

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vliv materiálů permanentních magnetů na synchronní
stroje s permanentními magnety**

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na porovnání různých materiálů magnetů používaných v synchronních strojích s permanentními magnety. Magnety nejdříve porovnávám podle složení a vlastností jejich slitin. Nakonec simuluji tři různé druhy magnetů AlNiCo, NdFeB a SmCo...

Klíčová slova

Synchronní stroje, permanentní magnety, materiály, porovnání, počítačová simulace, metoda konečných prvků...

Abstract

The bachelor thesis presents comparison of differences between various materials of permanent magnets used in permanent magnet synchronous machines. Firstly i compare the magnets by their composition and the properties of their alloys. Lastly i simulate three different types of AlNiCo, NdFeB and SmCo magnets...

Key words

Synchronous machines, permanent magnets, materials, comparison, computer simulation, finite element method...

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2017

Vlastimil Ledvina

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Romanu Pechánkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	
ÚVOD	1
1 ROZDÍLY STROJŮ S PERMANENTNÍMI MAGNETY A KLASICKÝM BUZENÍM	2
1.1 SYNCHRONNÍ STROJE S KLASICKÝM BUZENÍM	2
1.1.1 Stator	2
1.1.2 Rotor	3
1.1.3 Tlumič	3
1.2 SYNCHRONNÍ STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY	4
1.2.1 Využití strojů s permanentními magnety	4
1.2.2 Provedení rotoru	4
1.2.3 Výhody strojů s permanentními magnety	5
1.2.4 Nevýhody strojů s permanentními magnety	6
2 VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	8
2.1 VYUŽÍVANÉ KOVY A POLOKOVY	8
2.1.1 Železo	8
2.1.2 Hliník	8
2.1.3 Kobalt	8
2.1.4 Nikl	9
2.1.5 Neodym	9
2.1.6 Samarium	9
2.1.7 Bor	10
2.1.8 Srovnávací tabulka všech kovů	10
2.2 MOTIVACE K VYUŽÍVÁNÍ SLITIN	10
2.2.1 Zlepšení parametrů	10
2.2.2 Cena	11
2.3 SLITINY KOVŮ VYUŽÍVANÉ JAKO PERMANENTNÍ MAGNETY	11
2.3.1 AlNiCo	11
2.3.2 SmCo	12
2.3.3 NdFeB	14
2.3.4 Ferity	15
2.3.5 Porovnání typických hodnot slitin magnetů	16
3 SIMULACE OBVODU S PERMANENTNÍM MAGNETEM	17
3.1 POUŽÍVANÝ SOFTWARE	17
3.2 PODMÍNKY SIMULACE	18
3.3 SIMULOVANÉ MATERIÁLY	19
3.3.1 Železo M350-50A	19
3.3.2 AlNiCo magnety	20
3.3.3 NdFeB magnety	20
3.3.4 SmCo magnety	20
3.1 SIMULACE ALNiCO	21
3.1.1 AlNiCo 5	21
3.1.2 AlNiCo 6	22
3.1.3 ArKomag® 800	23
3.2 SIMULACE NDFEB	24
3.2.1 N30H	24
3.2.2 N40H	25
3.2.3 N50H	26
3.3 SIMULACE SMCO	27
3.3.1 RECOMA® 18	27

3.3.2	RECOMA® 30	28
3.3.3	RECOMA® 32	29
3.4	TABULKA VÝSLEDKŮ	30
ZÁVĚR		31
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ		

Seznam symbolů a zkratek

MKP.....	Metoda konečných prvků
B_R	Remanentní magnetická indukce
B_0	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
B_{FE}	Magnetická indukce v železném jádře obvodu
H_C	Koercitivní síla
H_{MAX}	Maximální intenzita magnetického pole
FEMM.....	Finite element method magnetics
AlNiCo.....	Aluminium nikl kobaltové magnety
NdFeB.....	Neodymium železo borové magnety
γ	Konduktivita materiálu
T_C	Curieho teplota
T_{MAX}	Maximální provozní teplota
F_X	Velikost přitažné síly v x-ové ose
ΔB_R	Změna remanentní indukce při změně teploty o 1°C
ΔH_C	Změna koercitivní síly při změně teploty o 1°C

Úvod

Předkládaná práce se zaměřuje na princip synchronních strojů s permanentními magnety a rozdíly materiálů v nich užitých.

Text je rozdělen do tří částí. V první je části popisováno, jaké jsou rozdíly mezi stroji s klasickým buzením a stroji s permanentními magnety. Vysvětlují se jednotlivé části obou druhů strojů, rozdíly v jejich konstrukci a vlastnostech. V závěru kapitoly se rozebírají výhody a nevýhody využití permanentních magnetů.

Druhá část se zabývá různými materiály, které se v těchto strojích využívají, a jejich vlastnostmi. Popisují zde různé kovy a polokovy, které se využívají ve slitinách permanentních magnetů. Dále jsou porovnávány přímo slitiny a jejich typické vlastnosti. Pro získání přehledu o rozdílech materiálů, jsou zkoumány rozdíly ve složkách, ze kterých jsou tyto sloučeniny vytvořeny, a jaké vlastnosti dodávají finálnímu produktu.

Třetí část práce obsahuje počítačovou MKP simulaci. Vybrány byly tři druhy materiálů. AlNiCo, NdFeB a SmCo. Pro tyto materiály je provedena simulaci a zjištěny vlastnosti jimi vytvořených polí. Porovnává se magnetická indukce v jádře a ve vzduchové mezeře a zjišťuje se maximální velikost intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře.

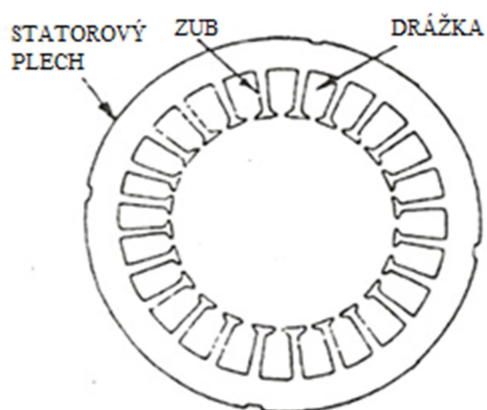
1 Rozdíly strojů s permanentními magnety a klasickým buzením

1.1 Synchronní stroje s klasickým buzením

Vinuté synchronní stroje jsou původním provedením synchronních strojů. Synchronní generátory se využívají ve většině elektráren jako zdroje napětí. Synchronní motory se zase využívají v průmyslu a také jako synchronní kompenzátory v přebuzeném stavu. Jejich výhodou je konstantní rychlost otáčení a téměř minimální rotorové ztráty, ale obtížné řízení a neschopnost samovolného rozběhu jejich využití poněkud komplikuje. Skládají se z třífázového rotorového vinutí, stejnosměrného rotorového vinutí a dalších prvků, jako například tlumič. [3]

1.1.1 Stator

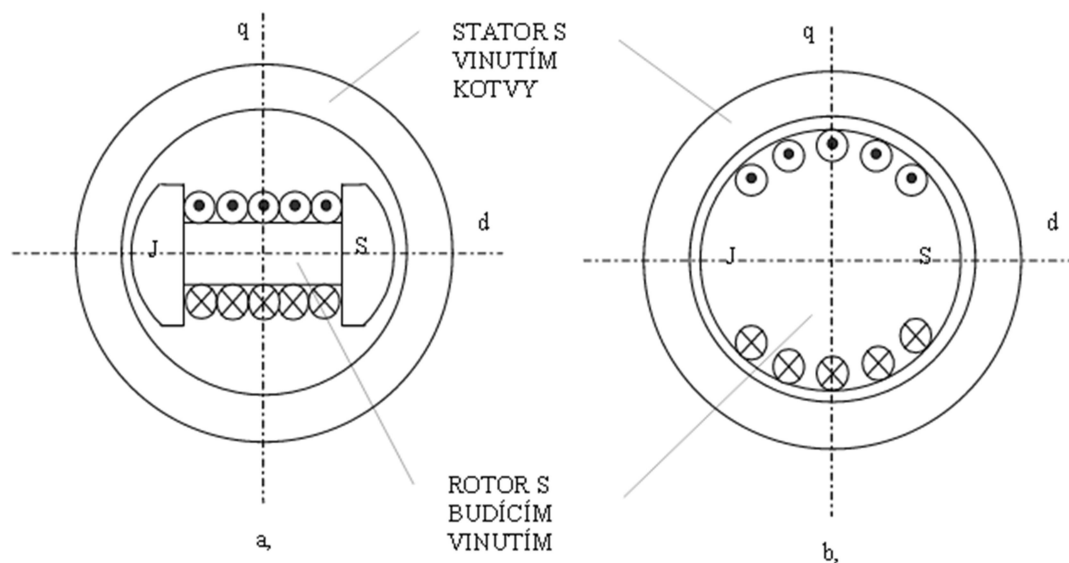
V případě synchronního motoru je stator napájen třífázovým napětím a vytváří tak střídavý magnetický tok. Pokud se jedná o generátor, naopak ze svorek statoru odebíráme třífázové sinusové napětí. Frekvence tohoto napětí je dána rychlostí otáčení a je možné ji zvýšit s počtem pólů rotoru. Statorové pole se otáčí synchronní rychlostí, která odpovídá frekvenci střídavého napětí na statorových svorkách. Magnetický obvod statoru je vytvořen z tenkých plechů, které jsou vzájemně izolovány. V magnetickém obvodu jsou vytvořeny drážky, do kterých se umístí cívky třífázového vinutí. Počet drážek a jejich velikost záleží na parametrech stroje a volí se při jeho návrhu. [3]



Obr. 1.1.1 Provedení statoru synchronního stroje [26]

1.1.2 Rotor

Jedná se o stejnosměrný magnet, který v případě generátoru indukuje do statoru sinusové napětí. Naopak v případě motorického chodu rotor skluzu dobíhá za statorovým polem. Rotor je tvořen stejnosměrným vinutím a to ve dvou provedeních. Jedním z těchto provedení je hladký rotor, který se využívá v turboalternátorech. Druhé provedení je rotor s vyniklými póly, který naopak nachází své využití v hydroalternátorech, které mají nižší otáčky než 3000ot/s, ale mají vyšší počet pólů a tak generují napětí na frekvenci sítě. V případě motoru je rychlost dána frekvencí statorového pole a je dále možné ji snížit počtem pólů rotoru. Rotor nemá žádný skluz, pouze fázové zpoždění. Rotor je tvořen magnetickým obvodem. U synchronního stroje je rotor masivní. Hladký rotor je válec, na kterém jsou v drážkách uloženy cívký vinutí. U rotoru s vyniklými póly je vinutí umístěno na pólech, které jsou připevněny na hřídeli stroje. Cívký jsou napájené z kroužků na hřídeli a vytváří stacionární magnetické pole. [3]



Obr. 1.1.2 Provedení rotorů synchronního stroje (vlevo rotor s vyniklými póly, vpravo hladký rotor) [25]

1.1.3 Tlumič

Tlumič je asynchronní kotva nakrátko, která je umístěna v pólových nástavcích rotoru. Má za úkol snížit kývání synchronního stroje, ke kterému dochází při prudkých změnách zatížení. Kývání nastává, pokud se do budicího vinutí vlivem prudké změny zátěže naindukuje vyšší napětí. To má za následek vytlačení toku do vzduchové mezery. Tlumič

je navržen tak, aby tento efekt vyvážil působením opačným směrem. Jedním z dalších využití tlumiče je možnost použít ho jako asynchronní rotor při rozběhu stroje.[2]

1.2 Synchronní stroje s permanentními magnety

Synchronní stroj s permanentními magnety je bezkartáčový stroj, který má třífázový vinutý stator a jeho rotor je tvořen permanentním magnetem. Tyto stroje jsou velice podobné strojům s klasickým buzením, ale jisté rozdíly v nich jsou. Permanentní magnety vytváří konstantní magnetický tok, namísto říditelného magnetického toku u klasického buzení. Využití permanentních magnetů umožňuje výrobu strojů s velmi vysokou účinností, protože na rotoru není nutné budící vinutí. Materiály, ze kterých se permanentní magnety vyrábí, jsou ovšem vodivé, takže v nich vznikají ztráty vířivými proudy. Tato skutečnost a také fakt, že nelze změnit permanentní buzení, dává strojům jisté limity, za které se není možné dostat. Vzhledem k nízké permeabilitě permanentních magnetů (blíží se $\mu_r=1$) je vlastní indukčnost velice nízká. Synchronní indukčnost stroje musí být nízká, protože moment stroje je na ní úměrně závislý.[2]

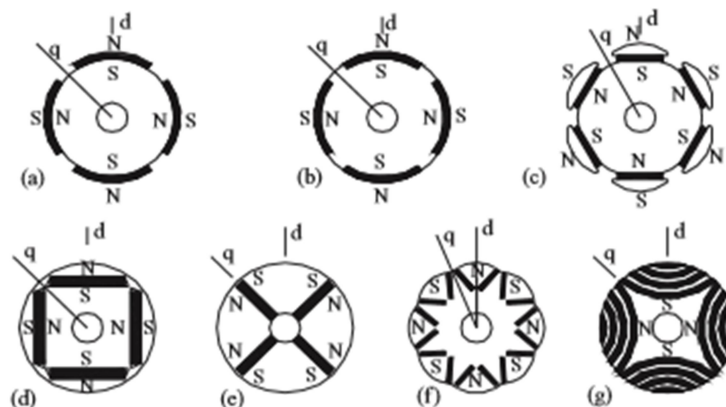
1.2.1 Využití strojů s permanentními magnety

Nejčastější využití strojů s permanentními magnety je jako motor s nízkými otáčkami a vysokým momentem. Na rozdíl od strojů s klasickým buzením, neklesá účinnost stroje s rostoucím počtem pólů. Permanentní magnety jsou vodivé, takže nízké otáčky snižují velikost ztrát vířivými proudy. V případě vysokých otáček by se musela provést opatření, aby nedocházelo k degradaci permanentních magnetů.

1.2.2 Provedení rotoru

Permanentní magnety je do stroje možné umístit dvěma způsoby. Nejvíce používaný způsob je povrchové upevnění. Magnety jsou umístěny po obvodu rotoru a tvoří tak póly, stejně jako by tomu bylo u strojů s klasickým vinutím. Permanentní magnety v tomto provedení rotoru nemají na vlastní indukčnost stroje skoro žádný vliv. Permeabilita permanentních magnetů se blíží jedné. Na magnety působí vnější mechanické, magnetické a teplotní vlivy, které mohou mít za následek demagnetizaci. Další možné provedení je zabudování magnetů dovnitř rotoru. Toto provedení má silný dopad na magnetický tok, který permanentní magnety vytváří. Typicky ho sníží zhruba o čtvrtinu. Naopak zabudováním magnetů do rotoru je možné dosáhnout vysoké ochrany magnetů proti

mechanickým a magnetickým vlivům. Také je možné využít dva magnety v jednom pólu. Nejlepšího využití permanentních magnetů dosáhneme povrchovým provedením rotoru. Při tomto provedení je synchronní indukčnost velice nízká a dosáhne se nejvyššího momentu zvratu.[2]



Obr. 1.2.1 Možnosti umístění permanentních magnetů na rotor (Převzato z [2], str. 397)

1.2.3 Výhody strojů s permanentními magnety

- **Rozměry stroje**

Přítomnost permanentních magnetů eliminuje potřebu vinutí v rotoru. Sníží se tak potřebný prostor pro rotor, kam by se běžně musely umístit kroužky, drážky a vinutí. Menší stroj je možné využít v mnohem větším množství aplikací, než je tomu u vinutých strojů.

- **Hmotnost**

Vzhledem ke snížení počtu součástí, je možné vytvořit rotor lehčí a tím snížit hmotnost celého zařízení. Tento rozdíl ve hmotnosti rozšiřuje škálu využití synchronních strojů s permanentními magnety například v trakci a servopohonech, kde se nemusí dodatečná hmotnost kompenzovat výkonem navíc. Stroj má dále nižší moment setrvačnosti. [6]

- **Spolehlivost**

Absence vinutí a kroužků značně zvyšuje spolehlivost strojů. Nemusí se pravidelně měnit uhlíky ani nemůže dojít k poškození vinutí.

- ***Vyšší účinnost***

Využití permanentních magnetů sníží tepelné ztráty jako jsou například ztráty rotoru asynchronního stroje a ztráty při buzení synchronního stroje. Synchronní stroje mají také schopnost udržet maximální moment při nízkých otáčkách. Mají také vyšší účinnost při nižších otáčkách, než stroje s vinutým rotorem.[2]

1.2.4 Nevýhody strojů s permanentními magnety

- ***Vodivost***

Permanentní magnety jsou slitiny kovů. Často se v nich objevuje železo nebo hliník. Tyto kovy jsou vodivé a jejich slitiny tudíž také. Ve vodivých materiálech se v magnetickém poli indukuje napětí a vznikají tak ztráty vířivými proudy. [2]

- ***Složitost výroby***

Přítomnost permanentních magnetů v rotoru přináší komplikace výroby. Magnety je na rotor potřeba upevnit. Magnety se na rotor přilepí a následně se zajistí bandáží. Při povrchovém uložení se zmagnetizují až po připevnění. Pro vnitřní uložení jsou v rotoru připraveny otvory a do nich se magnety vsunou zmagnetované, případně se zmagnetizují až po vložení. [28]

- ***Problematika odbuzování***

Permanentní magnety jsou z magneticky tvrdého materiálu, který vyžaduje velké množství energie na přemagnetování. Tvrdost materiálu je analogií množství energie potřebného k přeorientování magnetických domén. Přiložením silného magnetického pole je možné změnit tuto orientaci, ale velice se tím sníží velikost a síla magnetického pole. Pokud bychom chtěli magnetické pole opět zesílit, museli bychom opět použít velmi silné pole a zmagnetizovat ho zpět. Tento postup je prakticky nemožné provést za běhu stroje vzhledem k velikosti koercitivní síly magnetů.[27]

- ***Náklady***

Výroba permanentních magnetů je nákladná a má tak zásadní vliv na cenu stroje. Synchronní stroje s permanentními magnety se proto využívají převážně v menších instalacích. Například se využívají v trakci, kde je možné do každého kola vozu umístit jeden synchronní motor s permanentním magnetem. [24]

- ***Nepřetržité buzení***

Magnetické pole rotoru je stálé a není možné ho rychle změnit. Při poruše stroje není možné odbuzení a ve statorovém vinutí se otáčením rotoru indukují napětí. Je nutné uzpůsobit soustrojí tak, aby bylo možné odpojit hřídel stroje od zátěže (například kolo tramvaje).

- ***Teplotní závislost permanentních magnetů***

Vlastnosti permanentních magnetů jsou závislé na teplotě. Pokud se zvyšuje teplota permanentního magnetu, dochází ke snížení remanentní indukce a koercitivní síly. Tato změna se udává v procentech na kelvin. Například u NdFeB magnetů se remanentní indukce sníží o 0,12 %/K a koercitivní síla o 0,6%/K. Pro SmCo magnety jsou tyto hodnoty nižší a remanentní indukce se tak snižuje o 0,12%/K a koercitivní síla o 0,2%/K. [12]

- ***Obtížné řízení***

Řízení strojů s permanentními magnety je komplikovanější, než u běžných strojů. Je zde nezbytné využití frekvenčního měniče. Dříve bylo nutné pro stroje s permanentními magnety vytvořit speciální aplikaci pro řízení, ale v dnešní době už většina frekvenčních měničů obsahuje speciální funkce právě pro tyto stroje.[2]

2 Vlastnosti materiálů permanentních magnetů

2.1 Využívané kovy a polokovy

2.1.1 Železo

Železo je druhý nejrozšířenější kov na zemi a je základním stavebním kamenem všech konstrukčních ocelí. V elektrotechnice je potom hojně využíván pro výrobu transformátorových plechů, kde je ve slitině s křemíkem lisován do plechů a skládán do tvaru rotoru nebo statorů strojů. Jeho magnetické vlastnosti z železa dělají skvělého adepta na využívání ve všech slitinách magnetických materiálů a permanentních magnetů. Železo je 26. prvek periodické soustavy prvků. Relativní permeabilita železa je silně závislá na jeho čistotě. Železo s 99,8% čistotou má relativní permeabilitu okolo 5000 a koercitivní sílu 1 oersted, respektive 80A/m. Žiháním ve vodíkové atmosféře je možné dosáhnout až 99,95% čistoty a tam se relativní permeabilita dostane až k 200 000, koercitivní síla ovšem klesne na 0,05 oerstedů, respektive 3,98A/m. Přidáním křemíku do železa (3% – 4,5%) vznikne elektrotechnická ocel, jejíž magnetizační vlastnosti se udávají B-H charakteristikou (viz. Obr. 3.3.1). Železo je při konduktivitě 9,93 MS/m přibližně 6x méně vodivé než měď. Železo spadá do kategorie feromagnetických kovů až do Curieho teploty, které je u železa 768°C. Tepelná vodivost železa je $80,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. [24]

2.1.2 Hliník

Hliník je nejrozšířenějším kovem v zemské kůře. Jeho velmi časté elektrotechnické využití je jako vodič, protože s vodivostí 37,7 MS/m je pouze o třetinu méně vodivý, než měď. Hliník je velmi lehký a velmi rozšířený. Hliník je 13. prvkem periodické soustavy. Nachází se na zemi pouze ve sloučeninách, ale s vývojem procesu výroby je nyní jeho metalurgická redukce na elementární hliník možná ve velkém objemu. Jedním z nejčastějších využití hliníku je v elektrických strojích. Vytváří se z něj kostry a masky motorů. Hliník je paramagnetický a jeho relativní permeabilita je 1. Tepelná vodivost hliníku je $237 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. [23]

2.1.3 Kobalt

Kobalt je 27. prvkem v periodické soustavě. V zemské kůře je kobalt 30. nejčastějším prvkem. Jeho nízký výskyt má za následek vysokou cenu. Využívá se v malém množství pro zlepšení vlastností slitin a to pouze pokud není možné ho nahradit levnější alternativou.

V elektrických strojích nachází své využití v mnoha slitinách využívaných jako permanentní magnety (AlNiCo, SmCo). Kobalt je feromagnetický a při 99% čistotě může dosáhnout relativní permeability okolo 250. Kobalt dodává sloučeninám vysokou koercivitu. Samotný kobalt má koercitivní sílu 10 oerstedů respektive $795,78 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. Kobalt má podobně jako železo nízkou elektrickou vodivost 16 MS/m a není dobrým vodičem. Curieho teplota kobaltu je 1130°C . Při jejím dosažení kobalt ztrácí své feromagnetické vlastnosti. Tepelná vodivost kobaltu je $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. [22]

2.1.4 Nikl

Nikl je lehký feromagnetický kov. V periodické soustavě prvků je na 28. místě. Velice často se využívá jako ochranná vrstva, která brání korozi. Dále se také využívá ve slitinách, galvanických člancích a v mincích. Pro elektrické stroje je jeho nejlepší využití jako přírůstek do permanentních magnetů. Relativní permeabilita při 99% čistotě dosahuje až 600. Koercitivita kobaltu se pohybuje kolem 0,7 oerstedů, respektive $55,7 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. Curieho teplota niklu je poněkud nízká, o svůj feromagnetismus nikl přichází už při 354°C . Srovnatelně s kobaltem, elektrická vodivost niklu je 14 MS/m a tepelná vodivost se pohybuje okolo $90,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. [21]

2.1.5 Neodym

60. prvek periodické soustavy prvků nese název neodym. Neodym je antiferomagnetický, ale pouze do teploty -254°C , pokud přesáhne tuto teplotu, začne vykazovat paramagnetické vlastnosti. Lze ho tedy využít pouze ve sloučeninách s kovy, které celkovou Curieho teplotu zvýší. Neodym se využívá k vytváření velmi silných permanentních magnetů, které tvoří rotor pro synchronní stroje s permanentními magnety. Relativní permeabilita je nepatrně větší než 1. Vodivost neodymu je velice malá, pouze $1,56 \text{ MS/m}$. Schopnost neodymu vést teplo je také nízká, pouze $16,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. [20]

2.1.6 Samarium

Blízký prvek neodymu, se jmenuje samarium. V periodické tabulce ho najdeme pod číslem 62. Stejně jako neodym je samarium antiferomagnetické a při překročení teploty -258°C se stává paramagnetickým. Opět se využívá převážně ve sloučeninách a slitinách. Například se pomocí samaria dá zvýšit absorpce infračerveného světla přidáním do skla, ale z hlediska elektrických strojů, samarium se nejčastěji využívá ve slitinách permanentních

magnetů. Relativní permeabilita je jako při běžných teplotách nepatrně větší než 1 z důvodu paramagnetivity materiálu. Podobně jako neodym má samarium elektrickou vodivost pouze 1,06 MS/m a tepelnou vodivost $13,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. [19]

2.1.7 Bor

Na pátém místě a tudíž nejnižší v tabulce z prvků, kterými se zabývám v této práci, leží Bor. Bor je polokov, který se v přírodě vyskytuje pouze ve sloučeninách. Bor je sice diamagnetický, ale využívá se ve sloučeninách permanentních magnetů aby zlepšil jejich vlastnosti. Bor je diamagnetický, takže jeho přítomnost zeslabuje magnetické pole, do kterého je vložen. Nepřispívá tak vůbec k síle permanentních magnetů, pouze k jejich ostatním vlastnostem. Jelikož Bor není kov, tak jeho vodivost je extrémně nízká. V elektrických strojích se bor využívá velice zřídka, nejčastěji však ve slitině NdFeB, které tak dodává pevnost. $5 \mu\text{S/m}$ je v porovnání s ostatními kovy naprosto zanedbatelná vodivost. Tepelná vodivost je na tom o něco lépe při $27,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. [18]

2.1.8 Srovnávací tabulka všech kovů

Tab. 2.1 Porovnání vlastností kovů

	Relativní permeabilita [-]	Koercitivní síla [A/m]	Vodivost [MS/m]	Tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	Curieho teplota [$^{\circ}\text{C}$]
Železo	5000-200.000	3,98-80	9,93	80,2	768
Hliník	1	---	37,7	237	---
Kobalt	250	795,78	16	100	1130
Nikl	600	55,7	14	90,9	354
Neodym	1	---	1,56	16,5	-254
Samarium	1	---	1,06	13,3	-258
Bor	>1	---	$5 \cdot 10^{-12}$	27,4	---

2.2 Motivace k využívání slitin

2.2.1 Zlepšení parametrů

Kovy samostatně mají sice dobré vlastnosti pro využití v magnetismu, ale také mají hodně nevýhod. Například transformátorové plechy jsou magneticky měkké a velice vhodné pro využití v transformátoru, ovšem vodivost železa je vysoká. Při frekvencích, které se u transformátorů používají, by vířivé proudy způsobovali velké ztráty. Proto se do transformátorových plechů přidává křemík a tím se sníží vodivost. U permanentních magnetů je tomu úplně stejně. Kombinace kovů s dobrými chemickými vlastnostmi a kovů

s výbornými magnetickými vlastnostmi, je možné dosáhnout mnohem silnějších, stabilnějších a pevnějších magnetů.[16]

2.2.2 Cena

Kobalt má skvělé magnetické vlastnosti, ale je velice vzácný. Jeho vzácnost dokáže často vytlačit jeho cenu až na úroveň stříbra. Vytvářet tak magnety pouze z kobaltu by bylo naprosto nevhodné, protože by se cena stroje s permanentním magnetem vyšplhala až na úroveň, kde by zastínila veškeré výhody. Používá se proto slitin, ve kterých magneticky silné materiály dodávají své vlastnosti levnějším a běžněji se vyskytujícím materiálům. Například již zmíněný Kobalt se využívá ve většině slitin, kterými se budu zabývat v následující kapitole, ale pouze v malém množství.[22]

2.3 Slitiny kovů využívané jako permanentní magnety

2.3.1 AlNiCo

- *Vlastnosti*

AlNiCo je slitina, kterou je možné zmagnetizovat a získat tak silný magnet s vysokou koercivitou. Je proto vhodný pro využití jako materiál permanentních magnetů. Většina AlNiCo magnetů je anizotropní a lze je tedy zmagnetizovat pouze v jednom směru. Existují také izotropní magnety, ale ty mají mnohem slabší magnetické vlastnosti. Remanence AlNiCo magnetů může přesáhnout 1,2T jejich koercivní síla může dosahovat až 80 kA/m. AlNiCo magnety dokáží vyprodukovat vysoký magnetický tok, ale bohužel mají malou odolnost vůči odmagnetování. Curieho teplota AlNiCo je ovšem jedna z nejvyšších ze všech materiálů permanentních magnetů. Dosahuje až 800°C a tím pádem jsou AlNiCo magnety jediné, které mají magnetické vlastnosti, i když jsou rozžhavené do ruda. [14]

- *Složení*

AlNiCo se převážně skládá z hliníku, niklu, kobaltu a železa, ale také se přidává měď, titan a niob. Železo se využívá k tomu, aby se pomocí něho nastavil správný poměr kovů.[10]

Tab. 0.2 Zastoupení kovů ve finálním magnetu[10]

Kov	Procento hmotnosti
Hliník	6% - 13%
Nikl	13% - 26%
Kobalt	0% - 42%
Železo	30 - 40%
Měď	2% - 6%
Titan	0% - 9%
Niob	0% - 3%

- **Výroba**

AlNiCo magnety se vyrábí dvěma různými způsoby. Jedním z nich je spékání, při kterém se z kovového prášku při teplotě těsně pod bodem tání spojují částice a vytváří tak samotný magnet. Spékání se provádí ve vodíkové atmosféře, aby došlo k co nejlepšímu přenosu tepla a finální produkt byl co nejméně znečištěný. Dalším způsobem výroby AlNiCo magnetů je slévání. V peci se roztaví všechny potřebné přísady, ale hliníku se vkládá o něco více, než je požadovaný výsledek, protože jeho teplota tání je nižší, než u ostatních přísad a dochází tak k odpařování. Je důležité mít přesné načasování, aby byl zachován správný poměr niklu a hliníku. [14]

2.3.2 SmCo

- **Vlastnosti**

SmCo magnet je vzácná slitina, užívaná k vytváření silných permanentních magnetů. Jak již název napovídá, SmCo obsahuje samarium a kobalt. Stejně jako u AlNiCo magnetů, dosahuje Curieho teplota až k 800°C a remanentní indukce se pohybuje mezi 0,8 a 1,16 Tesla. Zásadní rozdíl je ovšem v koercitivní síle, která u samarium kobaltových magnetů dosahuje až 1,6MA/m. Tato koercitivní síla dává SmCo magnetům extrémní odolnost vůči odmagnetování. SmCo má velmi dobrou tepelnou stabilitu a magnety z tohoto materiálu lze využívat až při 550°C, bez vážných následků. Hlavní nevýhodou je ovšem prudce se měnící cena. Kobalt je velmi vzácný materiál, který svou cenou dosahuje mnohdy až k ceně stříbra. Jedná se tedy o prémiové řešení. [13]

- **Složení**

Existují dva typy SmCo magnetických slitin. Řada 1:5 a řada 2:17. První zmíněná řada 1:5 má pět atomů kobaltu na jeden atom samaria. Na váze se v tomto provedení projeví samarium jako 36% a kobalt je pak doplňkem do 100%. Tento typ SmCo magnetu má v demagnetizovaném stavu za působení magnetického pole vyrovnat svou osu orientace s magnetickým polem a stanou se tak částečně magnetickými. To může být problém při ošetřování nebo potahování magnetu ochrannou vrstvou, protože magnet si tak může přitáhnout nečistoty a dostat se vlastnostmi mimo tolerované hodnoty

Řada 2:17 je starší a prověřené provedení SmCo magnetů. Na dva atomy samaria spadá 13 až 17 atomů tranzitních kovů, v tomto případě se jedná o kobalt, ale také se využívají jiné prvky jako například železo, měď a ve velmi malém množství zirkon nebo hafnium. Ve finále tvoří samarium 25% celkové hmotnosti této slitiny.[8]

Tab. 0.3 Zastoupení kovů v magnetu SmCo 2:17 [8]

Kov	Procento hmotnosti
Samarium	25%
Kobalt	50-75%
Železo	18%
Měď	5%
Hafnium	2%
Zirkon	2%

- **Výroba**

Nejčastější způsob výroby je metoda redukce/tavení. Využívá se pro obě řady SmCo. Nezpracované kovy se nejdříve roztaví v indukční peci v argonové atmosféře a pak se odleje do formy a schladí vodou. Tímto vznikne ingot. Ingot se rozmělní na prach a dále se rozemele, aby se dosáhlo co nejmenších částic. Prach se potom spéká při teplotě 1100°C - 1250°C a finálně se magneticky upraví v magnetickém poli při teplotě mezi 700°C a 900°C. Potom se už jen obrousí, dále zmagnetizuje a je hotovo. Dále se ještě využívá metoda redukce/difuze. [13]

2.3.3 NdFeB

- *Vlastnosti*

NdFeB magnety jsou nejčastěji používané magnety, které obsahují vzácné kovy. Obsahují neodym, železo a bor. Neodymové magnety jsou ty nejsilnější prodávané magnety. Využívají se všude, kde jsou potřeba silné permanentní magnety, ať už jsou to bezkartáčové stroje, nebo hlavy pevných disků. Samotný neodym není ideálním materiálem pro magnety, jelikož jeho Curieho teplota je -254°C , ovšem ve slitině s tranzitními kovy (železo) je možné tuto teplotu zvýšit. NdFeB magnety mají Curieho teplotu až 320°C . To není tak vysoko jako u AlNiCo a SmCo magnetů, ale jejich ostatní vlastnosti tento nedostatek vyvažují. Koercitivní síla dosahuje až 2MA/m a jedná se tedy o nejvíce magneticky odolný materiál z materiálů porovnávaných v této práci. Remanentní indukce dosahuje až $1,4\text{ T}$.

Na rozdíl od AlNiCo a SmCo má NdFeB velice nízkou odolnost proti korozi a je tak nutné ho natírat ochrannou vrstvou a vyvarovat se kontaktu s atmosférou. Koroze může být tak vážná, že se magnet rozpadne na malé magnetické částičky. Síla NdFeB magnetů může být také velice nebezpečná. Dva magnety se mohou přitáhnout tak velkou silou, že se o sebe rozbijí.[12]

- *Složení*

Mimo již v názvu uvedené prvky, tedy neodym, železo a bor, obsahují NdFeB magnety také hliník, niob a dysprosium. Tyto prvky se zde ovšem používají jen v minimálním množství. Obecně na jeden atom boru, spadají 2 atomy neodymu a 14 atomů železa.[9]

Tab. 0.3 Zastoupení kovů v magnetu NdFeB [9]

Kov	Procento hmotnosti
Neodym	29%-32%
Železo	64.2%-68.5%
Bor	1%-1.2%
Hliník	0.2%-0.4%
Niob	0.5%-1%
Dysprosium	0.8% - 1.2%

- ***Výroba***

NdFeB magnety jsou vyráběny dvěma způsoby. Prvním z nich je postup představený u SmCo magnetů, kde se odlejí ingoty, rozdrťí a rozemelou a potom se prach spéká do finálního magnetu. Další možností, jak vytvářet NdFeB magnety, je kompresní nebo injekční tvarování prášku, který se získá z tenké vrstvy NdFeB. Tato tenká vrstva se získává tak, že se roztavené NdFeB nalévá na otáčející se válec a při doteku se prudce ochladí. [12]

2.3.4 Ferity

- ***Vlastnosti***

Ferity jsou keramická sloučenina, složená z oxidu železitého, chemicky spojeného s jedním nebo více metalickými prvky. Ferity se dělí do dvou skupin na základě jejich koercivity. Pro účely permanentních magnetů se využívají tvrdé ferity. Ty jsou tvořeny z oxidů železa jako hematit a magnetit a dále uhličitany baria a stroncia. Toto složení umožňuje keramickým feritovým magnetům udržet silné magnetické pole. Koercivita zhruba dosahuje až 160 kA/m. Remanentní indukce ovšem nedosahuje vysokých hodnot. Dosahujeme hodnot okolo 0,4 Tesla. Tvrdé ferity se dříve využívaly v počítačových pamětech. Nyní se využívají v elektronice, vojenské technice a průmyslových aplikacích. Curieho teplota dosahuje přibližně 723°C.

- ***Složení***

Ferity se skládají z různých oxidů železa. Například hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4). Dále také uhličitany baria a stroncia. Stronciové ferity se využívají v malých elektromotorech, nahrávání a telekomunikacích. Bariové ferity se využívají na permanentní magnety v reproduktorech. Kobaltové ferity se využívají v magnetických nahrávacích zařízeních.

- ***Výroba***

Barium a stroncium se vyskytuje v oxidech. Tyto oxidy jsou spolu s oxidem železa spékány dohromady. Výsledný polotovar se rozele na mikro částičky, které jsou dostatečně malé, aby v nich byl pouze jeden směr magnetizace. Prach se potom stlačí do

požadovaného tvaru, usuší a znovu speče. Tvarování se provádí v magnetickém poli a tím se zajistí, že částice budou správně orientovány.

2.3.5 Porovnání typických hodnot slitin magnetů

Tab. 0.4 Porovnání typických vlastností slitin

	Indukce[T]	Koercivita[kA/m]	Curieho teplota [°C]
AlNiCo	1,2	80	800
SmCo	1,16	1600	800
NdFeB	1,4	2000	320
Ferity	0,4	160	723

3 Simulace obvodu s permanentním magnetem

Hlavní porovnání materiálů proběhne v této části práce. Simulace metodou konečných prvků ukáže, jaký bude mít vytvořené pole tvar a jakých hodnot je možno v obvodu dosáhnout.

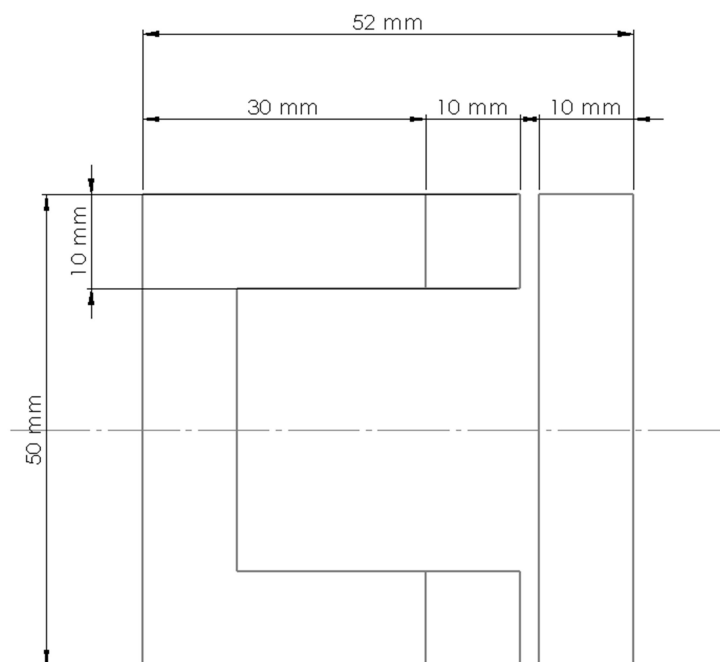
3.1 Používaný software

Pro simulaci obvodu s permanentním magnetem, byl zvolen program FEMM. FEMM je volně použitelný simulační program, zaměřený na simulaci magnetických, elektrostatických, tepelných a proudových úloh pomocí metody konečných prvků. Byl vytvořen Davidem Meekerem, Ph.D. v roce 1998. Program FEMM má základní uživatelské rozhraní. Magnetický obvod se zde dá velice snadno narýsovat základní geometrií bodů, čar a ploch. Je možno nastavit si rozlišení mřížky a následné narýsování obvodu je velice snadné. Dále už je jen třeba nastavit plochám různé vlastnosti. To je možné několika způsoby. Jedním z nich je využití přiložené knihovny materiálů a jejich vlastností. Je také možnost vkládat své vlastní materiály a to buď pomocí statického lineárního parametru, nebo pomocí křivek. Je možné křivky zadat bodově a program si je sám proloží křivkou. Po nastavení materiálu v různých plochách, je možné simulaci spustit. Jedna z možností je nastavit si hloubku úlohy, frekvenci a počáteční podmínky. Software vytvoří mřížku, jejíž velikost je možné nastavit. Poté už program vygeneruje výslednou simulaci pole. Je možné zobrazit pole v barevném spektru, nebo v černobílém rozsahu. Dále jsou zde plošné a křivkové integrály a také je možné vytvářet X-Y grafy.

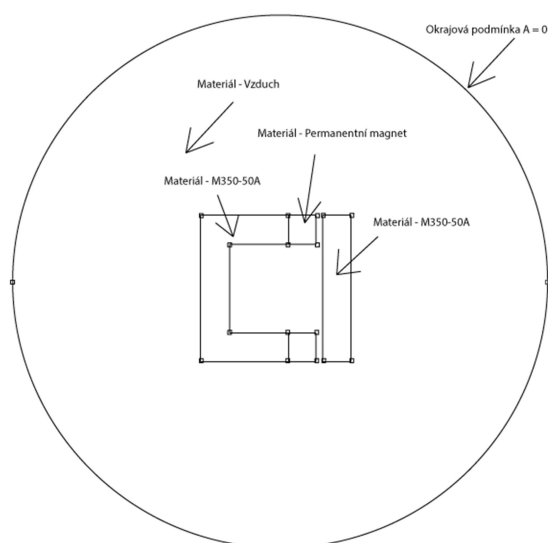
FEMM je poměrně jednoduchý program, který má docela rozsáhlou komunitu, na kterou je možné se obrátit o pomoc. Práce s programem je občas krkolomná, ale velice intuitivní. Časy simulací jsou velice krátké a na 64bitové platformě jsou prakticky okamžité. FEMM neumí pohyblivé simulace, ale to se dá napravit možností rotace již hotového pole. Je tak možné využít krátkých simulačních časů k vytvoření několika vzorků při otáčení. Všeobecně se jedná o velice schopný program, který je velmi vhodný pro simulaci v této bakalářské práci.

3.2 Podmínky simulace

Simuluje se magnetický obvod, který obsahuje dva souhlasně působící magnety, které jsou umístěny v železném obvodu. Železný obvod je tvořen z železa M350 – 50A. Do programu FEMM byl namodelován pomocí nelineární charakteristiky. Materiál magnetů zadávám pomocí koercitivní síly a dopočtené permeability. V okolním prostředí je vzduch a samotný obvod je přerušen vzduchovou mezerou o šířce dva milimetry. Obvod má tvar CI a jeho rozměry jsou 50×52 milimetrů. Šířka plechů je 10mm, délka magnetů je také 10mm. Hloubka úlohy je 1 milimetr. Výsledkem simulace je indukce ve vzduchové mezeře a uprostřed železné části obvodu. Indukci měřím pomocí křivkového integrálu. Barevné spektrum pro indukci v obvodu volím od 0 do 1,2 T. Tento rozsah by měl být dostačující pro plné zachycení indukce pro všechny materiály, které budu simulovat. Dále bude zjišťována intenzita magnetického pole a to hlavně ve vzduchové mezeře. Bude proto nalezena maximální hodnota, kterou simulační program zjistí. Také bude ještě zjištěna přitažná síla kotvy. Výsledkem simulace bude tabulka, ve které bude porovnání indukci ve vzduchové mezeře, indukci v jádře, nejvyšší intenzity ve vzduchové mezeře, přitažní sílu kotvy a hodnoty udávané výrobcem. Tím se získá přehled o rozdílech v použitých materiálech.



Obr. 3.2.1 Okótovaný náčrt magnetického obvodu

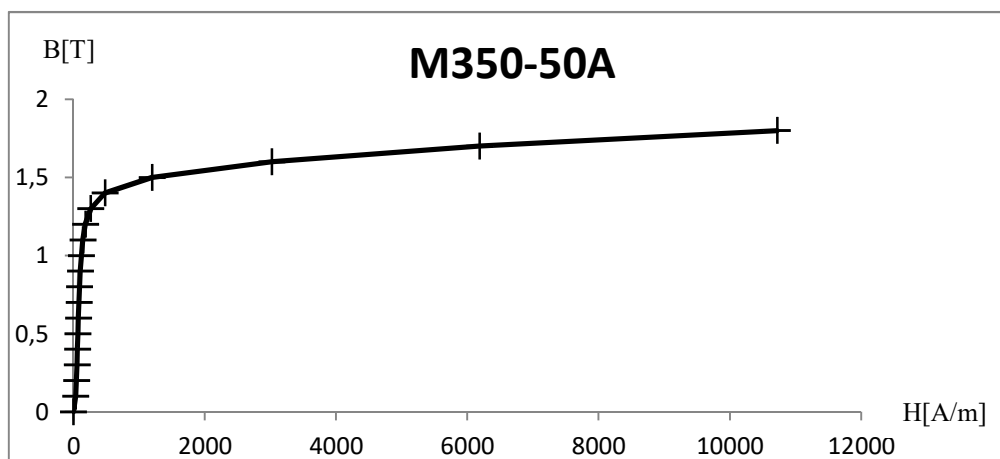


Obr. 3.2.2 Nastavení simulace v programu FEMM

3.3 Simulované materiály

3.3.1 Železo M350-50A

M350-50A je materiál, který se běžně využívá na výrobu elektrotechnických plechů ve strojích a transformátorech. Je to magneticky velmi měkký materiál a jeho koercitivní síla je pouhých 45 A/m. Hysterezní smyčka tohoto materiálu je tak velice úzká, je tedy velmi vhodný pro tvoření magnetických obvodů. V simulačním programu FEMM je tento materiál matematicky modelován pomocí magnetizační křivky, kterou lze nalézt v datasheetu tohoto materiálu.



Obr. 3.3.2 Magnetizační křivka materiálu M350-50A

3.3.2 AlNiCo magnety

Z rodiny AlNiCo magnetů byly vybrány materiály AlNiCo 5, AlNiCo 6 a ArKomax 800. Jedná se o nejčastěji používané formy AlNiCo magnetů. Jsou to slabší magnety s nízkou koerzivní silou, ale jsou velice levné a tak se velmi často využívají. Pomocí BH křivky výrobce Arnold Magnetics byly zadány tyto materiály jako nelineární BH křivku.

3.3.3 NdFeB magnety

Ze skupiny NdFeB magnetů byly zvoleny tři magnety od dodavatele Arnold Magnetics. Jedná se o NdFeB materiály s maximální provozní teplotou 120°C. Konkrétně jsou simulovány materiály N30H, N40H a N50H.

3.3.4 SmCo magnety

SmCo magnety budou také simulovány dle parametrů udávaných výrobcem Arnold Magnetics. Jedná se o magnety RECOMA® 18, RECOMA® 30 a RECOMA® 32. Vybrány byly tyto tři proto, abych ukázal rozdíly mezi silnějším magnetem, magnetem zhruba uprostřed a nejslabším prodáváním.

3.3.5 Vlastnosti materiálů udávané výrobcem

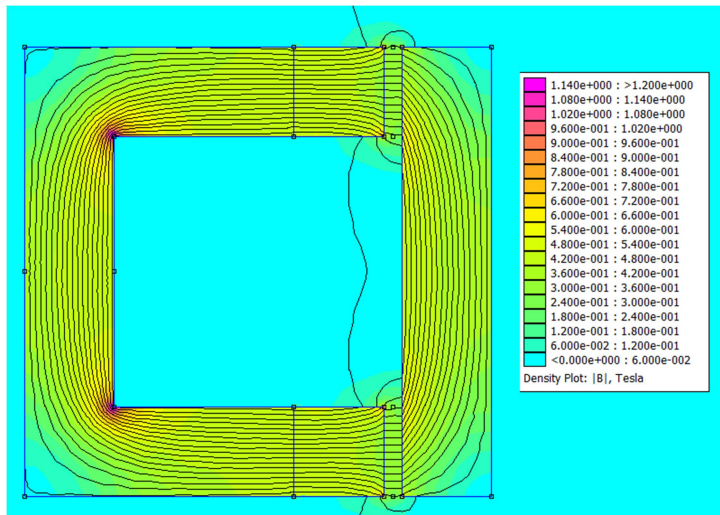
Tab. 3.3.1. Porovnání vlastností udaných výrobcem Arnold Magnetics

	ΔB_R [%/°K]	ΔH_C [%/°K]	γ [MS/m]	T_{MAX} [°C]	T_C [°C]
AlNiCo 5	-0,020	-0,020	2,13	525	800
AlNiCo 6	-0,020	-0,020	2,13	525	800
ArKomax 800	-0,020	-0,020	2,13	525	800
N30H	-0,120	-0,605	0,56	120	310
N40H	-0,120	-0,605	0,56	120	310
N50H	-0,120	-0,605	0,56	120	310
RECOMA® 18	-0,045	-0,190	1,82	250	725
RECOMA® 30	-0,035	-0,250	1,11	250	825
RECOMA® 32	-0,035	-0,250	1,11	250	825

3.1 Simulace AlNiCo

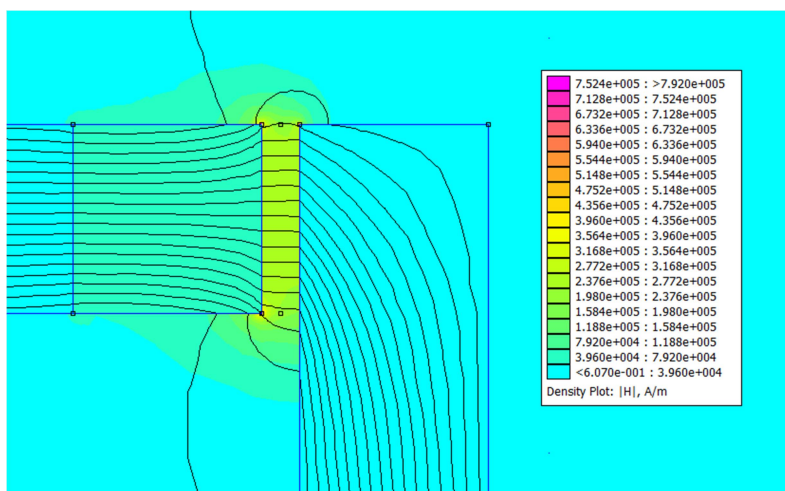
3.1.1 AlNiCo 5

- *Magnetická indukce*



Obr. 3.5.3 Simulace tvaru magnetické indukce a siločar pro magnet AlNiCo 5

- *Intenzita magnetického pole*



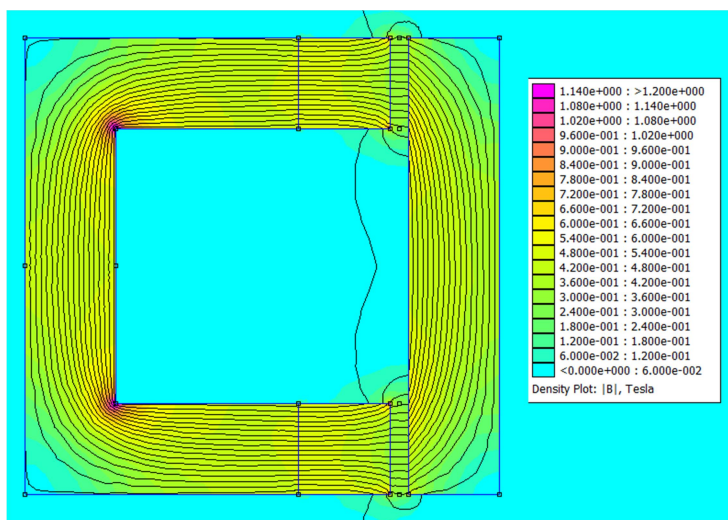
Obr. 3.5.2 Simulace intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře pro magnet AlNiCo 5

- *Výsledky*

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře je 305 mT. V magnetickém obvodu byla zjištěna hodnota magnetické indukce 432 mT. Maximální intenzita ve vzduchové mezeře je 749 kA/m.

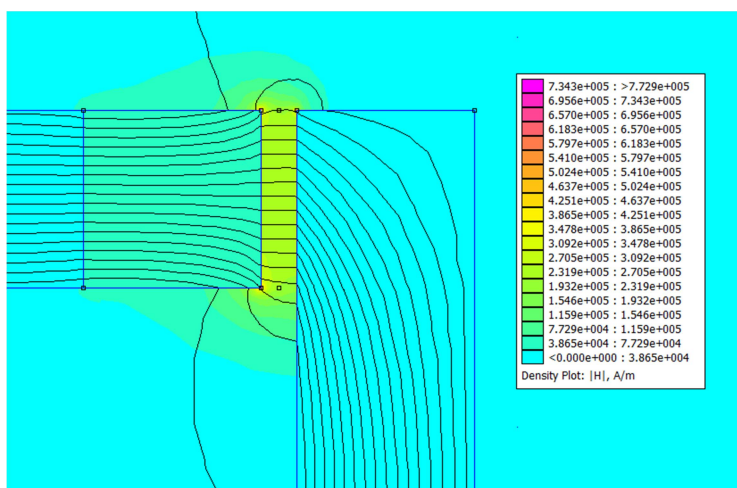
3.1.2 AlNiCo 6

- *Magnetická indukce*



Obr. 3.5.4 Simulace tvaru magnetické indukce a siločar pro magnet AlNiCo 6

- *Intenzita magnetického pole*



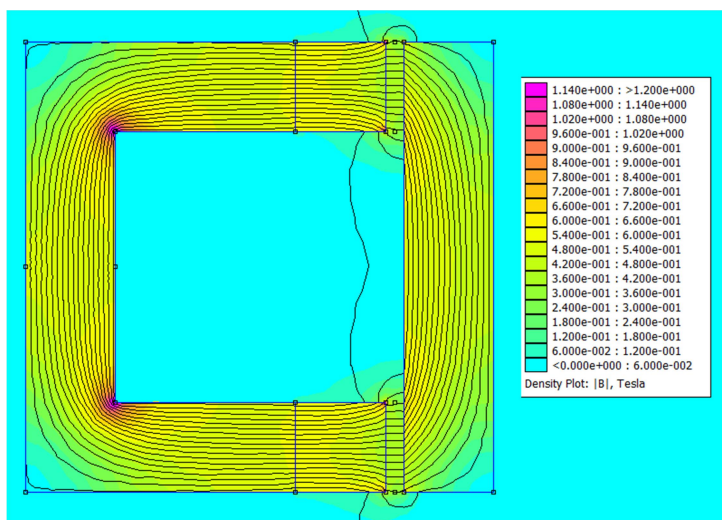
Obr. 3.5.2 Simulace intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře pro magnet AlNiCo 6

- *Výsledky*

Velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře je 324 mT. Ve středu magnetického obvodu je hodnota magnetické indukce 456mT. Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře se přibližuje 731 kA/m.

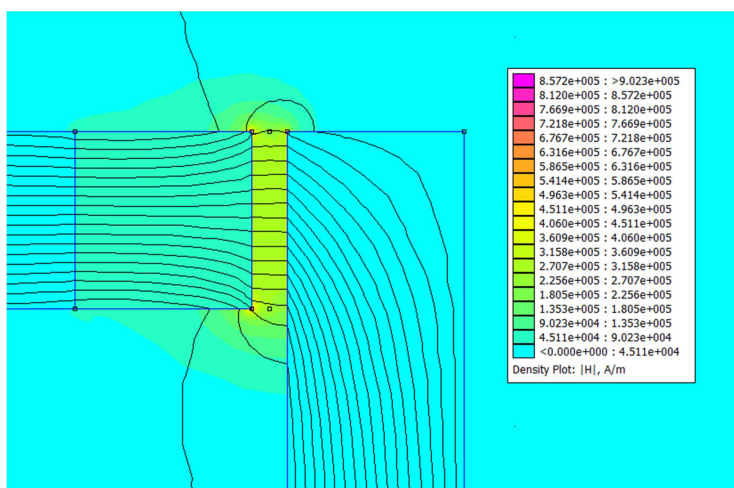
3.1.3 ArKomax® 800

- **Magnetická indukce**



Obr. 3.5.5 Simulace tvaru magnetické indukce a siločar pro magnet ArKomax® 800

- **Intenzita magnetického pole**



Obr. 3.5.2 Simulace intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře pro magnet ArKomax® 800

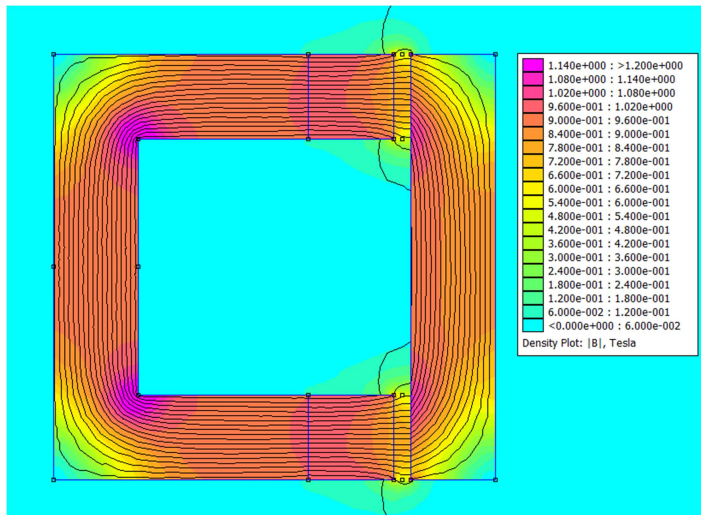
- **Výsledky**

Ve vzduchové mezeře byla zjištěna magnetická indukce 359 mT. V železném jádře je hodnota magnetické indukce 508 mT. Maximální intenzita magnetického pole vzduchové mezery je 855 kA/m.

3.2 Simulace NdFeB

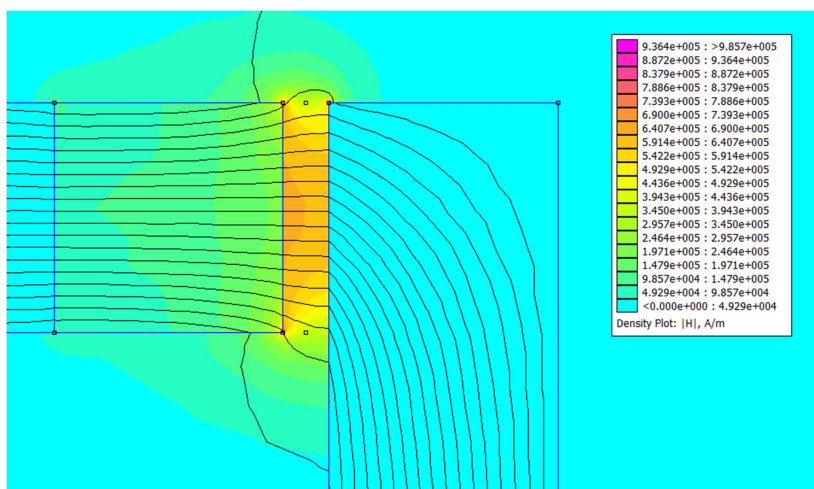
3.2.1 N30H

- *Magnetická indukce*



Obr. 3.5.6 Simulace tvaru magnetické indukce a siločar pro magnet N30H

- *Intenzita magnetického pole*



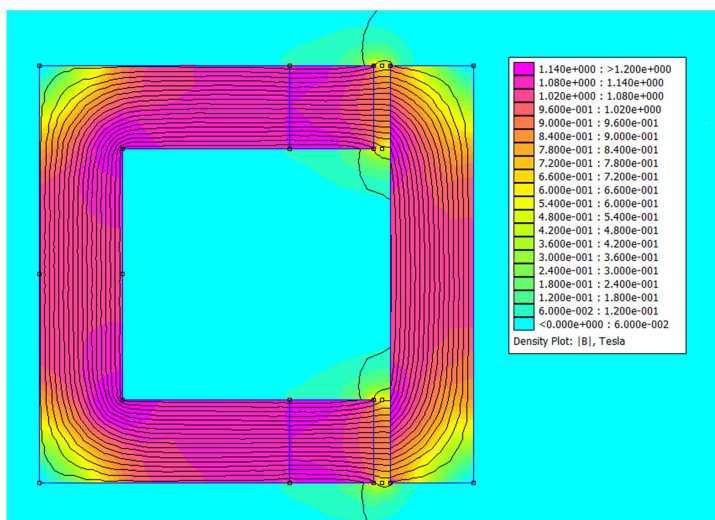
Obr. 3.5.2 Simulace intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře pro magnet N30H

- *Výsledky*

Ve vzduchové mezeře byla zjištěna indukce 725 mT. Uprostřed magnetického obvodu je indukce vyšší. Zjištěna tam byla indukce 926 mT. Maximální intenzita ve vzduchové mezeře dosahuje 835 kA/m. Jelikož se jedná o nejslabší magnet z řady, měly by se výsledky dále zvyšovat.

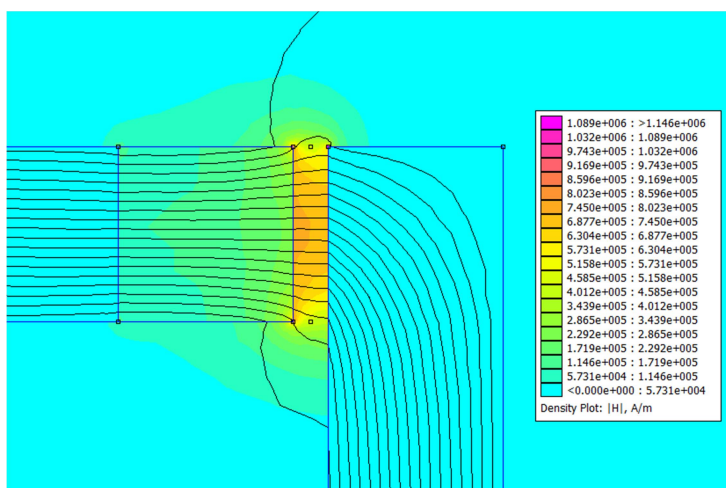
3.2.2 N40H

- *Magnetická indukce*



Obr. 3.5.3 Simulace tvaru magnetické indukce a siločar pro magnet N40H

- *Intenzita magnetického pole*



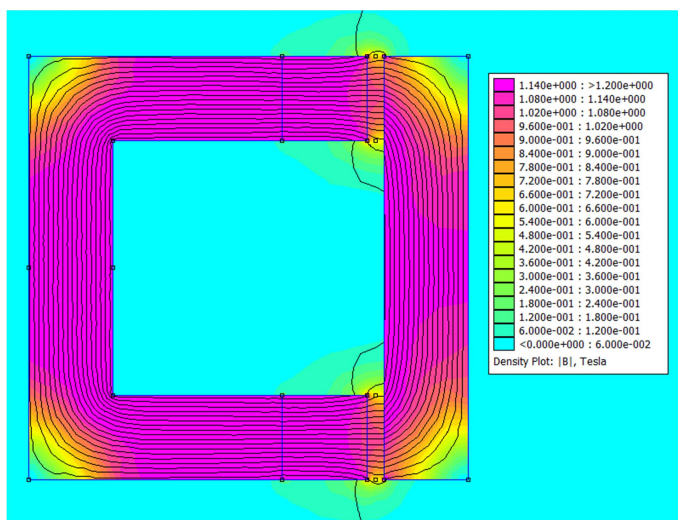
Obr. 3.5.4 Simulace intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře pro magnet N40H

- *Výsledky*

Ve vzduchové mezeře byla zjištěna magnetická indukce 843 mT. Indukce uprostřed magnetického obvodu je indukce 1077 mT. Nejvyšší intenzita dosahuje ve vzduchové mezeře hodnoty 970 kA/m.

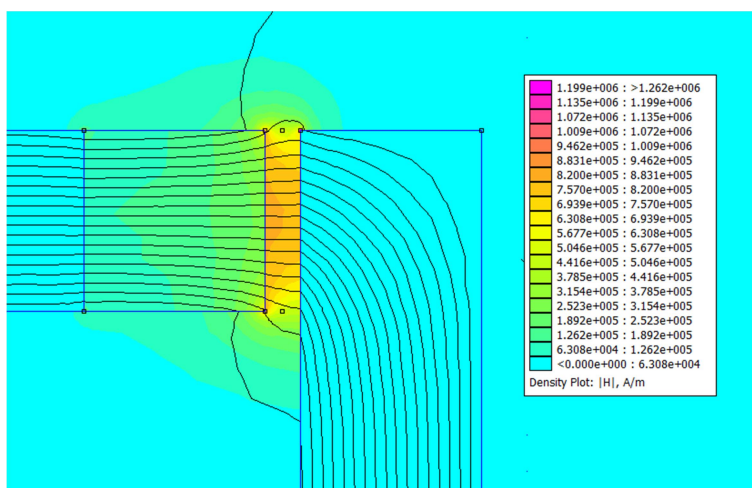
3.2.3 N50H

- *Magnetická indukce*



Obr. 3.5.5 Simulace tvaru magnetické indukce a siločar pro magnet N50H

- *Intenzita magnetického pole*



Obr. 3.5.6 Simulace intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře pro magnet N50H

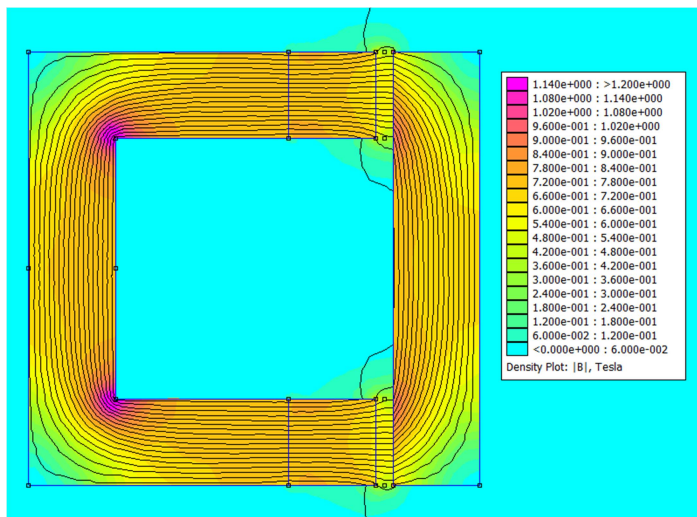
- *Výsledky*

Zjištěná indukce ve vzduchové mezeře je 929 mT. Indukce uprostřed magnetického jádra je 1185 mT. Maximální hodnota magnetické intenzity ve vzduchové mezeře je 1070 kA/m.

3.3 Simulace SmCo

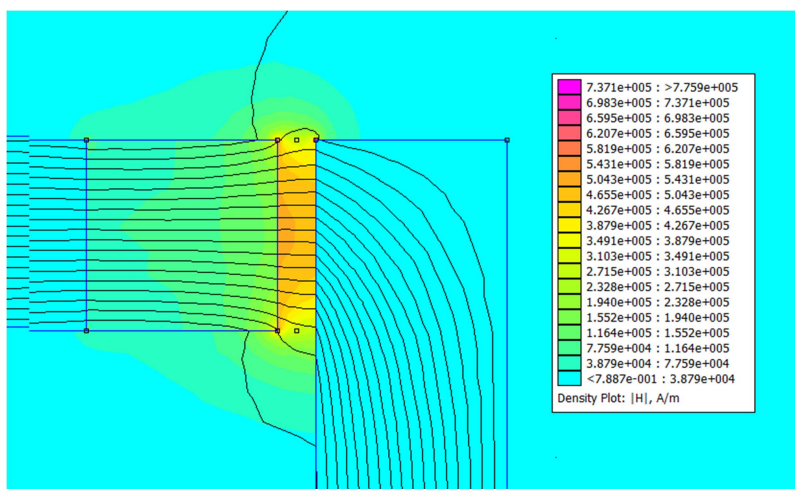
3.3.1 RECOMA® 18

- *Magnetická indukce*



Obr. 3.6.1 Simulace tvaru magnetické indukce a siločar pro magnet RECOMA® 18

- *Intenzita magnetického pole*



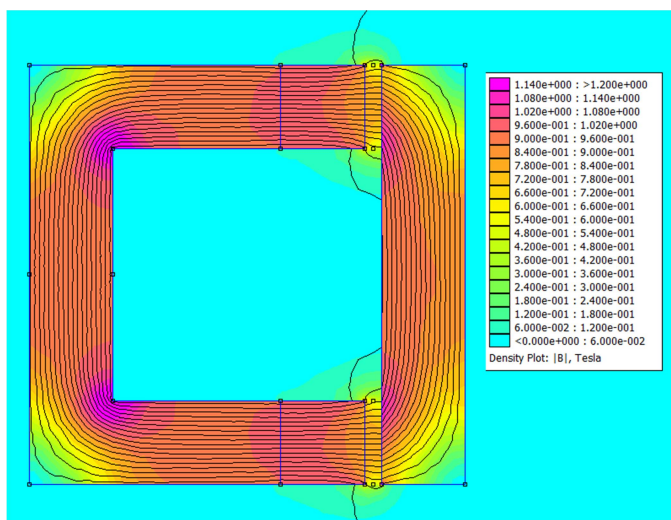
Obr. 3.6.2 Simulace intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře pro magnet RECOMA® 18

- *Výsledky*

Magnet z materiálu RECOMA® 18 vytvořil ve vzduchové mezeře indukci 568 mT. Ve středu železného jádra je indukce 729mT. Maximální intenzita ve vzduchové mezeře je 655 kA/m.

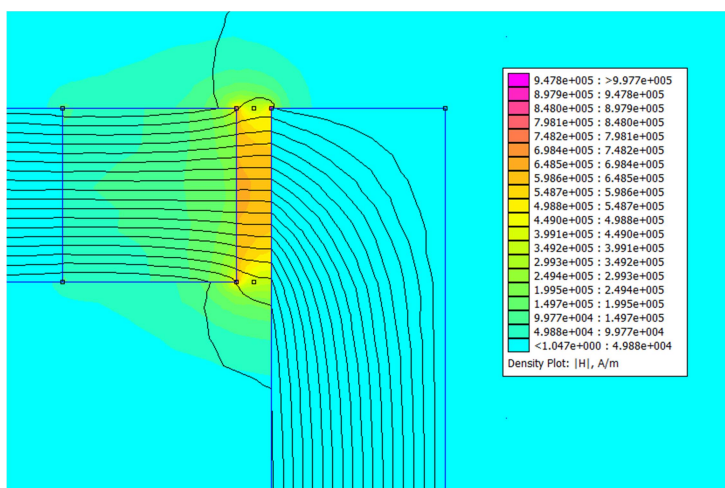
3.3.2 RECOMA® 30

- **Magnetická indukce**



Obr. 3.6.3 Simulace tvaru magnetické indukce a siločar pro magnet RECOMA® 30

- **Intenzita magnetického pole**



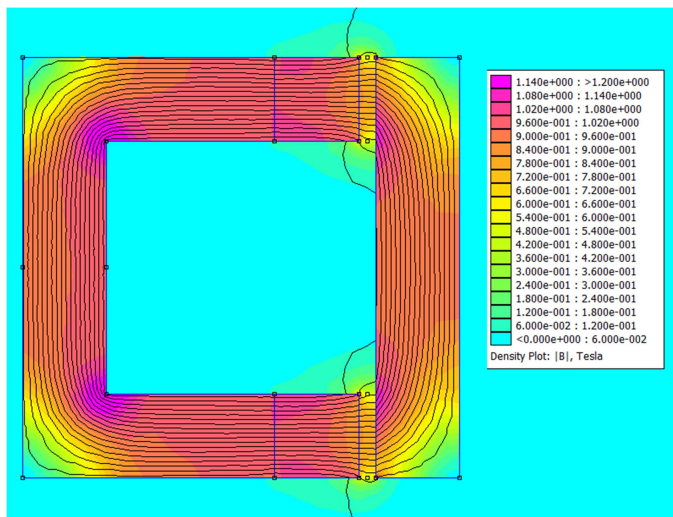
Obr. 3.6.4 Simulace intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře pro magnet RECOMA® 30

- **Výsledky**

Hodnota indukce ve vzduchové mezeře je 732 mT. Uprostřed železné části je indukce rovna 936 mT. Nejvyšší hodnota intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře byla zjištěna 845 kA/m.

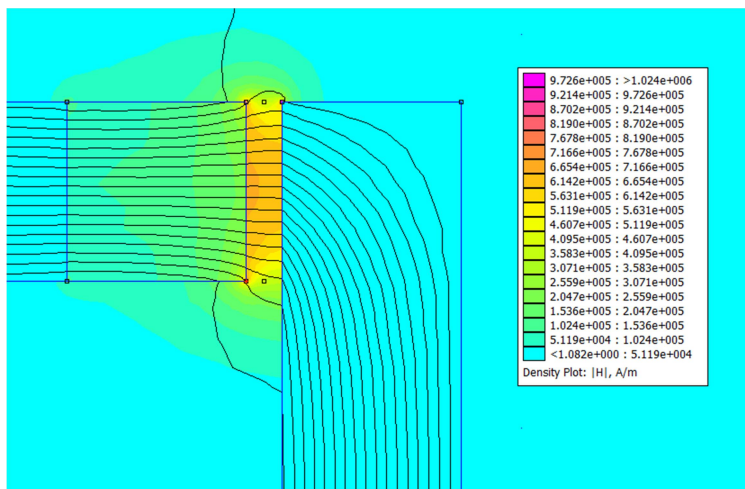
3.3.3 RECOMA® 32

- *Magnetická indukce*



Obr. 3.6.5 Simulace tvaru magnetické indukce a siločar pro magnet RECOMA® 32

- *Intenzita magnetického pole*



Obr. 3.6.6 Simulace intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře pro magnet RECOMA® 32

- *Výsledky*

Výsledná indukce ve vzduchové mezeře je 750 mT. Zjištěná indukce uprostřed magnetického obvodu je 959mT. Maximální intenzita ve vzduchové mezeře je 866 kA/m.

3.4 Tabulka výsledků

Tab. 3.4.1 Souhrn výsledných zjištěných hodnot

	B_R [mT]	H_C [kA/m]	B_0 [mT]	B_{FE} [mT]	H_{MAX} [kA/m]	F_X [mN]
AlNiCo 5	1250	51	305	432	749	835
AlNiCo 6	1080	60	324	456	731	937
ArKomag 800	1370	59	359	508	855	1154
N30H	1105	828	725	926	835	4417
N40H	1285	963	843	1077	970	6007
N50H	1415	1066	929	1185	1070	7291
RECOMA® 18	870	650	568	729	655	2750
RECOMA® 30	1120	820	732	936	845	4526
RECOMA® 32	1150	835	750	959	866	4757

Závěr

Bakalářská práce se zabývá rozdíly v materiálech permanentních magnetů. Porovnávají v ní jejich druhy, složení a vlastnosti. Dále byla vytvořena simulace pro tři různé druhy magnetů, které se využívají v rotorech synchronních strojů. Ze simulace se zjistilo, jaký vliv má volba materiálu na finální parametry stroje. Porovnány byly magnetické indukce, intenzity a přitažné síly v magnetickém obvodu.

Ze simulace vyplývá, že NdFeB magnety jsou opravdu ze tří testovaných skupin nejsilnější. Nejen že materiál N50H má největší koerzivní sílu, má také nejvyšší magnetickou indukci ve vzduchové mezeře a magnetickém poli. ($B_0 = 929$ mT, $B_{FE} = 1185$ mT). Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře a přitažná síla ($H_{MAX} = 1070$ kA/m a $F_X = 7291$ mN) jsou také nejvyšší ze všech simulovaných materiálů. Permanentní magnety z materiálu NdFeB jsou tak zjevně jasnou volbou pro využití v synchronních strojích s permanentními magnety. Omezující faktor NdFeB magnetů je jeho maximální pracovní teplota ($T_{MAX} = 310^\circ\text{C}$ pro materiál N50H) a také jejich síla. Při větších rozměrech jsou tyto magnety velice silné a tím pádem nebezpečné sobě i svému okolí. Mohou poranit při montáži nebo se zničit.

Těchto nevýhod se zbavíme využitím SmCo magnetů, které mají vyšší maximální provozní teplotu ($T_{MAX} = 250$ °C) a jsou přitom jen o něco slabší. Je tedy možné využít je v aplikacích, kde je potřeba vysokých otáček a dosahuje se vyšších ztrát vířivými proudy. Hlavní nevýhodou SmCo magnetů je ovšem cena. Značně omezuje jejich využití v servopohonech, jelikož synchronní stroje s permanentními magnety jsou již dražší než jejich protějšky s vinutím a tímto by se cenový rozdíl jen a jen navyšoval.

Posledním simulovaným materiálem byly magnety AlNiCo. Ty jsou nejslabší, ale zároveň nejlevnější. Mají ještě vyšší maximální provozní teplotu ($T_{MAX} = 525^\circ\text{C}$) než SmCo magnety a přitom stojí jenom zlomek ceny. Díky této kombinaci vlastností se jedná o nejčastěji volené magnety tam, kde to zadání a požadavky na stroj dovolují.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HANSELMAN, Duane. *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. 2nd Edition. Lebanon (Ohio): Magna Physics Publishing, 2006. ISBN 978-1932133639.
- [2] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVA. *Design of Rotating Electrical Machines*. Hoboken (New Jersey): Wiley, 2009. ISBN 978-0470695166.
- [3] *Synchronní stroje* [online]. Dobruška [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/SG.pdf>. SPŠel-it Dobruška.
- [4] AC Induction Motors vs. Permanent Magnet Synchronous Motors. In: *Empowering Pumps* [online]. Tuscaloosa (Alabama): Empowering Pumps, 2017 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://empoweringpumps.com/ac-induction-motors-versus-permanent-magnet-synchronous-motors-fuji/>
- [5] Typical data for SURA M350-50A. In: *Cogent: A Tata Steel Enterprise* [online]. Surahammar (Švédsko: Cogent Power, 2009 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m350-50a.pdf>
- [6] *Synchronní stroj s permanentními magnety* [online]. In: . Praha 8: Ustav teorie informace a automatizace, s. 1-2 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://mys.utia.cas.cz:1800/trac/bdm/export/1442/applications/dual/vahala/DP/kapitola1.pdf>
- [7] Which metals conduct electricity? *METAL supermarkets: The Convenience Stores For Metal* [online]. Mississauga (Kanada): Metal Supermarkets, 2017 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.metalsupermarkets.com/which-metals-conduct-electricity/>
- [8] SmCo Products Overview. *Adams Magnetic Products* [online]. Elmhurst (Illinois): Adams Magnetic Products, 2017 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.adamsmagnetic.com/rare-earth-magnets/samarium-cobalt-smco-magnets>
- [9] How Neodymium Magnets are made. *E-Magnets* [online]. Berkhamsted (Anglie): Bunting Magnetics [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: http://e-magnetsuk.com/neodymium_magnets/neodymium_magnets_made.aspx
- [10] How Alnico Magnets are made. *E-Magnets* [online]. Berkhamsted (Anglie): Bunting Magnetics [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: http://e-magnetsuk.com/alnico_magnets/alnico_magnets_made.aspx
- [11] Conductive materials. *Tibtech* [online]. Roncq (Francie): NPC MEDIA Création - Webagency, 2011 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.tibtech.com/conductivity.php>

- [12] Neodymium magnet. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017. Dostupné také z: https://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnet
- [13] Samarium-cobalt magnet. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017. Dostupné také z: https://en.wikipedia.org/wiki/Samarium-cobalt_magnet
- [14] AlNiCo. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017. Dostupné také z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Alnico>
- [15] Trafoplech. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017. Dostupné také z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Trafoplech>
- [16] Permeability. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017. Dostupné také z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_\(electromagnetism\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism))
- [17] Bor. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017. Dostupné také z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Bor_\(prvek\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Bor_(prvek))
- [18] Samarium. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017. Dostupné také z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Samarium>
- [19] Neodym. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017. Dostupné také z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Neodym>
- [20] Nikl. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017. Dostupné také z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl>
- [21] Kobalt. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017. Dostupné také z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kobalt>
- [22] Hliník. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017. Dostupné také z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hlin%C3%ADk>
- [23] Železo. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017. Dostupné také z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezo>
- [24] *Elektro: Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice (1. část)* [online]. Praha 8: FCC Public, 2017, **2017**(5) [cit. 2017-06-05]. ISSN 1210-0889.
- [25] SYNCHRONNÍ STROJE. *Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava* [online]. Ostrava, 2005 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_synchronni_stroje_bc.pdf

- [26] Construction of Induction Motor. *Circuit Globe* [online]. Circuit Globe, 2016 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://circuitglobe.com/construction-of-induction-motor.html>
- [27] Why Magnets Lose Strength: The Effects of Volume Loss, Geometry, Elevated Temperature, and Demagnetization from External Fields. *Dura Magnetics* [online]. Sylvania (Ohio): Dura Magnetics, 2014 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://www.duramag.com/techtalk/tech-briefs/why-magnets-lose-strength-the-effects-of-volume-loss-geometry-elevated-temperature-and-demagnetization-from-external-fields/>
- [28] *Vědeckotechnický sborník ČD* [online]. Praha 3: Ředitelství ČD, 2010 [cit. 2017-06-05]. ISSN 1214-9047. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/51448/51577/2908.pdf/0cfb0eda-cd8d-42f1-941e-b4e3ed2dfd2a>

Přílohy

Příloha A.1 – Datasheet materiálu M350-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,02	0,08	36,4	0.06	0.17	0,48	2.02	8.34
0,2	0,09	0,20	48,1	0.24	0.62	1,75	7.15	29.0
0,3	0,18	0,36	56,1	0.50	1.30	3,62	14.7	60.1
0,4	0,30	0,54	63,2	0.81	2.15	6,02	24.6	104
0,5	0,44	0,75	70,2	1.18	3.17	8,96	37.2	162
0,6	0,59	0,99	77,5	1.60	4.36	12,5	53.1	241
0,7	0,76	1,27	85,6	2.08	5.73	16,6	72.7	343
0,8	0,95	1,58	94,8	2.62	7.31	21,5	96.9	474
0,9	1,16	1,94	106	3.21	9.09	27,2	126	638
1,0	1,39	2,39	122	3.88	11.1	33,8	162	840
1,1	1,65	2,96	146	4.61	13.4	41,5	204	1079
1,2	1,95	3,76	185	5.43	16.0	50,4	254	1360
1,3	2,29	5,11	264	6.37	18.9	60,4	312	1679
1,4	2,75	8,40	481	7.53	22.3	72,1	378	2036
1,5	3,29	19,8	1200	8.99	26.6	85,7	456	2316
1,6	4,41	54,1	3025					
1,7	4,77	124	6186					
1,8	5,00	238	10720					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	3,29
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	1,39
Anisotropy of loss, %	10

Magnetic polarization at 50 Hz

H = 2500 A/m, T	1,58
H = 5000 A/m, T	1,67
H = 10000 A/m, T	1,78

Coercivity (DC), A/m	45
Relative permeability at 1.5 T	1050
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	42

Yield strength, N/mm ²	320
Tensile strength, N/mm ²	460
Young's modulus, RD, N/mm ²	200 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	210 000
Hardness HV5 (VPN)	160

RD represents the rolling direction
 TD represents the transverse direction
 Values for yield strength (0.2 % proof strength)
 and tensile strength are given for the rolling direction
 Values for the transverse direction are approximately 5% higher