGSLEY a Stephen D UMANS. *Electric machinery*. 6th ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, c2003, xv, 688 p. ISBN 00-711-2193-5.
- [13] Lovatt, H.C.; Watterson, P.A., "Energy stored in permanent magnets," *Magnetics*, IEEE Transactions on , vol.35, no.1, pp.505,507, Jan 1999, doi: 10.1109/20.737473