



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra kybernetiky

## Modelování magnetického pole snímače otáček metodou konečných prvků

**Marek Janota**

Vedoucí: doc. Antonín Platil  
Obor: Robotika  
Studijní program: Kybernetika a robotika  
Květen 2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student:** Marek J a n o t a

**Studijní program:** Kybernetika a robotika (bakalářský)

**Obor:** Robotika

**Název tématu:** Modelování magnetického pole snímače otáček metodou konečných prvků

### Pokyny pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je vytvoření modelu feromagnetických součástí snímače otáček a provedení simulace metodou konečných prvků.

1. Vytvořte trojrozměrnou simulaci rozložení magnetického pole ve FEM prostředí pro návrh snímače otáček s permanentními magnety a pohyblivými feromagnetickými součástmi.
2. Realizujte feromagnetické součásti a ověřte experimentálně shodu simulovaných výsledků s fyzickým provedením.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Draxler, K. - Kašpar, P. - Ripka, P.: Magnetické prvky a měření Praha: ČVUT, 1994. 276 s. ISBN 80-01-01080-5.
- [2] Dokumentace simulačního software Cedrat Flux.

**Vedoucí bakalářské práce:** doc. Ing. Antonín Platil, Ph.D.

**Platnost zadání:** do konce letního semestru 2017/2018

L.S.

prof. Dr. Ing. Jan Kybic  
**vedoucí katedry**

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
**děkan**

V Praze dne 10. 1. 2017

## Poděkování

Děkuji vedoucímu mé práce, kterým byl doc. Antonín Platil, za odborné vedení a možnost seznámit se s problematikou 3D simulací magnetických stacionárních polí.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 20. května 2017

.....

Podpis autora práce

## Abstrakt

Cílem mé bakalářské práce je vytvoření modelu feromagnetických součástí snímače otáček a následná simulace pomocí FEM. FEM (finite element method) je metoda končených prvků, která slouží k numerickému řešení problémů v technice a matematické fyzice. Rozděluje problémy na menší elementární části (konечné prvky), pro které dopočítá podle zadaných vlastností požadované parametry a následně jsou tyto prvky sloučeny dohromady a tím vzniká řešení zadaného problému. V mé práci se budu zabývat návrhem a simulací feromagnetických součástí v interakci se stacionárním magnetickým polem generovaným permanentním magnetem. Budu se snažit navrhnout takový magnet, který bude schopen pracovat při teplotách od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$  a zároveň bude generovat dostatečně velký rozdíl magnetických indukci v závislosti na poloze feromagnetické součásti. V ideálním případě by měl být rozdíl 10 mT kvůli následnému vyhodnocení Hallovým senzorem s logickým výstupem.

**Klíčová slova:** magnet, simulace, FEM, magnetické pole, snímač otáček

**Vedoucí:** doc. Antonín Platil  
Katedra měření  
Technická 2  
166 27 Praha 6  
platil@fel.cvut.cz

## Abstract

The aim of my bachelor thesis is creating a model with ferromagnetic parts of speed sensor and than FEM (finite element method) simulation of magnetic field. In my work I will be dealing with simulation of ferromagnetic parts in interaction with static magnetic field generated by permanent magnet. I will try to design magnet, that would work in temperature range from  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$  and at the same time it would generate sufficient difference of magnetic flux densities according to position of ferromagnetic part. Ideally the difference should be 10 mT or more, so that we can easily measure and evaluate speed of rotation by Hall sensor.

**Keywords:** magnet, simulation, FEM, magnetic field, rotation sensor

**Title translation:** Final Element Modeling of Rotational Speed Sensor Magnetic Field

## Obsah

|   |           |  |           |
|---|-----------|--|-----------|
| <b>1 Simulace</b>   | <b>1</b>  | <b>3 Konstrukce fyzického vzorku a měření na něm</b> | <b>15</b> |
| 1.1 Seznámení s Flux 3D   | 1         | 3.1 Měření na fyzickém vzorku                        | 15        |
| 1.2 Vytvoření geometrie (Geometry)                              | 3         | 3.2 Porovnání naměřených hodnot se simulací          | 16        |
| 1.3 Tvorba sítě bodů (Mesh)                                     | 5         | <b>4 Cenová analýza jednotlivých možností</b>        | <b>21</b> |
| 1.4 Definice fyzikálních vlastností (Physics)                   | 7         | 4.1 Aktuální cena                                    | 21        |
| 1.5 Řešení (Solving)  | 8         | 4.2 Cenová stabilita v minulosti a možná rizika      | 22        |
| 1.6 Zpracování výsledků (Post processing)                       | 9         | <b>5 Závěr</b>                                       | <b>25</b> |
| <b>2 Výběr vhodného materiálu</b>                               | <b>11</b> | 5.1 Doporučení nejvhodnější technologie a řešení     | 26        |
| 2.1 Analýza dostupných magnetických materiálů a jejich srovnání | 11        | <b>A Literatura</b>                                  | <b>27</b> |
| 2.1.1 Teplotní odolnost   | 12        |  |           |
| 2.1.2 Velikost a tvar   | 13        |  |           |
| 2.1.3 Cena  | 13        |  |           |
| 2.1.4 Korozní odolnost  | 14        |  |           |
| 2.1.5 Mechanická odolnost                                       | 14        |  |           |

## Obrázky

|   |    |   |    |
|---|----|---|----|
| 1.1 Snímek obrazovky Flux 3D . . . . .  | 2  | 3.3 Graf závislosti magnetické indukce na poloze feromagnetické součásti (simulace) . . . . . | 18 |
| 1.2 Rotující feromagnetická součást . . . . .   | 3  | 3.4 Původní naměřená data na osciloskopu . . . . .  | 19 |
| 1.3 3D zjednodušený model feromagnetické součásti . . . . .                                     | 4  | 3.5 Naměřená data zpracovaná v Matlabu pomocí funkce "smooth" . . . . .                       | 19 |
| 1.4 Model magnetu s pólovým nástavcem ve tvaru komolého kuželu . . . . .                        | 5  | 4.1 Vývoj ceny kobaltu (Co) v letech 2005 - 2017, převzato z [3] . . . . .                    | 22 |
| 1.5 Řez celým modelem v rovině XY s vyobrazenou mesh a hodnotami magnetické indukce . . . . .   | 6  | 4.2 Vývoj ceny neodymu (Nd) v letech 2001 - 2012, převzato z [3] . . . . .                    | 23 |
| 1.6 Řez celým modelem v rovině XY po přidání pomocného tělesa ze vzduchu . . . . .              | 6  |   |    |
| 1.7 Dialog pro zadávání parametrů magneticky tvrdých materiálů . . . . .                        | 8  |   |    |
| 1.8 Dialog pro vytváření simulačních scénářů . . . . .  | 9  |   |    |
| 1.9 Obarvený model podle hodnot magnetické indukce v daném bodě . . . . .                       | 10 |   |    |
| 3.1 Přípravek k měření magnetické indukce v závislosti na poloze feromagnetické části . . . . . | 16 |   |    |
| 3.2 Přípravek k měření magnetické indukce - pohled z boku . . . . .                             | 17 |   |    |

## Tabulky

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Aktuální ceny magnetu D4x20mm<br>AlNiCo 58/5 .....     | 13 |
| 2.2 Aktuální ceny magnetu D4x20mm<br>RE2Co17 200/150 ..... | 13 |





# Kapitola 1

## Simulace

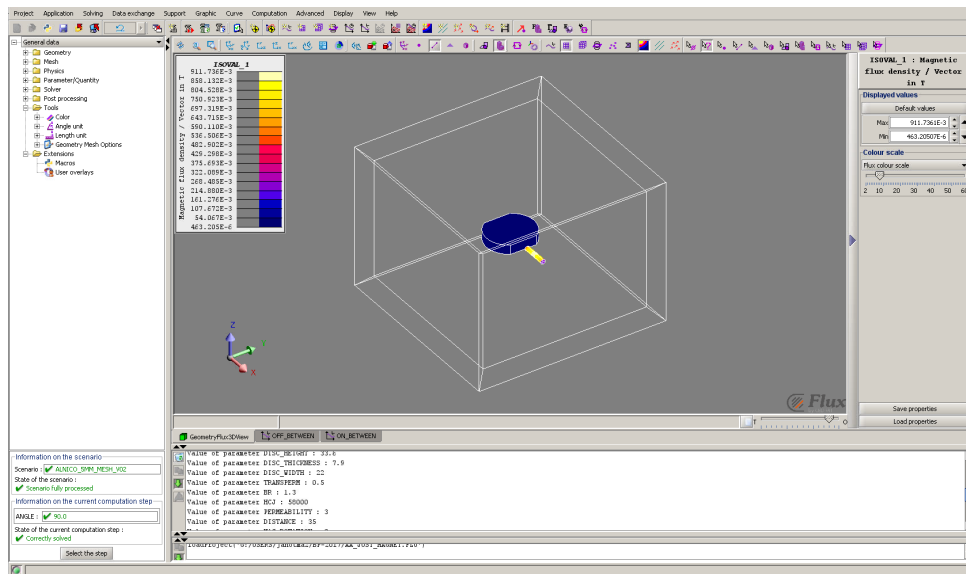
### 1.1 Seznámení s Flux 3D

Pro účely simulace trojrozměrného magnetického pole budu ve své práci využívat simulační software s názvem Flux 3D od společnosti Cedrat (v roce 2016 došlo k akvizici této francouzské společnosti, takže dnes software dále vyvíjí americká společnost s názvem Altair [1]).

Software Flux 3D je vhodný především pro návrh, analýzu a optimalizaci v následujících oborech [1]:

1. Rotating machines
2. Linear actuators
3. Electromagnetic compatibility
4. Transformers
5. Induction heating devices
6. Sensors
7. HV devices
8. Cables
9. Nondestructive Evaluation

## 1. Simulace



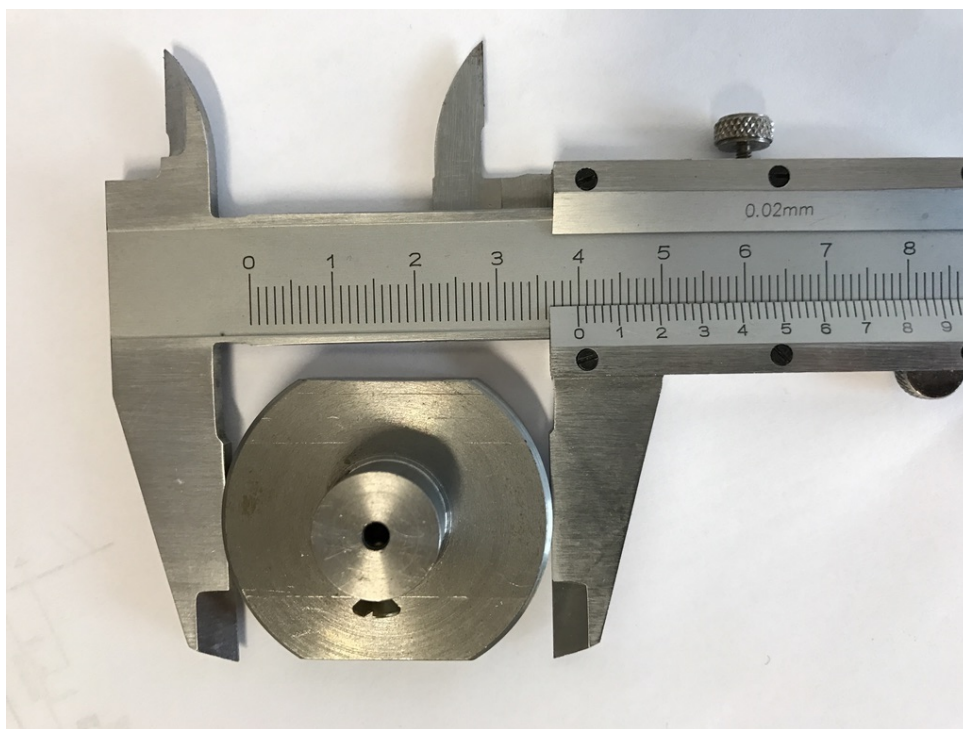
Obrázek 1.1: Snímek obrazovky Flux 3D

Program Flux 3D byl vybrán po dohodě s vedoucím bakalářské práce, jelikož jako jeden z mála na trhu umožňuje simulace v trojrozměrném prostoru, což je důležitý předpoklad pro co nejpřesnější výsledky simulací. Simulace ve 2D prostoru jsem zavrhl, jelikož by to znamenalo příliš velké zjednodušení celého problému vzhledem k tomu, že jednotlivé součásti mají navzájem kolmé osy souměrnosti.

Simulační proces v programu Flux 3D probíhá v těchto pěti základních fázích:

1. Vytvoření geometrie (Geometry)
2. Tvorba sítě bodů (Mesh)
3. Definice fyzikálních vlastností (Physics)
4. Řešení (Solving)
5. Zpracování výsledků (Post processing)

Tyto kroky na sebe postupně navazují a je tedy nutné začít od začátku a postupovat ke konci. V následujících odstavcích blíže popíšu postup jednotlivých kroků a případná úskalí jednotlivých částí.



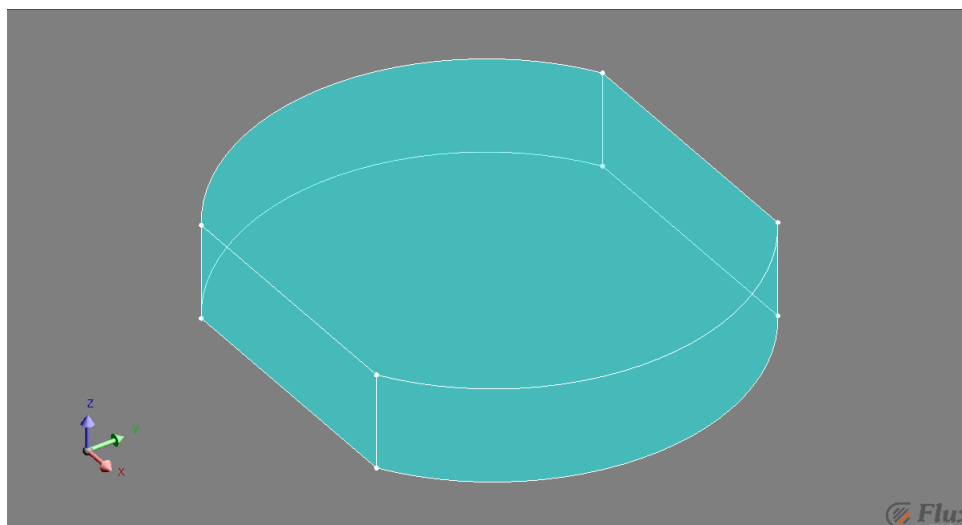
Obrázek 1.2: Rotující feromagnetická součást

## 1.2 Vytvoření geometrie (Geometry)

Na začátku je potřeba vytvořit trojrozměrný model jednotlivých součástek. Toto je možné realizovat např. pomocí importu z CAD systémů (např. ve formátu DXF). Nicméně import z cizích programů by nám následně neumožňoval jednoduchou parametrizaci celého modelu, která je pro nás velice výhodná. V případě řádně parametrizovaného modelu nám program umožňuje v simulaci měnit hodnoty jednotlivých parametrů bez nutnosti složitého překreslování všech bodů. Při návrhu modelu jednotlivých součástí jsem tak kladl velký důraz na to, aby všechny zadávané hodnoty byly ve formě parametrů, které půjdou měnit.

Při návrhu máme v podstatě dvě možnosti, jakými lze postupovat. Bud všechny části vytvoříme v jednom projektu a poté řešíme simulaci, nebo jednotlivé součásti můžeme vytvořit do oddělených projektů a následně naimportovat do nového projektu. Já jsem se rozhodl kvůli jednodušší správě jednotlivé součásti vytvářet v oddělených projektech a následně naimportovat do jednoho projektu. Tento postup výrazně zjednodušil práci při úpravách některých součástí modelu.

Na obrázku 1.2 je vidět původní tvar rotující součástky. Pro účely simu-



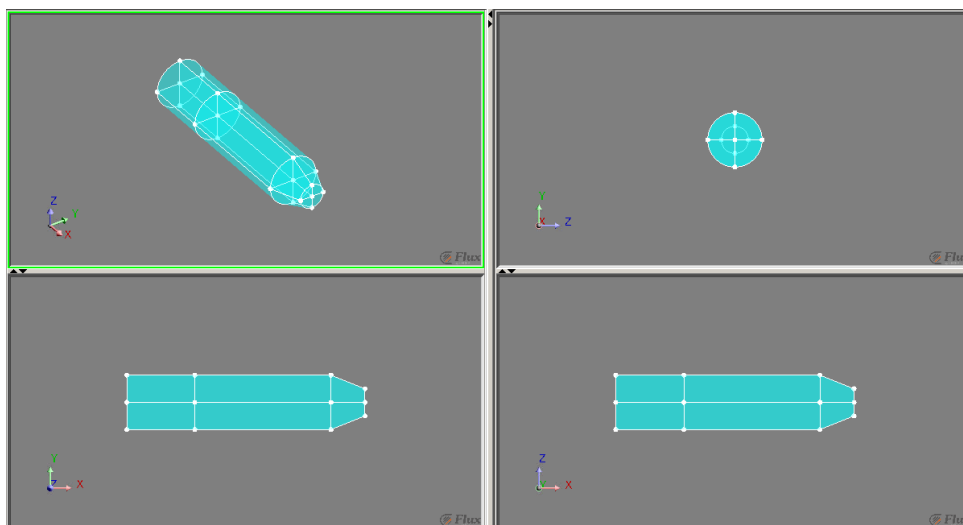
**Obrázek 1.3:** 3D zjednodušený model feromagnetické součásti

lance provedu zjednodušení a zanedbám horní výstupek a budu dále uvažovat pouze plochý disk se zkosenými boky. Následný model je vidět na obrázku 1.3.

Velikost ani tvar této součásti v dalších simulacích upravovat nebudu. Jediné co budu měnit je úhel natočení okolo osy Z. Těmito diskrétními stavy nahradím spojitý pohyb rotujícího disku. Budu zkoumat zejména mezní body, ve kterých je magnet co nejdále a co nejbliže od feromagnetické součásti. Zjednodušení spojitého pohybu na diskrétní polohy feromagnetického disku ovšem s největší pravděpodobností způsobí chybu, jelikož tím pádem zcela ignorujeme vířivé proudy, které budou vznikat na povrchu disku. Pohyb feromagnetického disku totiž představuje pohyb vodiče v magnetickém poli. Z časových důvodů tento jev do simulace nebudu zahrnovat, nicméně v případě pokračování simulace tohoto problému bych doporučil se dále tímto problémem zabývat a zahrnout do modelu.

Jako další bylo potřeba vytvořit 3D model pro permanentní magnet. Pro začátek jsem se rozhodl, že budu analyzovat tyto tři případy:

1. Pouze samotný válcový magnet.
2. Válcový magnet s pólovým nástavcem umístěným za magnetem.
3. Válcový magnet s tvarovaným pólovým nástavcem ve tvaru komolého kuželu (viz obrázek 1.4).

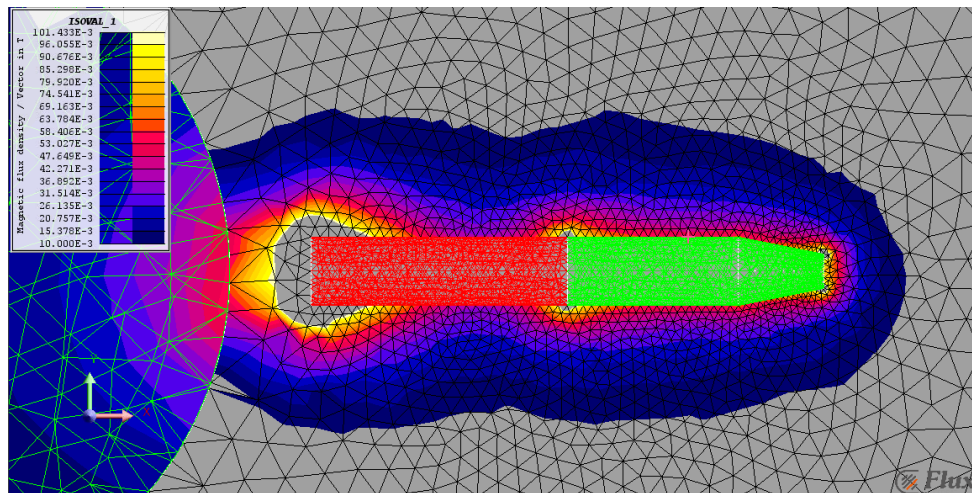


Obrázek 1.4: Model magnetu s pólovým nástavcem ve tvaru komolého kuželu

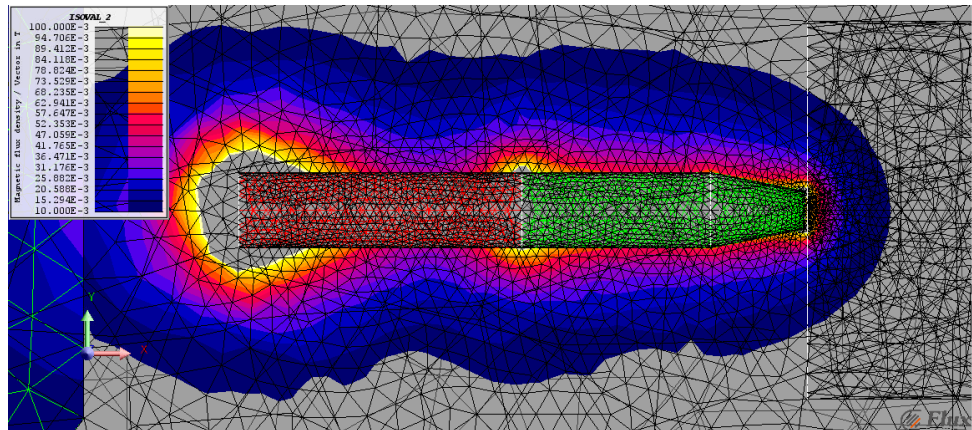
### 1.3 Tvorba sítě bodů (Mesh)

V této fázi je potřeba jednotlivé části naimportovat do jednoho společného projektu a poté je možné začít řešit “meshování” prostoru. Abychom vůbec byli schopni problém řešit v konečném čase, je potřeba nejdříve nadefinovat tzv. “infinite box”. Infinite box je trojrozměrné těleso (v našem případě kvádr), do kterého celý problém vložíme a definujeme tak hranice prostoru celé simulace. Zároveň také definujeme okrajové podmínky problému, tj. “nulové pole v nekonečnu”. Dle autorů programu by rozměry infinite boxu měly být alespoň 3x větší, než je velikost simulovaných objektů [11]. Jelikož na správnou velikost infinite boxu není přesné pravidlo, tak opět jeho velikost parametrizují, tak abych mohl v dalších krocích simulace snadno měnit hodnoty pomocí simulačního scénáře. Jako výchozí hodnoty vnější velikosti infinite boxu tedy volím 160 x 160 x 120 mm.

Meshování je proces, kdy celý prostor postupně rozdělíme na malé čtyřstěny případně šestistěny. Tento proces můžeme také v programu ovlivnit pomocí nastavení tzv. “mesh points” a “mesh lines”. Tímto nástrojem programu vnučíme hustotu sítě bodů. Jednotlivé parametry meshovacího procesu parametrizují, abych mohl následně kontrolovat a optimalizovat jednotlivé hodnoty pomocí simulačního scénáře. Obecně se však snažíme zajistit jemný mesh v okolí objektů, kde je velká změna magnetického pole a nebo tam, kde nás zajímá hodnota magnetické indukce. Jemného meshování v zájmových oblastech docílím tím, že si vyberu body na koncích magnetu a body na ocelovém disku nejbližší magnetu a těmto oblastem nastavím co nejmenší hodnotu velikosti mesh prvku. V mém případě jsem nastavil nejmenší hodnotu “mesh point” na 0,8 mm. Ve zbytku prostoru si můžeme kvůli úspoře výkonu



**Obrázek 1.5:** Řez celým modelem v rovině XY s vyobrazenou mesh a hodnotami magnetické indukce



**Obrázek 1.6:** Řez celým modelem v rovině XY po přidání pomocného tělesa ze vzduchu

dovolit hrubý mesh. Tento postup nám příliš nezkreslí výsledky, ale zkrátí se tím doba simulace [11].

K největší změně magnetické indukce v tomto případě bude docházet v prostoru mezi magnetem a feromagnetickým diskem. Zde však měření není možné provádět pomocí Hallova senzoru, jelikož zde předpokládám teplotu až 260 °C. Proto jsem si svoji zájmovou oblast přesunul na druhý konec magnetu (vzdálenějšího od rotujícího feromagnetického disku). Na vzdálenějším konci magnetu totiž očekávám pracovní teplotu pod 150 °C, takže zde bude možné umístit Hallův sensor ke snímání magnetického pole.

Výsledná kvalita mesh u prvních simulací je vidět na obrázku 1.5. Jak je vidět, tak mesh uvnitř magnetu a uvnitř kónického polového nástavce je velice jemná. Nicméně mesh vzduchu v blízkém okolí je velice hrubá, což

má za následek nepřesné výsledky simulací. V těsném okolí pólových ploch totiž očekávám velké změny magnetického pole, a proto jsem se rozhodl za pólový nástavec umístit další virtuální vzduchové těleso (meshovaný objem) s předepsaným jemným krokem meshu. Tímto postupem budu schopen program donutit v blízkém okolí pólového nástavce vytvořit jemnější mesh a tím tak zpřesnit výsledky simulace. Výrazná změna v jemnosti meshování v okolí blízkém pólovému nástavci je vidět na obrázku 1.6.

Proces meshování probíhá v následujících krocích:

1. Definice parametrů pro mesh
2. Meshování křivek.
3. Meshování ploch.
4. Meshování objemů.

## 1.4 Definice fyzikálních vlastností (Physics)

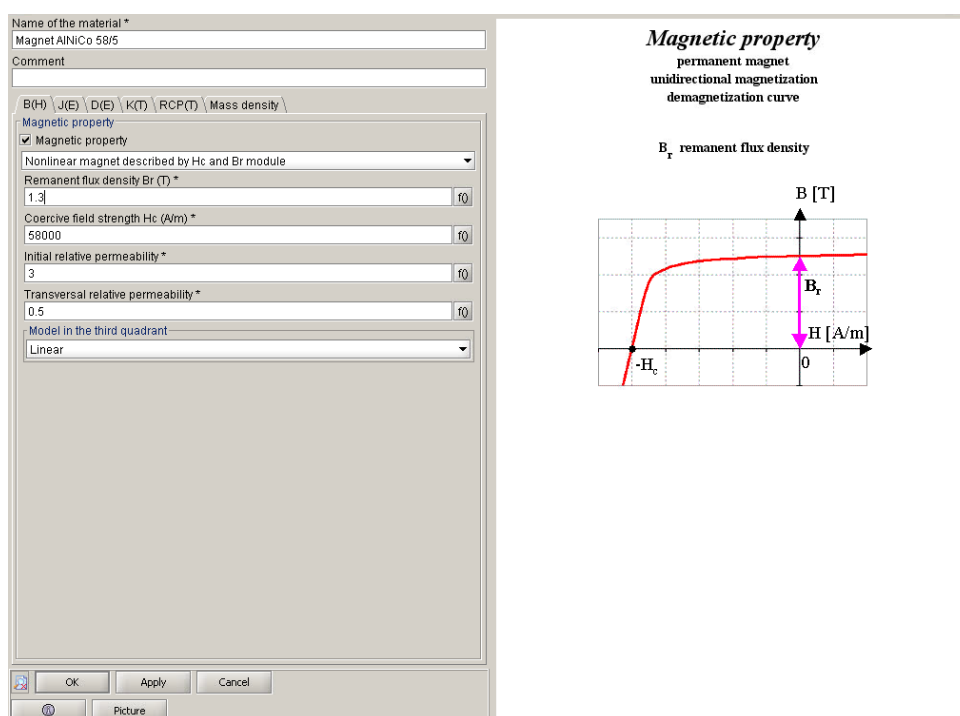
Po úspěšném procesu meshování můžeme přejít na další krok simulace, kterým je definice fyzikálních vlastností jednotlivých objektů.

Nejdříve si nadefinujeme vlastnosti jednotlivých materiálů, které se v naší aplikaci nacházejí a následně tyto vlastnosti přiřadíme jednotlivým objektům v našem modelu.

Při simulaci budu uvažovat tyto tři typy materiálu:

1. Materiál okolí: vzduch
2. Materiál magnetu: magneticky tvrdý materiál s vysokou koercivitou zadaný pomocí demagnetizační křivky (viz obrázek 1.7)
3. Materiál rotujícího disku: magneticky měkká ocel třídy 11 375 (dle [8]) zadaná pomocí permeability a hodnoty saturace magnetického pole

Magneticky tvrdé materiály je možné v programu Flux 3D zadávat také s lineární charakteristikou, od tohoto jsem však upustil, jelikož by to bylo



**Obrázek 1.7:** Dialog pro zadávání parametrů magneticky tvrdých materiálů

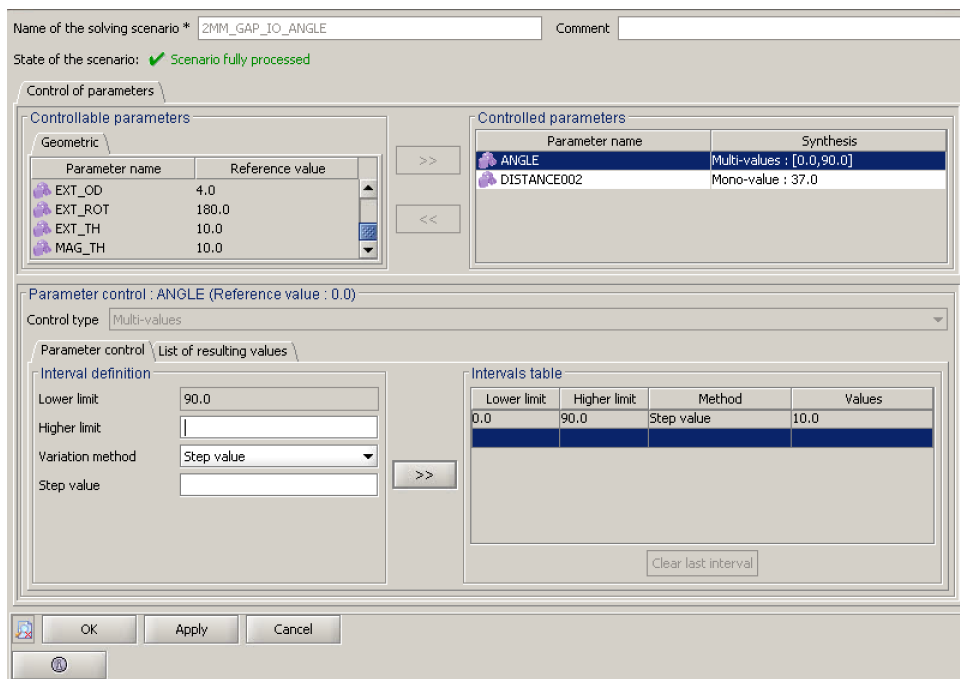
přílišné zjednodušení problému.

Jakmile máme nadefinovány všechny potřebné materiály, je potřeba je přiřadit jednotlivým regionům. Region je v programu definován jako množina objemů. U magneticky tvrdých materiálů, které mají preferovaný směr magnetizace je ještě potřeba určit směr magnetické osy, což lze provést jednoduše podle souřadnicové soustavy, ve které je magnet modelován. V naší aplikaci předpokládáme válcový magnet s axiální magnetizací, to znamená že magnetické póly se budou nacházet na rovných kruhových plochách a magnetická osa bude identická s osou válce. U magnetu tedy provedu orientaci podle jeho geometrické osy a u ostatních (izotropních) feromagnetických součástí orientaci již není potřeba řešit.

## 1.5 Řešení (Solving)

V této části dochází z samotné simulaci a numericky jsou vypočítány hodnoty magnetického pole pro všechny prvky v prostoru. Tento proces bývá časově náročný v závislosti na hustotě sítě bodů (meshe) a fyzikální složitosti (zejména je-li nelineární). V našem případě simulace trvá několik minut pro jednu polohu. Pro 10 různých poloh pak celková doba lehce přesáhne 1 hodinu.





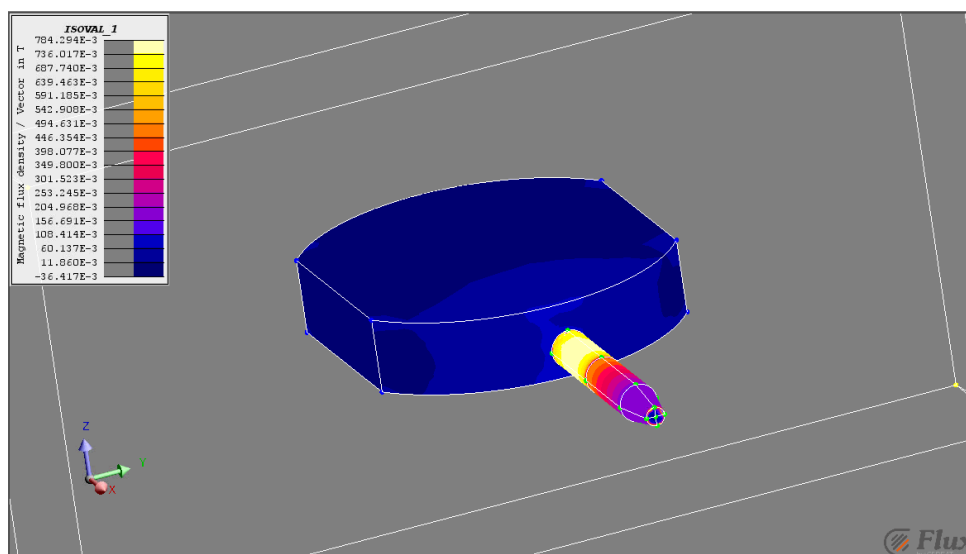
**Obrázek 1.8:** Dialog pro vytváření simulačních scénářů

Hodnoty jednotlivých parametrů můžeme nyní kontrolovat pomocí simulačního scénáře. V simulačním scénáři si můžeme vybrat jednotlivé parametry a definovat interval hodnot, kterých mají parametry nabývat. Na začátku je nejlepší spustit simulaci s předdefinovanými hodnoty parametrů, abychom vůbec zjistili, jestli je simulace funkční a neobsahuje žádné chyby. Pokud je vše bez problémů, tak je možné přistoupit k definování intervalů pro jednotlivé parametry.

## 1.6 Zpracování výsledků (Post processing)

Poslední fází simulace je zpracování výsledků (post processing). V této fázi si vybereme oblasti zájmu a pro ně poté zobrazíme požadované hodnoty sledovaných veličin. V našem případě je to normálová složka vektoru magnetické indukce  $B$ . Magnetická indukce je sice fyzikální vektorová veličina, nicméně my pro snímání magnetického pole chceme používat Hallův senzor, který má osu citlivosti a tu budeme orientovat souhlasně s magnetickou osou válcového magnetu. Ostatní složky vektoru magnetické indukce nás tedy zajímat nebudou.

Program Flux 3D umožňuje rovněž definovat plochy, podle kterých je ná-



**Obrázek 1.9:** Obarvený model podle hodnot magnetické indukce v daném bodě

sledně možné vykreslit požadované veličiny např. hodnoty magnetické indukce. Vykreslením hodnot podél plochy nám tak vytvoří 3D graf, který pomůže lépe pochopit tvar a velikost magnetického pole.

## Kapitola 2

### Výběr vhodného materiálu

#### 2.1 Analýza dostupných magnetických materiálů a jejich srovnání

Pokud nebudeme brát v úvahu plastomagnety, které se používají především na výrobu tvarově složitých součástí, tak v současné době na trhu existují čtyři hlavní druhy magneticky tvrdých materiálů. Jedná se o ferit, AlNiCo, SmCo (samárium-kobaltové nebo RECo dle [9]), NdFeB (neodymové nebo REFeB dle [9]).

Každý z těchto typů magnetů má své přednosti, výhody a nevýhody. Abychom mohli vybrat ten nejvhodnější typ magnetu, tak je potřeba na začátku definovat požadavky, které by magnet měl mít. Těmito požadavky jsou:

1. Teplotní odolnost
2. Velikost a tvar
3. Cena
4. Korozní odolnost
5. Mechanická odolnost

### 2.1.1 Teplotní odolnost

Všechny typy magnetů je možné demagnetizovat při překročení jejich maximální pracovní teploty. Demagnetizaci lze dále rozdělit na trvalou (permanentní), v tomto případě dochází k trvalé ztrátě magnetismu i v případě následného ochlazení. Dalším typem demagnetizace je dočasná (reverzibilní), kdy dochází k oslabení magnetických účinků permanentních magnetů s rostoucí teplotou a tím i snížení magnetické indukce a silových účinků. Po ochladnutí magnetu se však vlastnosti magnetu vrátí na původní hodnoty. Technické normy ČSN EN 60404-8-1 [9] teplotní odolnost jednotlivých typů magnetů řeší pouze částečně stanovením maximální pracovní teploty pro každý typ magnetu. Taková informace je však velice nedostatečná, jelikož každý typ magnetu se vyrábí až v několika desítkách tříd, přičemž třídy se navzájem liší svou koercivitou a tudíž i pracovní teplotou. Navíc skutečná demagnetizační teplota závisí na pracovním bodě, ve kterém se magnet nachází. Tento pracovní bod je dán geometrií magnetu (čím delší magnetická osa, tím vyšší pracovní teplota) a dále tím, jestli magnet pracuje v obvodu s dalšími feromagnetickými částmi (demagnetizační teplota se tím zvýší) nebo bez dalších feromagnetických částí. Na základě předchozích zkušeností doporučuji považovat maximální teploty uvedené v normě ČSN EN 60404-8-1 pouze za horní odhad. Skutečnou demagnetizační teplotu lze nalézt až po vyrobení fyzického vzorku, který bych nechal testovat v teplotní komoře bez dalších feromagnetických částí, čímž dostanu přesnou demagnetizační teplotu.

Neodymové magnety jsou běžně určeny do nízkých teplot (do 80 °C) [9]. Je sice možné zvýšit jejich teplotní odolnost až do 200 °C za pomoci zvýšené dotace Dy (dysprosia), ale to má za následek nárůst ceny o stovky procent oproti výrobkům o standardní teplotní odolnosti. AlNiCo magnety v současné době dosahují nejvyšších pracovních teplot (do 550 °C - zdroj ČSN EN 60404-8-1 [9]) a jsou tak vhodné pro použití tam, kde se očekává vysoká pracovní teplota. Zároveň mají velmi nízký teplotní koeficient remanence ( $\alpha(Br) = -0,02\%/^{\circ}C$ ) a koercivity ( $\alpha(H_{cj}) = -0,03 - 0,07\%/^{\circ}C$ ), což znamená, že magnetické pole generované tímto typem magnetu nebude příliš závislé na teplotě. Feritové magnety mají standardní pracovní teplotu do 250 °C. SmCo magnety mají pracovní teplotu do 350 °C, ale oproti AlNiCo se vyznačují vyššími teplotními koeficienty pro remanenci ( $\alpha(Br) = -0,03\%/^{\circ}C$ ) a koercivitu ( $\alpha(H_{cj}) = -0,025\%/^{\circ}C$ ), takže okolní magnetické pole bude více závislé na teplotě. Vzhledem k tomu, že v mém případě je požadavek na pracovní teplotu do 260 °C, tak přichází k úvahu pouze magnety typu AlNiCo a SmCo. Ostatními typy materiálů se tedy dále zabývat nebudu.

### 2.1.2 Velikost a tvar

Cílem je navrhnout permanentní magnet s co nejmenšími rozměry, což nám umožní vyrobit senzor s malými rozměry a hmotností. Abychom dosáhli co nejmenších rozměrů permanentního magnetu, je potřeba materiál při výrobě dotovat vyšším obsahem drahých kovů (Sm, Co, Ni), což má ovšem za následek zvýšení ceny. Před případnou výrobou senzoru bych tedy doporučil srovnat ceny materiálu s nejvyššími hodnotami  $B_r$  a  $H_{c_j}$  s materiálem, který má hodnoty  $B_r$  a  $H_{c_j}$  přibližně v polovině celého rozsahu.

### 2.1.3 Cena

Dle současného stavu simulace mi jako nejvhodnější řešení přichází v úvahu použití AlNiCo magnetu o průměru 4 mm a výšce 20 mm s axiální magnetizací. Jako třídu materiálu jsem zvolil AlNiCo 58/5 ( $BH_{max} = 58 \text{ kJ/m}^3$ ,  $H_{c_j} = 53 \text{ kA/m}$ ,  $B_r = 1,3 \text{ T}$ ). Na základě těchto parametrů jsem nechal zpracovat cenovou nabídku ve firmě UNIMAGNET s.r.o. na dodávky materiálu v různém množství. Ceny uvádím v tabulce 2.1.

| Množství (ks)     | 100      | 1.000   | 10.000  |
|-------------------|----------|---------|---------|
| Cena bez DPH / ks | 10,20 Kč | 2,52 Kč | 1,68 Kč |

**Tabulka 2.1:** Aktuální ceny magnetu D4x20mm AlNiCo 58/5

Dodací podmínka dle incoterms DAP - celá ČR. DAP je přepravní podmínka běžně užívaná v mezinárodním obchodě. Jedná se o zkratku anglického "Delivered at Place". Zjednodušeně to znamená, že dodavatel je zodpovědný za doručení až na určené místo. Veškerá rizika a náklady spojené s přepravou tak jdou na vrub dodavatele. Ceny magnetů jsou stanoveny ke dni 12. 5. 2017 a jsou vázány na tržní ceny niklu a kobaltu, které tvoří více než 80 % materiálových nákladů na výrobu magnetů. Tržní ceny všech výchozích surovin pro výrobu AlNiCo a SmCo magnetů stanovuje společnost Argus Media Limited [2]. Podařilo se mi od nich získat ceny všech kovů, potřebných pro výrobu magnetů, ke dni 11. 4. 2017, nicméně jsem nedostal povolení k další reprodukci, a proto zde přesné ceny jednotlivých materiálů neuvádím.

Pro srovnání uvádím v tabulce 2.2 ceny ekvivalentních SmCo magnetů. Dodací

| Množství (ks)     | 100      | 1.000    | 10.000   |
|-------------------|----------|----------|----------|
| Cena bez DPH / ks | 22,23 Kč | 15,56 Kč | 11,24 Kč |

**Tabulka 2.2:** Aktuální ceny magnetu D4x20mm RE2Co17 200/150

podmínky jsou totožné jako u AlNiCo magnetů.

#### ■ 2.1.4 Korozní odolnost

Magnety SmCo a AlNiCo mají relativně dobrou korozní odolnost, takže není nutné zajišťovat povlakování, jako je tomu např. u neodymových magnetů. Navíc předpokládám, že magnet bude uložen v pouzdře spolu s Hallovým senzorem a zbývající elektronikou, takže se k magnetu nedostane okolní vzduch ani vzdušná vlhkost, která by mohla po delším čase způsobit korozi materiálu a tím i snížení magnetických vlastností.

#### ■ 2.1.5 Mechanická odolnost

Magnety SmCo se vyrábějí sintrováním, což je proces při kterém se zapéká SmCo prášek a výsledkem je polotovar, ze kterého se následně magnety obrábí do požadovaného tvaru. Z tohoto důvodu jsou magnety typu SmCo dost křehké. Magnety AlNiCo oproti tomu se vyrábějí často odléváním a mají lepší odolnost vůči mechanickému poškození. Jelikož bude magnet uložen v pouzdře, tak mechanická odolnost nebude hrát takovou roli. Pokud by se nakonec vybral jako vhodný materiál SmCo, tak bych doporučoval zvážit speciální požadavky na balení a manipulaci, jelikož v případně neopatrné manipulace by mohlo dojít snadno k poškození magnetu a tím i ke zvýšené zmetkovosti a celkovému růstu nákladů na vyrobený kus.

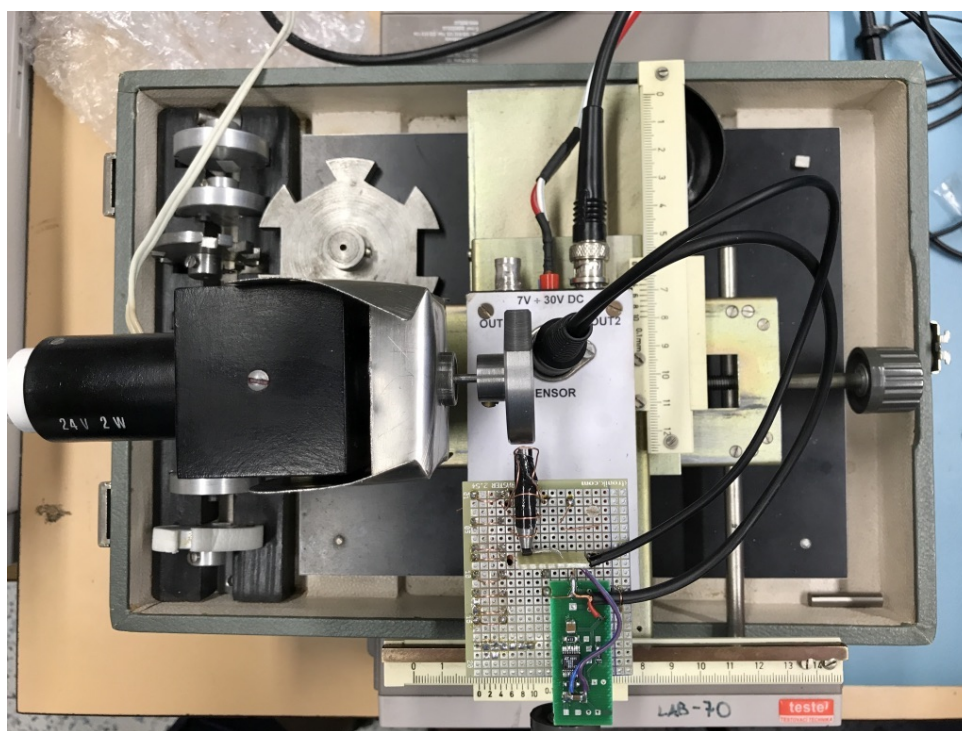
## Kapitola 3

### Konstrukce fyzického vzorku a měření na něm

#### 3.1 Měření na fyzickém vzorku

K měření na fyzickém vzorku jsem použil testovací soupravu (viz obrázky 3.1 a 3.2), která umožňuje snadné upnutí rotujícího disku a zároveň relativně přesné polohování magnetu s Hall senzorem. Původně jsem měl v plánu měřit přímo magnetickou indukci pomocí teslametru, který je dostupný na katedře měření (LakeShore Model 450 Gaussmeter), ale nakonec jsem od tohoto nápadu upustil, jelikož tento teslametr má měřicí sondu dlouhou přibližně 20 cm a není zde jasně vyznačený bod citlivosti. Moje oblast zájmu je přibližně kruh o poloměru 2 mm, takže by mi takové měření poskytlo dost zkreslené údaje. Po dohodě s vedoucím bakalářské práce jsem tedy přistoupil k měření pomocí Hallova senzoru. Z dostupných senzorů byl vybrán A1319 od společnosti Allegro MicroSystems, LLC. s výstupní citlivostí 5 mV/G, což odpovídá 50 mV/mT [7].

Při měření jsem ovšem narazil na problém se saturací Hallova senzoru A1319. Magnetická indukce na konci pólového nástavce se totiž pohybovala okolo 60 mT, nicméně Hallův senzor A1319 se nacházel v saturaci již při hodnotě 30 mT. Při zachování původní konfigurace by tedy nebylo možné naměřit žádná data. Proto jsem se rozhodl pro účely měření nakonec použít menší AlNiCo magnet o velikosti D4x10mm, čímž došlo k poklesu magnetické indukce pod 30 mT a bylo tak možné provést měření. Naměřená data vidět na grafu č. 3.4. Na grafu č. 3.5 jsou dále vidět vyhlazená data pomocí Matlabu. Pro další měření bych doporučil obstarat Hallův senzor s větším rozsahem



**Obrázek 3.1:** Přípravek k měření magnetické indukce v závislosti na poloze feromagnetické části

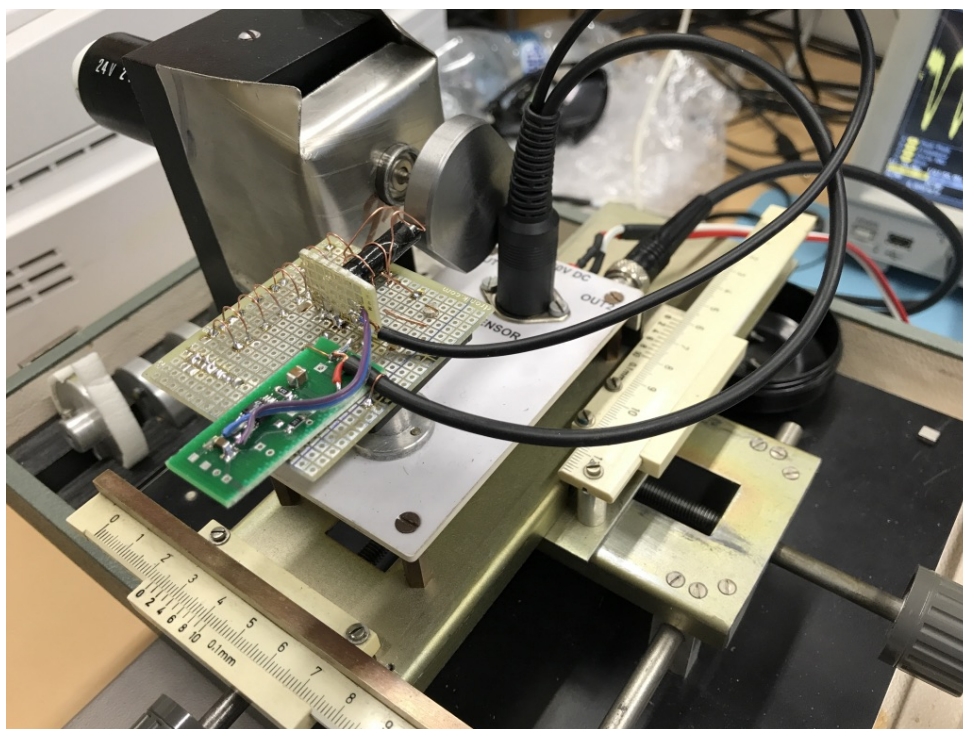
měřených dat. V ideálním případě by měl mít senzor rozsah  $\pm 100$  mT, aby nedocházelo k saturaci a následně ztrátě informace.

Pro testování a ověření nasimulovaných dat jsem použil permanentní magnet o rozměru  $D4 \times 10$  mm z materiálu AlNiCo 58/5. Na výrobu pólového nástavce jsem použil ocel třídy S235JR dle normy ČSN EN 10025-2:2004 [9]. Výrobní tolerance magnetu i pólového nástavce jsou  $\pm 0,1$  mm pro všechny průměry a výšky.

## 3.2 Porovnání naměřených hodnot se simulací

Na grafu ze simulací č. 3.3 je vidět, že změna magnetické indukce ve výšce 0,5 mm nad povrchem pólového nástavce dosahuje přibližně hodnoty 3 mT. Vzdálenost 0,5 mm od pólového nástavce jsem vybíral s ohledem na parametry Hallova senzoru A1319, který má citlivý bod 0,5 mm pod povrchem pouzdra [7]. V prvních simulacích tato změna dosahovala hodnot přibližně 20 mT, nicméně to bylo způsobeno příliš hrubým meshováním v blízkém okolí pólového nástavce a příliš vysokou hodnotou relativní permeability feromagnetických součástí ( $\mu_r = 3500$ ). Po snížení relativní permeability na hodnotu





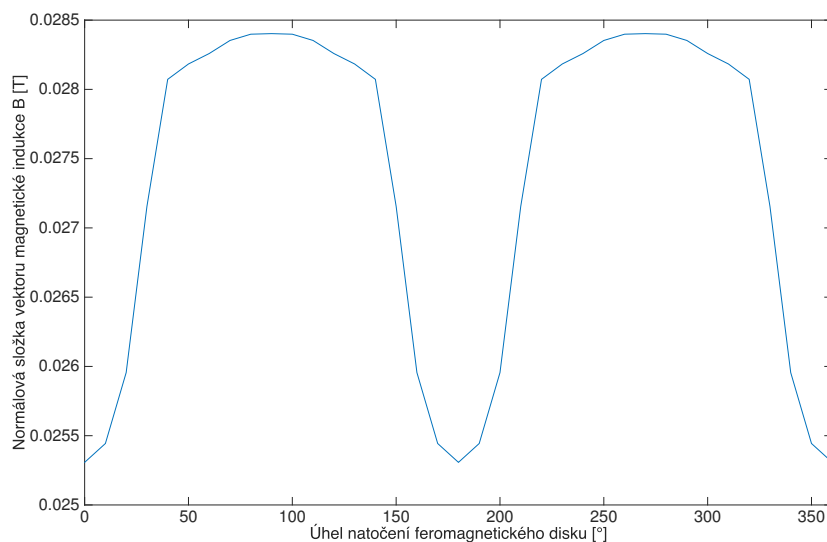
**Obrázek 3.2:** Přípravek k měření magnetické indukce - pohled z boku

$\mu_r = 300$  dle [4] se rozdíl snížil na 6 mT. V důsledku zjemnění sítě bodů v blízkém okolí pólového nástavce se hodnota rozdílu snížila až na aktuálních 3 mT.

Na grafu č. 3.4 je vidět skutečná změna výstupního napětí Hallova senzoru A1319 umístěného těsně nad povrch pólového nástavce. Skutečná rychlost otáčení feromagnetického disku byla asi 5 Hz. Po vyhlazení grafu pomocí Matlabu (viz obrázek č. 3.5) je patrné, že amplituda v druhé části otáčky je nižší. Tento jev si vysvětluji tím, že součástka nebyla přesně symetrická a domnívám se, že z jedné strany bylo ubráno více materiálu.

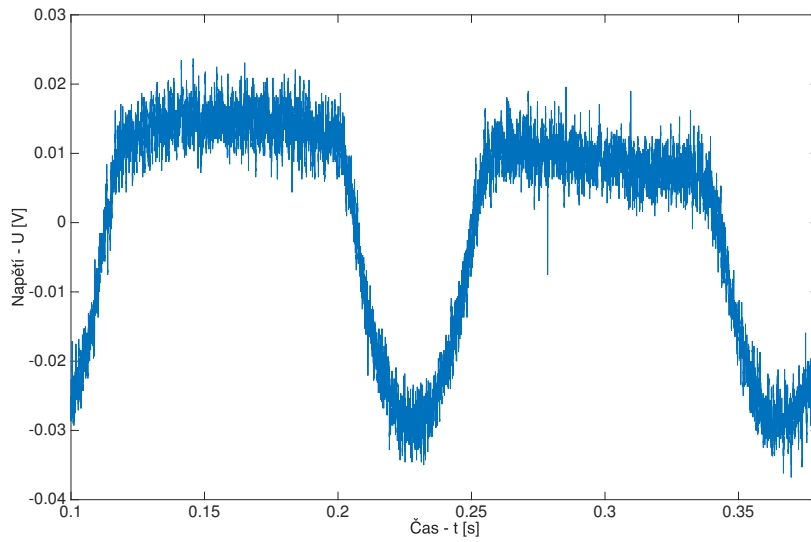
Velikost amplitudy je zde přibližně 40 mV, což po přepočtu odpovídá změně magnetické indukce 0,8 mT. Tvarem se sice naměřený signál velice podobá simulovaným datům, nicméně měřítko úplně nesouhlasí, jelikož jsem předpokládal magnetickou indukci o velikosti 3 mT. Tento rozdíl oproti simulaci je způsobený tím, že při měření jsem byl nucen kvůli saturaci nakonec zvolit menší magnet D4x10mm. Dále se domnívám se měření mohlo ovlivnit, že senzor nebyl umístěn přímo na pólovém nástavci a mezera mezi feromagnetickým diskem a magnetem nebyla přesně stanovena dle simulace (3 mm).

Zde je na místě podotknout, že měření bylo prováděno za běžné pokojové teploty. Jak jsem již uvedl v předchozí kapitole, tak je hodnota magnetické remanence teplotně závislá hodnota. U materiálu AlNiCo je toto snížení

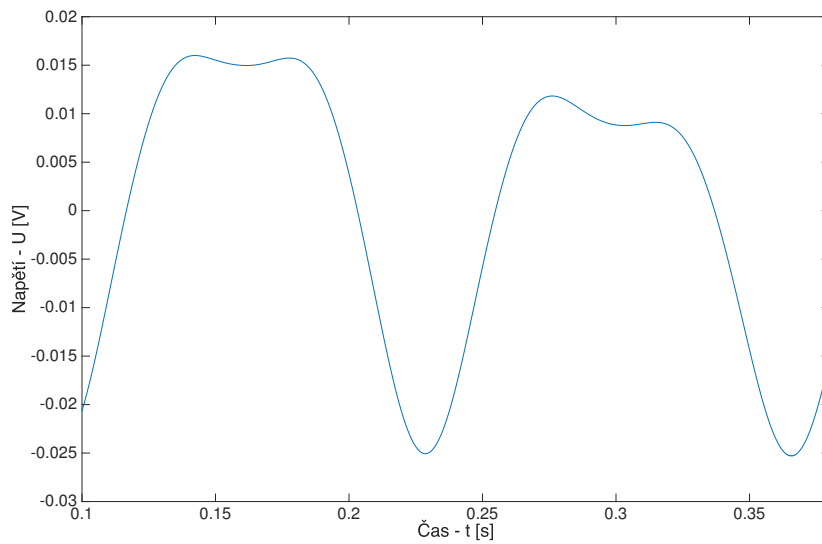


**Obrázek 3.3:** Graf závislosti magnetické indukce na poloze feromagnetické součásti (simulace)

přibližně  $\alpha(Br) = -0,03\%/^{\circ}C$  [9]. Toto snížení upravují normy ČSN pouze pro interval teplot od  $20^{\circ}C$  do  $100^{\circ}C$ . Pro další zpřesnění simulace bych tedy doporučil získat demagnetizační křivky magnetických materiálů i za zvýšené teploty. Tyto demagnetizační křivky je možné získat pomocí hysteresigrafu s vyhřívanými pólovými nástavci. Před samotným měřením však doporučuji s laboratoří probrat požadavky na tvar a velikost měřeného vzorku, aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků. Rovněž bych navrhol pro účely dalšího měření upravit měřicí soupravu tak, aby umožňovala regulovat teplotu celé soustavy. Vzhledem k tomu, že předpokládáme pracovní teplotu v intervalu  $-40^{\circ}C$  do  $+260^{\circ}C$ , tak bych navrhol jako okolní médium minerální olej.



**Obrázek 3.4:** Původní naměřená data na osciloskopu



**Obrázek 3.5:** Naměřená data zpracovaná v Matlabu pomocí funkce "smooth"



## Kapitola 4

### Cenová analýza jednotlivých možností

V této sekci se budu zabývat cenou jednotlivých magnetů a jejich stabilitou v minulosti. Pokusím se nastínit rizikové faktory, které cenu mohou skokově zvýšit.

#### 4.1 Aktuální cena

Na výši aktuálních cen permanentních magnetů v ČR mají vliv především tyto parametry (seřazeno od nejdůležitějšího k nejméně důležitým): cena vstupního materiálu, náklady na zaměstnance a stroje, výše celních poplatků, cena přepravy.

Jedná se samozřejmě o zjednodušený pohled, který zanedbává spoustu dalších faktorů, nicméně pro hrubou představu to bude stačit. Položka celních poplatků je závislá na politickém rozhodnutí, nicméně v nejbližší době neočekávám její změnu ze strany EU, jelikož v EU prakticky nikdo magnety nevyrábí, takže zde není tlak na zvyšování celních sazeb. Cena přepravy je silně závislá na cenách ropy, ale jelikož její celkový podíl na konečné ceně je menší než 1 %, tak rovněž nemá smysl hlouběji analyzovat. Náklady na zaměstnance a stroje víceméně kopírují míru inflace v daném státě, u této složky tedy předpokládám meziroční nárůst okolo 2 % [5].



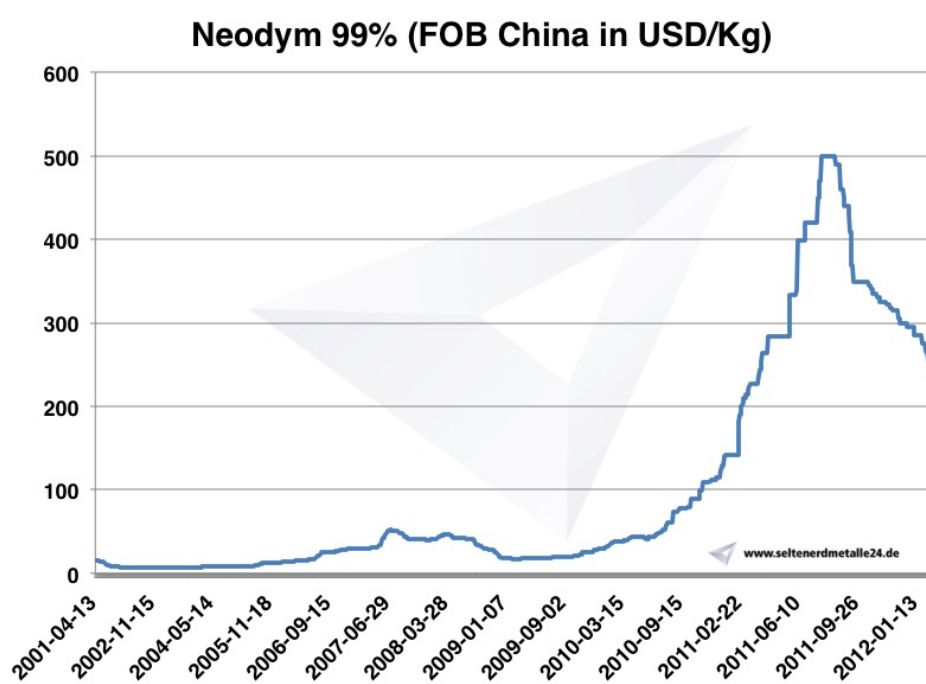
**Obrázek 4.1:** Vývoj ceny kobaltu (Co) v letech 2005 - 2017, převzato z [3]

## 4.2 Cenová stabilita v minulosti a možná rizika

Jako největší riziko, negativně ovlivňující cenu permanentních magnetů, sledávám to, že těžba strategicky důležitých surovin je koncentrována do politicky nestabilních zemí, či zemí inklinujícím k totalitním režimům. Tento stav je patrný např. u samaria [6], kde mezi dva největší producenty na světě patří Čínská lidová republika a Ruská federace. Tyto země jsou si svého dominantního postavení na světovém trhu vědomé a jak se ukázalo v roce 2010, tak neváhají přistoupit k zavedení vysokých exportních cel, což má za následek skokové zdražení i o více než 1000 % (viz obrázek 4.2 a obrázek 4.1).

Tržní reakce konkurenčních těžařů na nárůst cen (otevírání nových nalezišť) může přinést pokles cen až určitým zpožděním.

V posledních letech naštěstí k uvalování vysokých exportních cel nedochází, nicméně v budoucnu toto nelze vyloučit a osobně to považuji za jedno z největších rizik ovlivňujících cenu. Toto riziko by se určitě dalo snížit, pokud by vyspělé státy, ve kterých se nachází velká naleziště (USA, Kanada [6]), zahájily těžbu a omezily tak dominantní postavení politicky nestabilních či totalitních zemí na trhu.



Obrázek 4.2: Vývoj ceny neodymu (Nd) v letech 2001 - 2012, převzato z [3]





## Kapitola 5

### Závěr

Počáteční představa magnetu, který by zajistil rozdíl magnetické indukce 10 mT a více, se bohužel ukázala jako nerealizovatelná. Hlavním důvodem proč této hodnoty nemohlo být dosaženo je extrémní požadavek na pracovní teplotu (do 260 °C). Toto má za následek, že nemůžeme umístit senzor mezi magnet a feromagnetický disk a senzor musíme umístit z druhého konce magnetu. Na této straně je však změna magnetického pole výrazně menší.

Při splnění zadaných požadavků na pracovní teplotu se mi podařilo najít magnet, který by zajistil změnu magnetické indukce o 3 mT. Jedná se o magnet z materiálu AlNiCo 58/5 o velikosti D4x20mm s axiálním směrem magnetizace a pólový nástavec z magneticky měkké oceli o rozměru D4x16mm.

Jelikož dostupný Hallův senzor A1319 nebyl schopen změřit magnetické pole AlNiCo magnetu D4x20mm, provedl jsem experimentální měření na magnetu o rozměru D4x10mm. I přesto, že tento magnet byl o 50 % menší, než původně simulovaný magnet, tak byly výsledky uspokojivé a téměř se blížily simulovaným hodnotám. Z časových důvodů již nebylo možné simulace zopakovat pro změněné rozměry magnetu.

Pro další zpřesnění simulací bude potřeba zjistit teplotní závislosti jednotlivých fyzikálních parametrů celé sestavy. Dále také bude potřeba zjistit, do jaké míry budou měření ovlivňovat vířivé proudy způsobené vyššími otáčkami rotujícího disku.

## ■ 5.1 Doporučení nejvhodnější technologie a řešení

Na základě výsledků simulací a bližší analýzy vlastností dostupných magneticky tvrdých materiálů se přikláním k použití AlNiCo magnetů, které splňují požadavky na teplotní odolnost a zároveň mají nízké teplotní koeficienty pro reverzibilní demagnetizaci. To znamená, že naměřené hodnoty nebudou tolik závislé na teplotě.

Jako další argument pro volbu AlNiCo magnetů shledávám jejich relativně nízkou cenu a rovněž nižší náchylnost na prudké cenové výkyvy. Kobalt, který je nejdražší vstupní surovinou pro jejich výrobu, se totiž těží v politicky stabilnějších oblastech.

# Příloha A

## Literatura

- [1] Flux leading software. *Hyperworks* [online]. Troy (Michigan, USA): Altair Engineering, © 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.cedrat.com/software/flux/>
- [2] Metals *Business intelligence* [online]. London: Argus Media, © 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.argusmedia.com/metals/>
- [3] Aktuelle und historische Marktpreise der Seltenen Erden *Institute of Rare Earth Elements and Metals* [online]. Dusseldorf: The Institute of Rare Earth Metals, © 2012 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://institut-seltene-erden.org/en/current-and-historical-market-prices-of-rare-earth-gangigsten/>
- [4] Ferromagnetism *HyperPhysics Concepts* [online]. Atlanta: Georgia State University, © 2012 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/ferro.html>
- [5] China Inflation Rate *Trading Economics* [online]. New York: IECONOMICS, © 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.tradingeconomics.com/china/inflation-cpi>
- [6] Samarium - Element information *Royal Society of Chemistry* [online]. Cambridge (UK): Royal Society of Chemistry, © 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/62/samarium>
- [7] Datasheet A1318 and A1319 *Allegro MicroSystems* [online]. Worcester (Massachusetts): Allegro MicroSystems, © 2016 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.allegromicro.com//media/Files/Datasheets/A1318-A1319-Datasheet.pdf>

- [8] ČSN EN 60404-8-1. *Magnetické materiály - Část 8-1: Specifikace pro jednotlivé materiály - Magneticky tvrdé materiály*. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [9] ČSN EN 10025-2. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [10] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. *Magnetické prvky a měření*. Vyd. 3. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 9788001039700.
- [11] CEDRAT, *Geometry and mesh tutorial*. Meylan Cedex (France), 2012.