

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## MĚŘENÍ SLABÉHO MAGNETICKÉHO POLE VE 3D PROSTORU

MEASUREMENT OF WEAK MAGNETIC FIELD IN 3D SPACE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Bár

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

BRNO 2020



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Martin Bár

**ID:** 200459

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření slabého magnetického pole ve 3D prostoru

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je návrh sondy pro měření prostorového rozložení magnetického pole malého permanentního magnetu s využitím integrovaných snímačů. Zadání je možno rozdělit do následujících bodů:

- 1) Zpracujte přehled měřicích principů a komerčně dostupných miniaturních snímačů pro měření magnetického pole s rozsahem do 10 mT. Zaměřte se na magnetorezistivní principy a fluxgate snímače.
- 2) Uveďte základní možnosti výpočtu mag. pole v okolí permanentního magnetu a určete teoretické rozložení mag. pole malého magnetu jednoduché geometrie ve 3D prostoru.
- 3) Proměřte skutečné rozložení mag. pole ve 3D prostoru u vzorků malých neodymových magnetů pomocí gaussmetru firmy F.W. BELL. Porovnejte naměřená data s teoretickými předpoklady. Zdůvodněte případné rozdíly.
- 4) Navrhněte koncepci sondy pro měření magnetického pole velmi malého permanentního magnetu v prostoru s využitím vhodného miniaturního magnetometru s rozsahem v jednotkách mT. Při návrhu se zaměřte na minimalizaci vlivu magnetického pole Země.
- 5) Navrhněte elektrické schéma sondy a připravte podklady pro výrobu desky plošných spojů. Teoreticky popište způsob komunikace se zvoleným integrovaným magnetometrem (magnetometry).

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Du, Winncy Y. Resistive, capacitive, inductive, and magnetic sensor technologies. CRC Press, 2014. ISBN 9781439812440.

[2] Iniewski, Krzysztof. Optical, acoustic, magnetic, and mechanical sensor technologies. CRC Press, 2016. ISBN 9781138074811.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

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

## ABSTRAKT

Cílem práce bylo teoreticky určit rozložení magnetického pole v okolí miniaturních NdFeB magnetů cylindrického tvaru, výsledky simulace porovnat s daty naměřenými komerčním gaussmetrem F.W. BELL a vytvořit vlastní koncepci sondy. V simulačním softwaru Ansys AIM a FEMM 4.2 byl simulován vliv fyzických rozměrů magnetu – průměru a výšky magnetu, rádia hrany magnetu a také ochranného pokovení. Z provedené simulace vyplývá, že velikost magnetické indukce na povrchu magnetu závisí na poměru průměru ku výšce magnetu. Větší rádie hrany magnetu zvětší velikost magnetické indukce těsně nad povrchem magnetu, ale ve větších vzdálenostech je magnetická indukce menší než u magnetu bez rádia. Ochranná vrstva Ni-Cu-Ni o tloušťce 21  $\mu\text{m}$  má u magnetů s rozměry řádově v jednotkách milimetrů negativní vliv na velikost povrchové magnetické indukce. U nejmenšího rozměru magnetu 1x1 mm dojde v důsledku pokovení k poklesu magnetické indukce na povrchu až o 14 %. Hodnoty magnetické indukce naměřené gaussmetrem F.W. Bell nad povrchem magnetu se od simulace nejvíce lišily u magnetu 1x1 mm. S pomocí simulace magnetického pole magnetu byl vytvořen návrh sondy. V práci jsou zmíněny potenciální nedostatky této sondy a také postup při kalibraci senzorů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetické pole, NdFeB magnety, senzory, měření, Ansys, FEMM 4.2, magnetická sonda

## ABSTRACT

The aim of this thesis is to theoretically examine the magnetic field of miniature cylindrical NdFeB magnets, compare the simulation results to real-world measurements, and design a magnetic field probe using suitable sensors. A FEM simulation was conducted using Ansys AIM and FEMM 4.2. The simulation shows that the magnetic induction on the surface of the magnet depends on the diameter/height ratio. The simulation results also show that 21  $\mu\text{m}$  thick protective layer of Ni-Cu-Ni metal on the surface of NdFeB magnets lowers flux density of the smallest magnet sample (1x1 mm) by up to 14 %. It was also concluded that a larger magnet edge radius results in a higher flux density on the surface of the magnet. The biggest differences between simulation data and data measured by the F.W. BELL gaussmeter occurred in the smallest magnet sample. Using the FEMM 4.2 simulation software, a three-axis magnetic field probe was designed. Potential problems with this probe design have been identified. A simple procedure for probe calibration was proposed.

## KEYWORDS

Magnetic field, NdFeB magnets, sensors, measurement, Ansys, FEMM 4.2, magnetic probe

BÁR, Martin. *Měření slabého magnetického pole ve 3D prostoru*. Brno, 2020, 68 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měření slabého magnetického pole ve 3D prostoru“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno 8. 6. 2020

.....  
podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno 8. 6. 2020

.....

podpis autora

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Teorie snímačů magnetického pole</b>	<b>12</b>
1.1 Fyzikální podstata permanentních magnetů . . . . .	12
1.2 BH křivka moderního magnetického materiálu . . . . .	13
1.3 Sensory magnetického pole . . . . .	15
1.4 Sensory založené na Hallovu efektu . . . . .	15
1.5 Magnetorezistivní senzory . . . . .	16
1.5.1 Obyčejná magnetorezistence (OMR) . . . . .	16
1.5.2 Anizotropní magnetorezistence (AMR) . . . . .	17
1.5.3 Gigantická magnetorezistence (GMR) . . . . .	18
1.5.4 Tunelová magnetorezistence (TMR) . . . . .	20
1.6 Fluxgate senzory . . . . .	21
1.7 Průzkum trhu snímačů magnetického pole . . . . .	23
<b>2 Měření magnetického pole magnetů</b>	<b>25</b>
2.1 Orientační měření gaussmetrem F.W. BELL . . . . .	25
2.2 Mapování pole v okolí magnetu . . . . .	26
<b>3 Simulování pole v okolí magnetů</b>	<b>28</b>
3.1 Simulační program FEMM . . . . .	28
3.2 Simulační program Ansys AIM . . . . .	29
3.2.1 Vysvětlení chybného výsledku z Ansys ve větší vzdálenosti . .	31
3.2.2 Zprůměrování dat ze simulace přes plochu senzoru . . . . .	32
<b>4 Závislost magnetické indukce na rozměrech magnetů</b>	<b>33</b>
4.1 Rádus hrany magnetu . . . . .	36
4.2 Povrchová úprava NdFeB . . . . .	38
4.3 Minimalizace vlivu magnetického pole Země . . . . .	41
<b>5 Fyzická realizace sondy</b>	<b>44</b>
5.1 Možné komplikace návrhu sondy . . . . .	45
5.1.1 Neznámá poloha měřících elementů . . . . .	45
5.1.2 Chyby způsobené nedokonalostí senzoru a okolním rušením . .	47
5.2 Komunikace sondy s řídicím počítačem . . . . .	49
<b>Závěr</b>	<b>51</b>
<b>Literatura</b>	<b>53</b>

<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>57</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>58</b>
<b>A Naměřená a simulovaná data</b>	<b>59</b>
A.1 Grafy řezu osou $x=0$ mm pro všechny magnety . . . . .	62
A.1.1 Výstup z algoritmu pro průměrování dat . . . . .	65
A.2 Grafy závislostí B na vlastnostech magnetů . . . . .	66
<b>B Obsah přiloženého DVD</b>	<b>68</b>

# Seznam obrázků

1.1	Demagnetizační křivka materiálu N42 výrobce K&J Magnetics, Inc. . .	13
1.2	Princip fungování Hallova jevu . . . . .	15
1.3	Princip fungování AMR . . . . .	17
1.4	Struktura barber pole u AMR senzoru . . . . .	18
1.5	Princip fungování vrstvené GMR struktury . . . . .	19
1.6	Charakteristika třívrstvé GMR struktury [7] . . . . .	19
1.7	Různé druhy GMR struktur [7] . . . . .	20
1.8	Různé návrhy fluxgate senzorů . . . . .	21
2.1	Ukázka chyby polohy senzoru a magnetu (5,25 mm od čela) . . . . .	26
2.2	Ukázka chyby polohy senzoru a magnetu pro (0,25 mm od čela) . . . .	27
3.1	Prostředí programu FEMM s vykresleným rozložení oblasti na prvky a osově souměrnou geometrií magnetu 3x2,0 mm . . . . .	28
3.2	Grafický výstup simulace ve FEMM (magnet 3x2 mm) . . . . .	29
3.3	Porovnání simulace a naměřených dat pro magnet 3x2 mm . . . . .	30
3.4	Výstup algoritmu na průměrování oblasti pro magnet 4x2 mm . . . . .	32
4.1	Závislost $B_n$ na $d/h$ pro 0 a 0,25 mm od čela magnetu . . . . .	33
4.2	Závislost $B_n$ na $d/h$ a vzdálenosti od čela magnetu . . . . .	34
4.3	Závislost $B_n$ na průměru magnetu . . . . .	35
4.4	Rozdílné nastavení zaoblení hran pro magnet 1x1 mm . . . . .	36
4.5	Závislost velikosti $\mathbf{B}$ na rádiu hrany pro magnet 1x1 mm, simulace . .	37
4.6	Srovnání vlivu vrstvy pokovení pro magnety 1x1 mm a 4x2 mm . . . .	39
4.7	Odchylka od nepokoveného magnetu pro magnety 1x1 mm a 4x2 mm . .	40
4.8	Jednotlivé složky magnetického pole Země . . . . .	41
4.9	Relativní chyba měření způsobená polem Země pro osu $x$ magnetometru .	43
5.1	Schéma a fyzické rozložení sondy (1,9x zvětšené) . . . . .	44
5.2	Vizualizace rozložení magnetického pole na MMC5883MA . . . . .	45
5.3	Diagram komunikace se senzorem MMC5883MA . . . . .	50
A.1	Magnet 1x1,0 mm N42 naměřená data a simulace . . . . .	59
A.2	Magnet 2x0,8 mm N42H naměřená data a simulace . . . . .	59
A.3	Magnet 3x1,0 mm N42 naměřená data a simulace . . . . .	60
A.4	Magnet 3x2,0 mm N42 naměřená data a simulace . . . . .	60
A.5	Magnet 4x1,5 mm N42 naměřená data a simulace . . . . .	61
A.6	Magnet 4x2,0 mm N42 naměřená data a simulace . . . . .	61
A.7	Řez osou $x=0$ mm pro magnet 1x1,0 mm . . . . .	62
A.8	Řez osou $x=0$ mm pro magnet 2x0,8 mm . . . . .	62
A.9	Řez osou $x=0$ mm pro magnet 3x1,0 mm . . . . .	63
A.10	Řez osou $x=0$ mm pro magnet 3x2,0 mm . . . . .	63

A.11 Řez osou $x=0$ mm pro magnet $4 \times 1,5$ mm . . . . .	64
A.12 Řez osou $x=0$ mm pro magnet $4 \times 2,0$ mm . . . . .	64
A.13 Zprůměrování simulace pro magnet $1 \times 1,0$ mm N42 . . . . .	65
A.14 Srovnání vlivu vrstvy pokovení pro magnety $1 \times 1$ mm a $4 \times 2$ mm (lepší varianta) . . . . .	66
A.15 Relativní chyba měření způsobená polem Země pro osu $z$ magnetometru	66

# Seznam tabulek

1.1	Porovnání parametrů vybraných snímačů . . . . .	23
1.2	Fyzikální princip snímačů z tabulky 1.1 . . . . .	24
2.1	Udávané rozměry <b>průměr x výška</b> cylindru pro testované magnety .	25
2.2	Srovnání magnetické indukce 0,25 mm nad povrchem magnetů . . . .	25
4.1	Srovnání lepší a horší varianty pokovení magnetů . . . . .	39
4.2	Hodnoty jednotlivých složek magnetického pole pro Brno dne 11. 3. 2020 . . . . .	41
4.3	Vybrané hodnoty z grafu 4.9 pro magnet 1x1 mm a 4x2 mm . . . . .	42

# Úvod

Tato práce se věnuje způsobům simulace a měření rozložení magnetického pole malých permanentních NdFeB magnetů jednoduché cylindrické geometrie. V první části práce jsou popsány teoretické základy vybraných fyzikálních principů snímačů magnetického pole se zaměřením na citlivé magnetorezistivní a fluxgate snímače. Je zde popsána také demagnetizační křivka materiálu, na konkrétním materiálu od výrobce demonstrován vliv teploty na zmagnetovaný materiál a v souvislosti s tím je zde přiblížen pojem pracovní bod magnetu. V navazující kapitole byl proveden průzkum trhu miniaturních snímačů magnetického pole, u vybraných senzorů byly porovnány parametry.

Dalším krokem bylo odsimulování teoretických modelů magnetů v komerčním simulačním softwaru Ansys AIM a freewarovém řešení FEMM 4.2. Byl ověřen negativní vliv zjednodušení modelu magnetu při modelování magnetického pole. Simulován byl vliv rádia hrany magnetu na velikost magnetické indukce a také vliv povrchové úpravy NdFeB magnetu na rozložení magnetického pole v jeho okolí. Byla navržena deska plošného spoje sondy s modelem senzoru vybraným v průzkumu trhu. K určení ideálního rozložení snímačů na sondě, aby došlo k co nejlepší kompenzaci vlivu magnetického pole Země na měřené hodnoty byla použita simulace magnetického pole nejmenšího z magnetů. Byly popsány nedostatky koncepce sondy a také byla navržena vhodná procedura kalibrace senzorů.

Pomocí komerčně dostupného gaussmetru proběhlo samotné měření rozložení magnetického pole v okolí magnetu v několika vzdálenostech nad čelem magnetu. Naměřená data z celkem šesti rozměrů magnetů byla graficky zpracována. V závěru následuje shrnutí výsledků a návrh řešení problémů, které při vypracování práce nastaly.



# 1 Teorie snímačů magnetického pole

## 1.1 Fyzikální podstata permanentních magnetů

Magnetické momenty jednotlivých atomů feromagnetických materiálů jsou způsobené magnetickými momenty elektronů, ze kterých jsou tyto materiály tvořeny. Magnetické momenty elektronů pramení z jejich spinového momentu hybnosti. Uvnitř feromagnetických materiálů se vytváří oblasti, kde mají atomy svůj magnetický moment souhlasně orientovaný. Tento efekt je způsoben tím, že konfigurace se souhlasnou orientací magnetického momentu sousedních atomů je ve feromagnetiku energeticky výhodnější. Bez přítomnosti externího magnetického pole jsou ovšem tyto oblasti nazývané domény uspořádány tak, že magnetický moment jednotlivých domén nemá preferovaný směr a v průměru je tedy z makroskopického pohledu celkový magnetický moment materiálu nulový.[1]

V případě, že ovšem vložíme feromagnetický materiál do vnějšího magnetického pole, dojde k rozšiřování hranic těch domén, které mají moment směřující paralelně k vnějšímu poli. Spin domén sousedících s doménou, která má magnetický moment preferovaně natočený vzhledem k vnějšímu poli se natočí také tímto směrem. Slabé vnější magnetické pole tedy může způsobit velkou změnu celkové magnetizace materiálu. Když si zobrazíme hysterezní křivku feromagnetického materiálu, která je závislostí magnetické indukce materiálu na intenzitě externího magnetického pole, zjistíme, že materiál si zachová určitou velikost indukce, nazývanou remanentní indukce. Tento jev je způsoben tím, že rozšíření hranic magnetických domén je částečně nevratný proces. Tato remanentní indukce materiálu zůstane, pokud není vystaven externímu magnetickému poli o velké intenzitě opačného směru, než kterým byl zmagnetován. Hodnota intenzity magnetického pole se dá vyčíst z grafu hysterezní křivky a nazývá se koercitivní síla. Velikost magnetické indukce je úměrná magnetizaci materiálu vynásobené permeabilitou vakua podle následujícího vztahu:

$$\mathbf{B} = \mathbf{M}\mu_0 \quad (1.1)$$

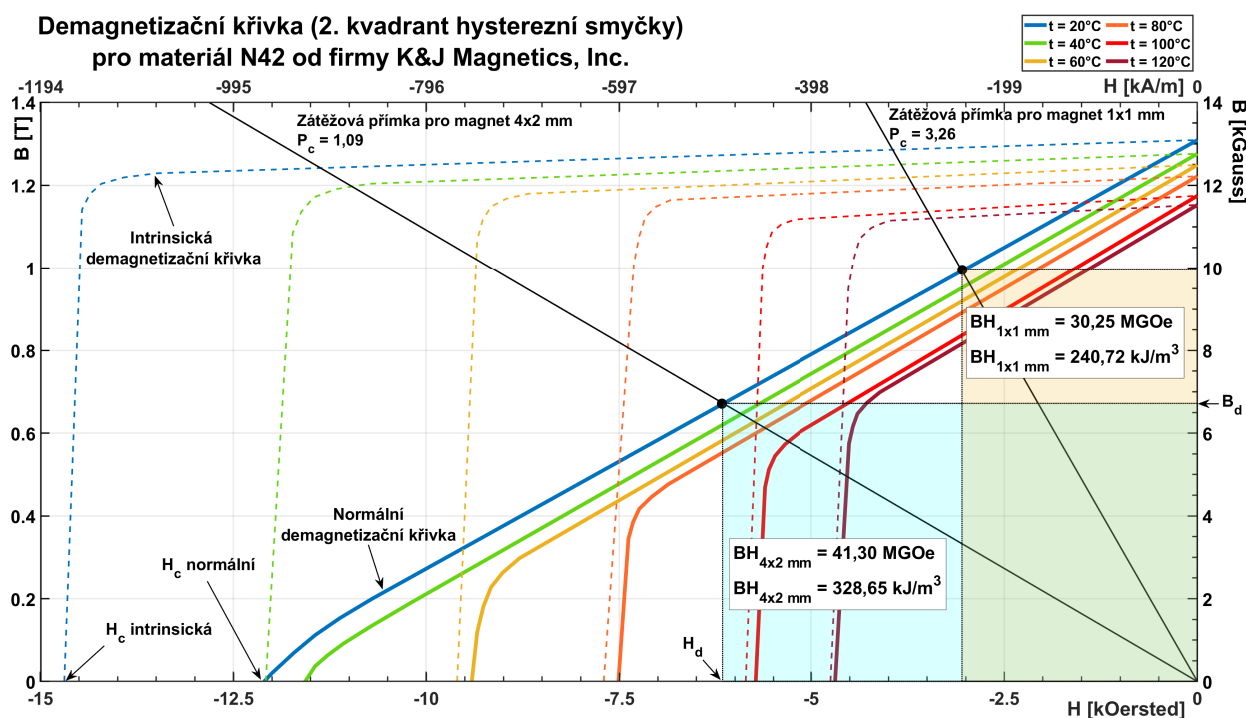
kde  $\mathbf{B}$  je magnetická indukce [T],  $\mathbf{M}$  je magnetizace materiálu [A/m] a  $\mu_0$  je permeabilita vakua [H/m].[1]

Typickým permanentním magnetem je dnes magnet ze slitiny NdFeB. Tento magnet má velmi silné magnetické pole díky příhodné krystalické struktuře a velkou odolnost proti demagnetizaci. Remanentní indukce může dosahovat v hodnoty až 1,4 Tesla v uzavřeném obvodu. Tento typ materiálu má také větší objemovou energetickou hustotu než tradiční ferritové, Alnico či SmCo magnety.

## 1.2 BH křivka moderního magnetického materiálu

Do slitiny NdFeB se přidávají pro úpravu vlastností také další kovy vzácných zemin, například Dy (Dysprosium). Nahrazením části Nd tímto kovem upravíme magnetické vlastnosti slitiny, zvýší se koercitivní síla a zmenší se remanence. Míra zvýšení koercitivní síly je zhruba úměrná hmotnostní koncentraci Dy. Zvýšením koercitivní síly získá magnet větší odolnost vůči demagnetizaci, následkem toho poté také větší odolnost vůči vyšším teplotám. Tato vlastnost plynoucí z přídavku Dy je využívána především ve velmi namáhaných magnetických obvodech, například u motoru elektromobilů nebo v generátorech pracujících při vysokých teplotách. Kvůli zvýšené poptávce po zelené elektřině se v poslední době zvýšila poptávka po Dysprosiu, jež cena z tohoto důvodu roste.[2]

Pro popis magnetického materiálu je vhodné mít k dispozici druhý kvadrant BH křivky, kterou může zveřejnit výrobce.



Obr. 1.1: Demagnetizační křivka materiálu N42 výrobce K& J Magnetics, Inc.

Pro následující popis je důležitá převážně normální BH křivka (v grafu 1.1 značeny plnou čarou). Jde o závislost celkové měřené magnetické indukce (jak z aplikovaného magnetického pole, tak ze zmagetizovaného materiálu) na intenzitě magnetického pole. Intrinsická BH křivka je poté závislost magnetické indukce samotného magnetu na aplikovaném poli, dochází tedy k odečtení hodnoty  $\mathbf{H}$  od  $\mathbf{B}_{\text{normální}}$  (platí pro CGS jednotky).[3] Na grafu 1.1 jsou BH křivky vykreslené z datapointů zveřejněných prodejcem magnetů K&J Magnetics, Inc. pro materiál N42.

U moderního magnetického materiálu NdFeB je jeho normální BH křivka lineární, se zvyšující teplotou se objevuje u vyšších intenzit demagnetizačního pole koleno, pod nímž dochází k nevratné demagnetizaci, a tedy i následné ztrátě remanentní indukce. Zajímavostí je, že různé teplotní určení magnetů (přídavek M, H, SH, UH, EH, VH za číslem gradu) nezaručuje, že nedojde k demagnetizaci při nižší než maximální pracovní teplotě, kterou přídavek označuje (například přídavek UH značí max. pracovní teplotu 180 °C). Typicky se dá říci, že k nevratné demagnetizaci jsou náchylnější nižší magnety s větším průměrem. Vhodný grade magnetu a jeho teplotní odolnost pro danou aplikaci zjistíme určením pracovního bodu magnetu. Pracovní bod magnetu je určen magnetickým obvodem, ve kterém je magnet zapojený a rozměry magnetu. Magnetickým obvodem se rozumí například motor, kde působí externí magnetické pole z cívek. Pracovní bod je určen průsečíkem zátěžové přímky s normálovou BH křivkou. Zátěžová přímka má zápornou směrnici danou tzv.  $P_c$  (koeficient permeance), který je určen pro magnet ve volném prostoru výhradně z jeho rozměrů. Koeficient permeance lze vypočítat z demagnetizačního faktoru, který je pro cylindrické magnety a různé poměry výšky/průměru uveden zde [4]. Pro přímé určení  $P_c$  lze využít aproximaci uvedenou zde [5]. Počátek, ze kterého potom zátěžová přímka vychází, je dán pro magnet ve volném prostoru počátkem souřadnic (bod [0,0]). Z pracovního bodu magnetu poté vyčteme velikost remanentní indukce a také energetický produkt magnetu BH. Pro maximální velikost BH a grade N42 vychází, že magnet by měl mít  $P_c$  okolo 1, což odpovídá poměru průměr/výšce cylindru cca 2,1.

Pracovní rozsah teplot pro magnet také poněkud neintuitivně nevychází z gradu a teplotního určení materiálu, ale je určen  $P_c$ , který je ve volném prostoru závislý na rozměrech magnetu. Pokud jsme se dostali s pracovním bodem určeným pomocí zátěžové přímky pod koleno BH křivky, musíme zvolit vhodnější teplotní specifikaci gradu magnetu pro zajištění reverzibilní demagnetizace. Příkladem může být poloha pracovního bodu magnetu 4x2 mm z grafu 1.1. Ten je určen podle známých rozměrů magnetů a předpokládané teploty, v tomto případě 20 °C. Je vidět, že v případě nárůstu teploty na 120 °C dojde k vytvoření nového pracovního bodu pod kolenem BH křivky, dojde tedy k nevratné demagnetizaci magnetu. Naopak u magnetu 1x1 mm nedojde ani při teplotě 120 °C k posunu pracovního bodu pod koleno, lze ho tedy bez nevratné demagnetizace provozovat i při této teplotě, ač maximální pracovní teplota materiálu v datasheetu je 80 °C.[6]

Následkem záporného teplotního koeficientu koercitivity a remanence NdFeB ale dojde ke snížení  $B_d$  a  $H_d$  posunem na novou BH křivku odpovídající vyšší teplotě. Dále lze z křivek vyčíst, že magnet 4x2 mm má větší energetickou hustotu, je tedy cenově výhodnější používat tento poměr výšky/délky, jelikož spotřebujeme menší objem magnetického materiálu.

## 1.3 Senzory magnetického pole

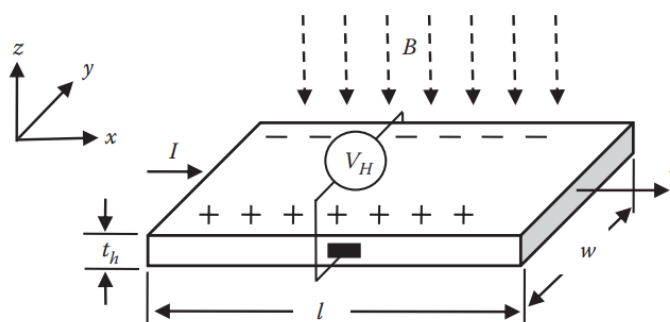
Magnetické pole se dá měřit použitím mnoha typů senzorů. Senzor vybíráme podle maximální/minimální velikosti měřeného magnetického pole, požadované přesnosti, citlivosti. V následujícím textu budou popsány nejpoužívanější typy senzorů, které se dají použít na měření slabých magnetických polí.

## 1.4 Senzory založené na Hallovu efektu

Pokud vložíme tenký plátek vodiče, kterým protéká elektrický proud do vnějšího magnetického pole, toto magnetické pole působí na nosiče náboje silou, která se nazývá Lorentzova síla. Nosiče náboje jsou touto silou tlačeny směrem kolmým na směr šíření náboje a kolmým na směr působení pole. Podle obrázku 1.2 se tedy dostanou k boční straně vodiče. Následkem tohoto jevu se mezi bočními stranami vodiče vytvoří elektrické napětí, nazývané Hallovo napětí. Velikost tohoto napětí je přímo úměrná protékajícímu proudu vodičem, velikosti magnetické indukce externího pole a nepřímo úměrná náboji, hustotě nosičů náboje a tloušťce vodiče.

$$U_h = \frac{IB}{qN_C t_h} \quad (1.2)$$

Kde  $U_h$  je Hallovo napětí [V],  $I$  je elektrický proud [A],  $B$  magnetická indukce [T],  $q$  je náboj nosiče [C],  $N_C$  je počet nosičů náboje na metr krychlový [ $\text{m}^{-3}$ ] a  $t_h$  je tloušťka vodiče [m]. [7]



Obr. 1.2: Princip fungování Hallova jevu

Princip fungování je patrný z obrázku 1.2. Podle vztahu 1.2 teoreticky nezáleží na tvaru Hallovy sondy. V praxi ovšem na tvaru záleží, používá se proto geometrická korekce pomocí faktoru  $G_h$ , kterým se vynásobí rovnice 1.2. Faktor  $G_h$  nabývá pro teoretickou Hallovu sondu hodnotu 1, pro reálné potom hodnoty mezi 0,7 a 0,9. [7]

V senzorech se pro výrobu Hallových senzorů využívají polovodiče, které mají menší koncentraci nosičů náboje. Koncentrace je navíc kontrolovatelná pomocí dopování na polovodiče typu n nebo p. Díky tomu mají řádově větší citlivost než kovové senzory a jsou i dostatečně teplotně stabilní.[7]

Senzory na principu Hallova jevu mohou měřit magnetické pole řádově od mT do jednotek T, pro měření magnetického pole o intenzitě srovnatelné s polem Země jsou ovšem většinou používány senzory na magnetorezistivním principu.

## 1.5 Magnetorezistivní senzory

Dalším typem senzorů jsou magnetorezistivní senzory. Jedná se o senzory na principu magnetorezistence (MR), což je efekt, při kterém se mění elektrický odpor daného materiálu v přítomnosti vnějšího magnetického pole. Míra změny odporu se udává v  $M_R$ , jde o bezrozměrnou hodnotu, která je závislá na materiálu vodiče a určí se podle následujícího vztahu:

$$M_R = \frac{\rho_B - \rho_0}{\rho_0} \times 100\% \quad (1.3)$$

Kde  $\rho_B$  [ $\Omega \times m$ ] je rezistivita vodiče při působení magnetického pole a  $\rho_0$  je rezistivita vodiče bez přítomnosti magnetického pole.  $M_R$  dosahuje hodnoty řádově jednotky procent. Pro praktické využití principu MR je nutné tuto hodnotu zvýšit. K tomu je potřeba vytvářet struktury využívající různých MR dějů, které musí mít z fyzikální podstaty dějů velmi malou tloušťku, řádově jednotky až desítky nm.[7] Proto k rozšíření těchto senzorů došlo až v posledních desetiletích, kdy dostatečně pokročily výrobní technologie.

Mezi magnetorezistivní děje patří:

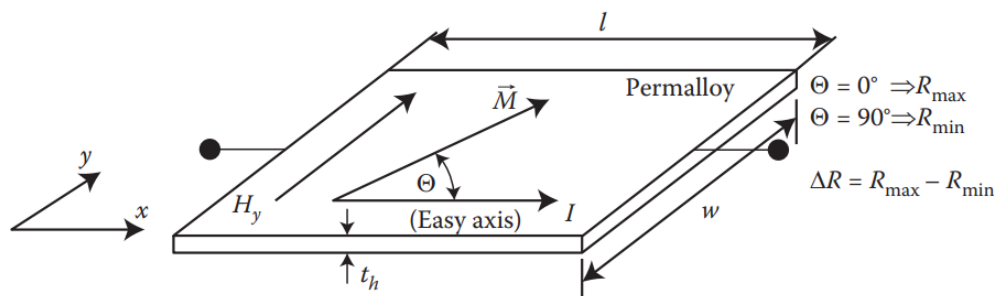
1. *Obyčejná magnetorezistence* (OMR), jev v nemagnetických kovech
2. *Anizotropní magnetorezistence* (AMR), jev ve feromagnetických slitinách
3. *Gigantická magnetorezistence* (GMR), jev ve struktuře, kde se střídají feromagnetické slitiny a kovové vrstvy
4. *Tunelová magnetorezistence* (TMR), jev ve struktuře, kde se střídají feromagnetické slitiny a tenké izolující vrstvy

### 1.5.1 Obyčejná magnetorezistence (OMR)

Jev obyčejné magnetorezistence nastává u nemagnetických kovů, kdy je vyvolán působením Lorentzovy síly na pohybující se elektron v magnetickém poli. Tato síla způsobí spirálový pohyb elektronu, jenž zvýší rezistivitu materiálu. Pro kovy jako je např.: Cu, Ag nebo Au je jejich OMR hodnota menší než 1 % v magnetickém poli 1 T, tento princip je tedy v praxi nevhodný pro výrobu senzorů.[7]

## 1.5.2 Anizotropní magnetorezistence (AMR)

Tento jev nastává u feromagnetických materiálů. Popisuje závislost rezistivity materiálu na orientaci vnějšího magnetického pole vzhledem ke směru proudu protékajícího senzorem.[7]



Obr. 1.3: Princip fungování AMR [7]

Magnetické pole působí v ose  $y$ , proud protéká v ose  $x$ , úhel  $\Theta$  je úhel mezi vektorem magnetizace  $\mathbf{M}$  a proudem  $I$  protékajícím senzorem. Tento jev lze popsat vztahem:

$$\rho(\Theta) = \rho_0 + \Delta\rho \cos^2\Theta \quad (1.4)$$

kde  $\rho(\Theta)$  [ $\Omega \times \text{m}$ ] je výsledná rezistivita senzoru v závislosti na úhlu  $\Theta$ ,  $\rho_0$  je rezistivita senzoru bez vnějšího magnetického pole,  $\Delta\rho$  je rozdíl v rezistivitě při úhlu  $\Theta=90^\circ$  a  $\Theta=0^\circ$ , úhel  $\Theta$  [ $^\circ$ ] je úhel mezi vektorem magnetizace  $\mathbf{M}$  a proudem  $I$ . [7]

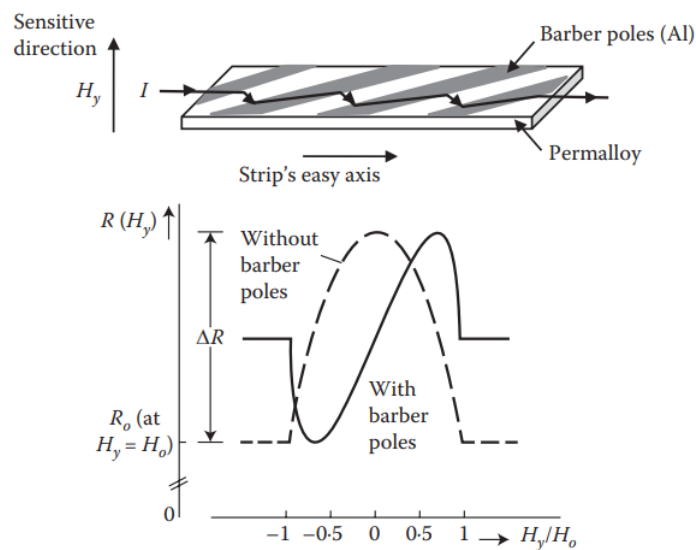
Při výrobě senzoru např. z permalloy je tenký plíšek kovu při chladnutí vystaven silnému vnějšímu magnetickému poli, které jej zmagnetuje a určí mu preferovaný směr magnetizace (na obrázku 1.3 je tento směr v ose  $x$ ). Pokud tento plíšek vložíme do vnějšího magnetického pole, které působí v ose  $y$ , vektor magnetizace senzoru  $\mathbf{M}$  bude ovlivněn vnějším polem a rotuje o úhel  $\Theta$ . Výsledný odpor bude tedy při velmi silném vnějším poli, které způsobí nárůst úhlu  $\Theta$  na  $90^\circ$  podle rovnice 1.4 minimální, značený  $R_{min}$ . [7]

Odpor senzoru odpovídá intenzitě vnějšího magnetického pole, které působí v ose  $y$  a lze popsat následujícím vztahem:

$$R(H_y) = R_0 + (R_{max} - R_{min}) \left[ 1 - \left( \frac{H_y}{H_{max}} \right)^2 \right] (H_y \leq H_{max}) \quad (1.5)$$

Kde  $R_0$  je hodnota odporu v případě, že vnější magnetické pole působí kolmo na směr výchozí magnetizace  $\mathbf{M}$ , jde tedy o  $R_{min}$ ,  $R_{max}$  je hodnota odporu v případě, že úhel mezi proudem  $I$  a vektorem  $\mathbf{M}$  je  $0^\circ$ .  $H_{max}$  je poté maximální velikost pole před saturací senzoru. [7]

Senzor, jehož struktura je na obrázku 1.3 má nevyhovující závislost odporu na vnějším magnetickém poli, jelikož jeho citlivost se blíží k nule v přítomnosti slabých magnetických polí a také nelze rozlišit směr působení externího pole. Pro vyřešení tohoto problému se používá tzv. barber pole struktura (podle vizuální podobnosti s cedulí u holičství), kdy jsou na senzor depositovány plátky hliníku pod úhlem 45° vzhledem k výchozí magnetizaci senzoru. Elektronky poté z důvodu vyšší vodivosti hliníku protékají preferovaně přes hliníkové plátky a přes permalloy jsou nuceny protékat pod úhlem 45° (jde o nejkratší cestu).[7]

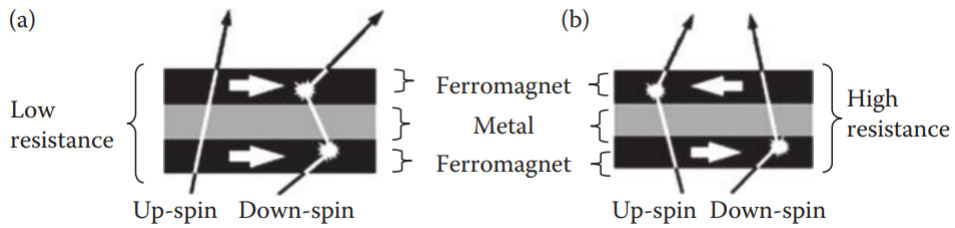


Obr. 1.4: Struktura barber pole u AMR senzoru a výsledná vylepšená R-H charakteristika [7]

Z obrázku 1.4 je patrné zvýšení citlivosti při slabém magnetickém poli, dále také linearizace charakteristiky a rozlišitelnost znaménka externího magnetického pole.

### 1.5.3 Gigantická magnetorezistence (GMR)

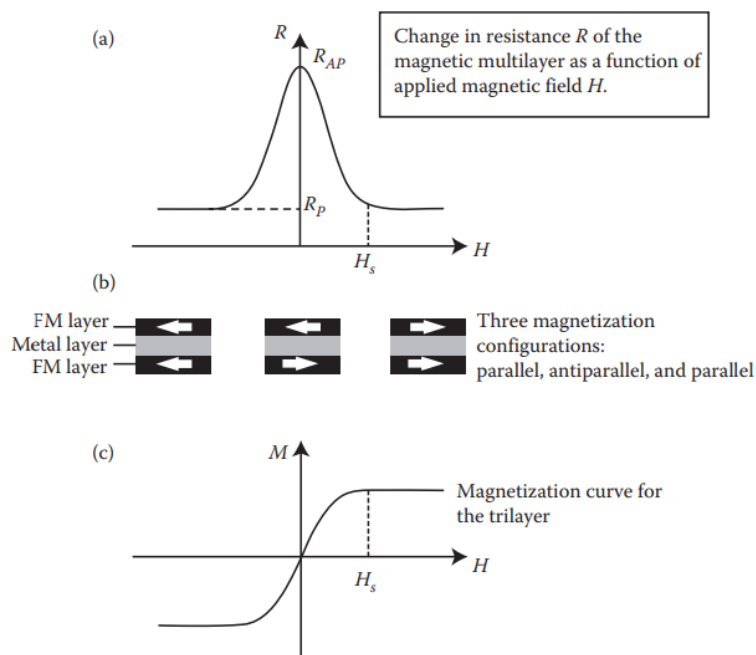
Jedná se o vrstvenou strukturu, kde se střídají plíšky z feromagnetického materiálu a kovu. Tloušťka kovu mezi feromagnetickými plíškami ovlivňuje, jaká je orientace magnetizace sousedících feromagnetických materiálů. Vhodným nastavením tloušťky nemagnetické vrstvy tedy můžeme dosáhnout toho, že jsou sousedící feromagnetické plíšky magnetizovány antiparalelně. Při tomto zmagnetování je odpor senzoru nejvyšší.[8]



Obr. 1.5: Princip fungování vrstvené GMR struktury [7]

Následkem působení vnějšího magnetického pole dojde k tomu, že se magnetizace sousedících vrstev feromagnetika změní z antiparalelní na paralelní, čímž se značně zmenší odpor přechodu. Tento jev je způsoben tím, že up-spin elektrony (mají spin orientovaný paralelně s vnějším magnetickým polem) při paralelní orientaci magnetizace mohou projít strukturou s menším rozptylem. Když jsou vrstvy magnetizovány antiparalelně, rozptyl nastává při průchodu strukturou jak u up-spin elektronů, tak i u down-spin elektronů (jejich spin je orientován antiparalelně vzhledem k vnějšímu magnetickému poli), což zvýší odpor struktury.[7]

Tento jev je patrný z obrázku 1.5.

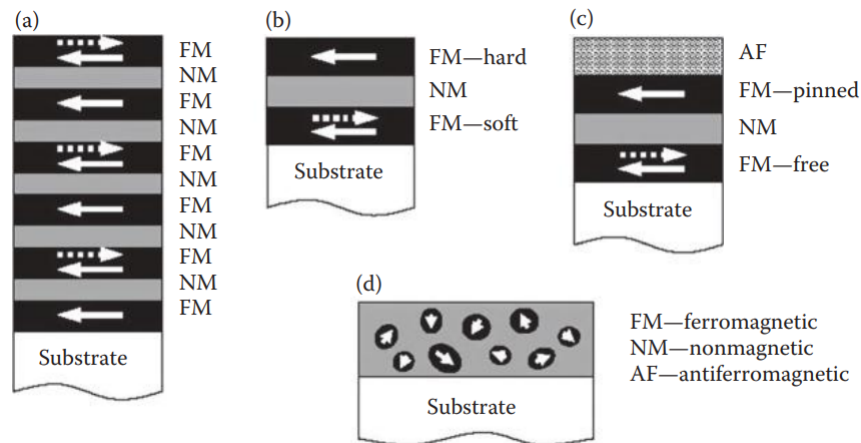


Obr. 1.6: Charakteristika třívrstvé GMR struktury [7]



Existuje více uspořádání materiálů pro výrobu GMR struktury:

1. Vícevrstvá struktura
2. Pseudo spin valve
3. Spin valve
4. Granulární tenkovrstvá struktura



Obr. 1.7: Různé druhy GMR struktur [7]

Tyto struktury jsou zobrazeny na obrázku 1.7. Typ struktury na Obr. 1.7 a) je nejstarším způsobem výroby GMR struktur, rozdíl odporů na něm může být více než 10 % [9]. Pokud je vnější magnetické pole dostatečně silné (aby došlo k saturaci struktury), způsobí, že se vrstvy zarovnají paralelně [7].

U struktury na Obr. 1.7 b) jsou vrstvy feromagnetického materiálu s různou magnetickou tvrdostí, což způsobí, že dojde k otočení magnetizace jednotlivých vrstev při různých intenzitách magnetického pole, čímž dojde k vytvoření GMR efektu.

Struktura na Obr. 1.7 c) se vyznačuje tím, že vrchní vrstva feromagnetika má určený směr magnetizace díky antiferromagnetické vrstvě AF nad ní. Magnetizace dolní vrstvy feromagnetika se může měnit působením vnějšího magnetického pole.

U granulárního tenkovrstvého filmu Obr. 1.7 d) jsou zavedeny oblasti s feromagnetickým materiálem, jejichž směr magnetizace může být působením vnějšího magnetického pole změněn, čímž se změní i odpor struktury. Senzory založené na jevu GMR jsou velmi citlivé, změna odporu při orientaci magnetizace paralelně/antiparalelně může dosáhnout i 200 %.[7]

#### 1.5.4 Tunelová magnetorezistence (TMR)

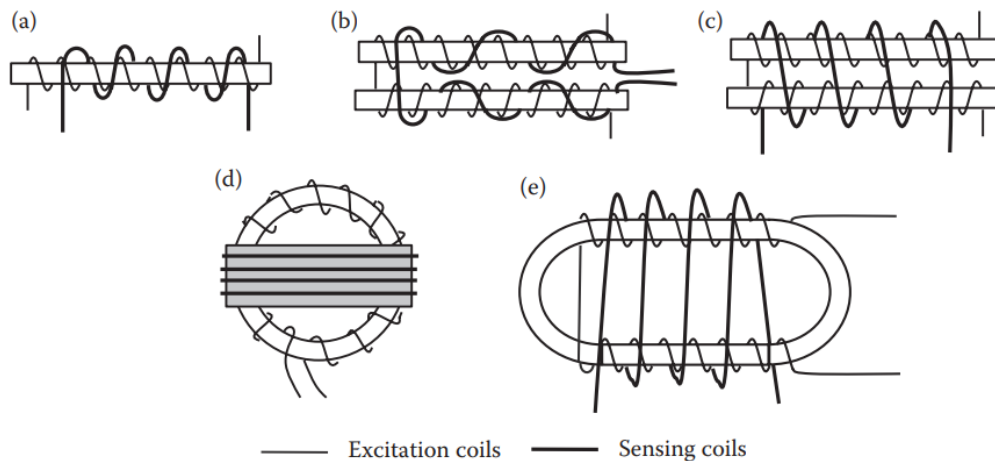
Podobně jako u jevu založeném na GMR, i u tunelové magnetorezistence jde o strukturu vytvořenou vrstvením materiálů, zde ovšem místo nemagnetického kovu

mezi sousedícími feromagnetickými částmi nacházíme tenkou vrstvu izolantu. Její tloušťka je taková, aby elektrony mohly přes bariéru protunelovat. Tunelování elektronů preferovaným směrem zajistíme napětím na elektrodách. Když jsou magnetizace feromagnetických vrstev orientovány paralelně, je více pravděpodobné, že elektrony protunelují přes bariéru, což značí stav nízké rezistivity.[7]

## 1.6 Fluxgate senzory

Základem fluxgate senzoru je jádro z magneticky měkkého materiálu (malá koerzivní síla, vysoká permeabilita), které je excitační cívkou střídavě buzeno do saturace a ze saturace tak, že se střídavě prochází celá hysterezní křivka. Z hysterezní křivky vychází, že hluboko v saturaci poklesne permeabilita materiálu na úroveň volného prostoru, zmenší se tedy magnetická vodivost pro externí magnetické pole a tok v jádru poklesne. Bez přítomnosti externího pole je napětí výstupní cívky symetrické. Pokud je externí magnetické pole směřováno správným směrem (rovnoběžně s osou válcového jádra), dojde ke sčítání toků z externího zdroje magnetického pole a excitační cívky v kladném bodě saturace a odečítání toků v záporném směru saturace. To způsobí, že výstup měřicí cívky bude oproti případu bez přítomnosti externího pole posunutý. Ke zlepšení návrhu lze využít feedback cívku, která zajistí nulový tok obvodem. Proud, který cívkou proteče je pak úměrný vnějšímu poli, tímto zapojením také zvýšíme linearitu.[10]

V praxi existují různé návrhy fluxgate senzorů, viz obrázek.



Obr. 1.8: Různé návrhy fluxgate senzorů [7]

Struktura a) se v praxi nepoužívá, jelikož výstupní cívka bude měřit i excitační napětí, jehož průběh pro nás není hodnotný. Zapojení b) má excitační cívku navi-

nutou takovým způsobem, že tok v jádrech je vzájemně opačný, napětí na výstupní cívce se tedy vzájemně vyruší, budeme měřit pouze užitečný signál. Design d) je podobný jako design c), došlo zde ale k uzavření magnetického obvodu na koncích. Vzhledem k isotropii tohoto designu určuje směrovost tohoto snímače orientace vlnutí výstupní cívky. Na tento typ zapojení je možné umístit druhou výstupní cívku, kdy při orientaci kolmo na první můžeme měřit ve dvou osách.[7] Zapojení e), nazýváno díky tvaru závodní dráha, má nejlepší odolnost [11] vůči působení pole v příčném směru k směru měření (crossfield). Jeho výroba je ovšem komplikovaná [10].

Z uvedených zapojení je často používáno právě zapojení d), má totiž menší spotřebu energie (hodí se tak na vesmírné použití), výborné rozlišení a podle [12] také stabilitu porovnatelnou se zapojením b) [10].

## 1.7 Průzkum trhu snímačů magnetického pole

V tabulce 1.1 jsou vypsány parametry aktuálně dostupných miniaturních snímačů magnetického pole. Všechny snímače až na Freescale/NXP MAG3110 jsou v době psaní práce (04. 01. 2020) dostupné skladem na stránce [cz.mouser.com](http://cz.mouser.com). Snímače v tabulce měří magnetické pole ve všech třech osách (kromě DRV425). Zároveň všechny snímače až na Memsic MMC3416xPJ a DRV425) disponují čidlem pro měření teploty k případné kompenzaci. Parametry šumu, max. frekvence (ODR) a rozlišení jsou udávány pro největší možnou přesnost senzorů, kterou lze nastavit v kontrolních registrech. Parametry snímačů jsou z důvodu přehlednosti uvedeny v jednotkách Gauss, kdy  $1 \text{ mT} = 10 \text{ Gauss}$ . V tabulce 1.2 je poté uveden výrobce daného modelu senzoru a také fyzikální princip senzoru, pokud ho výrobce uvádí. Za zmínku stojí Bosh BMM150, u něhož výrobce používá 2 různé principy v jednom snímači, což se projeví i rozdílnými parametry senzoru v osách  $x$  a  $y$  než v případě osy  $z$ . K měření pole působícího v ose  $z$  se využívá Hallův jev a osy  $x$  a  $y$  využívají proprietární technologii FlipCore. Výrobce oficiálně neuvádí princip této technologie.

Tab. 1.1: Porovnání parametrů vybraných snímačů

Model	Výstup	Rozsah[G]	Res <sup>1</sup> [mG/LSB]	Šum[mG]	ODR <sup>2</sup> [Hz]	Cena <sup>3</sup> [100 ks]	Rozměry[mm]
MAG3110	I <sup>2</sup> C	±10	1	2,5	10	Není dostupný	2,0x2,0x0,85
IIS2MDCTR	I <sup>2</sup> C/SPI	±49,152	1,5	3	100	37,44 Kč/ks	2,0x2,0x0,7
MMC5603NJ	I <sup>2</sup> C	±30	0,0625	1,5	75	11,15 Kč/ks	0,8x0,8x0,4
MMC5883MA	I <sup>2</sup> C	±8	0,25	0,4	100	71,24 Kč/ks	3,0x3,0x1,0
MMC3416xPJ	I <sup>2</sup> C	±16	0,5	1,5	125	55,12 Kč/ks	1,6x1,6x0,6
LIS3MDL	I <sup>2</sup> C/SPI	±16	0,45	3,2/4,1 <sup>4</sup>	155	25,75 Kč/ks	2,0x2,0x1,0
BM1422AGMV	I <sup>2</sup> C	±12	0,42	neuvádí	až 1000 <sup>5</sup>	111,28 Kč/ks	2,0x2,0x1,0
BMM150	I <sup>2</sup> C/SPI	±13/25 <sup>4</sup>	3	3	20	23,87 Kč/ks	1,56x1,56x0,6
DRV425	I→U	±20	podle součástek <sup>6</sup>	0,17	podle ADC	119,60 Kč/ks	4,0x4,0x0,75

<sup>1</sup>Rozlišení snímače

<sup>2</sup>Output data rate (frekvence výstupních dat)

<sup>3</sup>Získána ze stránek Mouser Electronics dne 04. 01. 2019

<sup>4</sup>Hodnota pro osy ( $x$  a  $y$ ) / osu  $z$ , platí pro rozsah jen ±12 G

<sup>5</sup>Datasheet je neúplný, nelze poznat, zda jde o hodnotu před nebo po průměrování

<sup>6</sup>Závisí na velikosti odporu  $R_{SHUNT}$  a rozlišení a vstupním rozsahu hodnot použitého ADC

Tab. 1.2: Fyzikální princip snímačů z tabulky 1.1

Výrobce	Datasheet	Model	Princip	Pouzdro
Freescall/NXP	[13]	MAG3110	TMR	DFN(10)
STMicroelectronics	[14]	IIS2MDCTR	MR, není uvedeno jaký	LGA(12)
MEMSIC	[15]	MMC5603NJ	AMR	WLP(4)
MEMSIC	[16]	MMC5883MA	AMR	LGA(16)
MEMSIC	[17]	MMC3416xPJ	AMR	BGA(12)
STMicroelectronics	[18]	LIS3MDL	TMR	LGA(12)
ROHM	[19]	BM1422AGMV	MR, není uvedeno jaký	MLGA(10)
Bosch Sensortec	[20]	BMM150	FlipCore/Hallův jev <sup>1</sup>	WLCS(12)
Texas Instruments	[21]	DRV425	Fluxgate	WQFN(20)

Z tabulky 1.1 se dá vyčíst, že jako výhodný vychází senzor STMicroelectronics IIS2MDCTR díky relativně nízké ceně, největšímu rozsahu a dobrým parametrům rozlišení a šumu. Dále Memsic MMC5603NJ díky velkému rozsahu, nejlepšímu rozlišení, nízké úrovni šumu a nízké ceně. Dalším vhodným senzorem je MMC5883MA, který má SET/RESET cívky pro potlačení teplotního driftu offsetu můstku, dostatečné rozlišení, nejnižší šum a také pouzdro, které lze po úpravě zapájet i ručně. Naopak jako nevhodný se zdá BM1422AGMV, především kvůli nekonkrétním informacím v datasheetu a vysoké ceně.

Pouze pro porovnání je do tabulek zahrnut i senzor DRV425 založený na fluxgate principu. Tento senzor má analogový výstup, takže odpadá výhoda předzpracovaného číslicového výstupu jako u ostatních snímačů, a především měří pouze v jedné ose. Pro kompenzaci pole Země by bylo tedy potřeba použít 3 navzájem kolmo orientované senzory (tohoto je na DPS dosti obtížné dosáhnout). Do měření by z tohoto důvodu vstupovala chyba způsobená vzájemnou nenulovou vzdáleností senzorů a nepřesným osazením senzorů na DPS. Z parametrů je patrný nízký šum tohoto snímače – jedna z výhod fluxgate snímačů. Vyznačuje se také dobrou linearitou díky interní kompenzační cívce. Z hlediska možnosti ručního zapájení senzoru se kvůli pouzdru jako vyloženě nevhodné jeví senzory MMC5603NJ, MMC3416xPJ a BMM150.

<sup>1</sup>Hallův jev pro osu  $z$  / Proprietární technologie Bosh FlipCore pro osy  $x$  a  $y$

## 2 Měření magnetického pole magnetů

Měření magnetického pole probíhalo pro 6 velikostí NdFeB magnetů, od každé velikosti bylo k dispozici několik kusů. Všechny zmíněné magnety jsou cylindrického tvaru, axiálně magnetované.

Tab. 2.1: Udávané rozměry **průměr x výška** cylindru pro testované magnety

<b>Rozměry [mm]</b>	1x1,0	2x0,8	3x1,0	3x2,0	4x1,5	4x2,0
<b>Grade [-]</b>	N42	N42H	N42	N42	N42	N42

Mezi základní parametr NdFeB magnetů patří tzv. grade, který určuje maximální energetický produkt magnetu. Značí se písmenem N (Neodym), poté následuje číslice od 30-52, která odpovídá energetickému produktu (BHmax). Další písmena označují pracovní rozsah teplot magnetu, především horní hranici teploty, jelikož u NdFeB magnetů dochází ke zhoršení magnetických vlastností při zvyšování teploty. Zvyšování teploty způsobí zmenšení koercitivní síly a také hodnoty remanentní magnetické indukce. Všechny testované magnety jsou typu N42, s výjimkou rozměru 2x0,8mm, který je typu N42H, což značí zvýšenou max. pracovní teplotu (120 °C oproti 80 °C pro N42). Tyto parametry lze odečíst z BH křivky magnetického materiálu.

### 2.1 Orientační měření gaussmetrem F.W. BELL

Pro prvotní ověření parametrů magnetů proběhlo měření velikosti normálové indukce na povrchu magnetu. K tomu byl použit gaussmetr F.W. Bell 5080 se standardní axiální Hallovou sondou. Senzor měří pouze složku  $B_n$ , tedy tu, která je normálová k jeho rovině. Tato sonda má senzor umístěn 0,25 mm od povrchu (výrobce neudává odchylku), průměr aktivní oblasti senzoru je 0,4 mm. U všech měření tedy neměříme skutečnou velikost magnetické indukce na povrchu magnetu, ale ve vzdálenosti 0,25 mm od povrchu, u miniaturních magnetů tedy hodnotu značně menší. Všechny hodnoty vzdáleností simulace jsou tak získány v žádané vzdálenosti+0,25 mm. Konečný rozměr senzoru způsobuje problémy především u nejmenšího magnetu 1x1,0 mm, jelikož neměříme hodnotu magnetické indukce v bodě, ale měříme hodnotu v kruhové oblasti o průměru cca 0,4 mm.

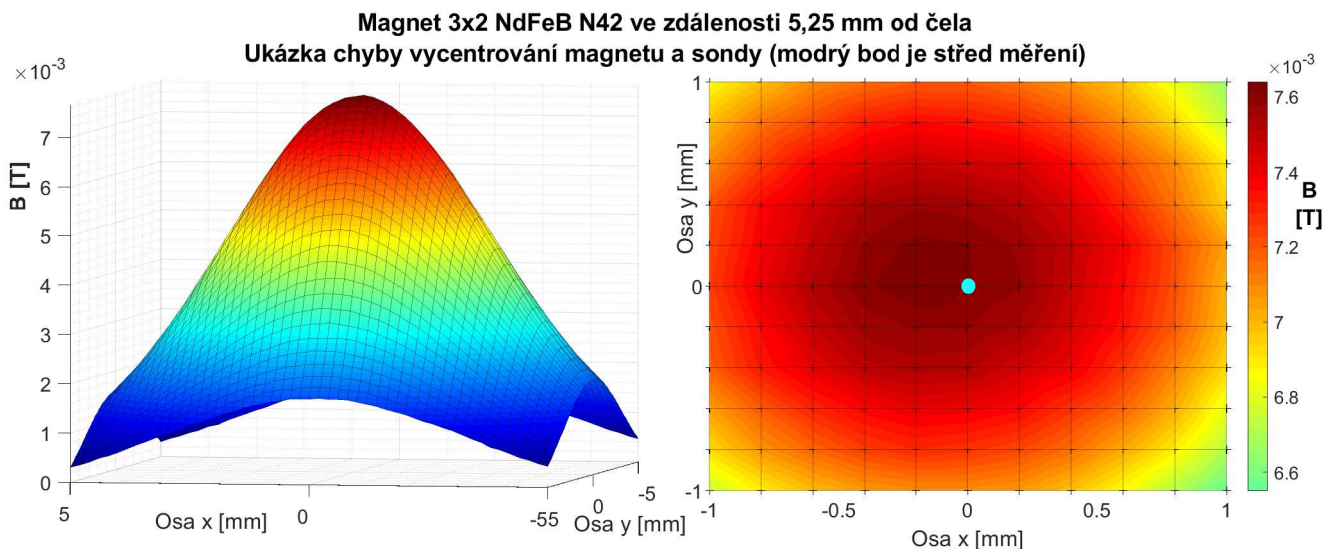
Tab. 2.2: Srovnání magnetické indukce 0,25 mm nad povrchem magnetů

<b>Rozměr [mm]</b>	1x1,0	2x0,8	3x1,0	3x2,0	4x1,5	4x2,0
<b><math>B_n</math> [mT]</b>	86,0	166,1	184,9	265,5	249,3	286,6

Nejvyšší hodnotu povrchové indukce měl očekávaně největší magnet o rozměru 4x2,0 mm, kde průměrná hodnota pro 10 magnetů byla  $(286,6 \pm 7)$  mT. Nejmenší hodnotu měl magnet 1x1,0 mm  $(86,0 \pm 2)$  mT.

## 2.2 Mapování pole v okolí magnetu

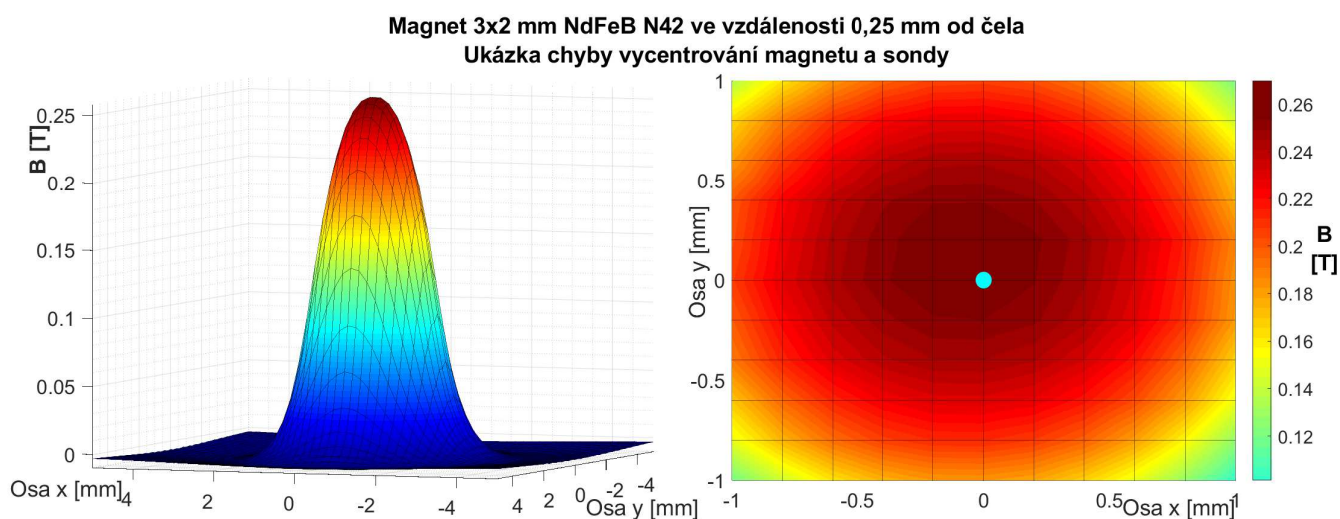
Pro měření rozložení magnetického pole v okolí magnetu bylo použito polohovací zařízení s pohybem ve třech osách pomocí krokových motorů. Měřicí sonda byla zafixována. Magnet byl připevněn k polohovacímu zařízení, které ovládal program v LabView. V tomto programu se nastaví body, ve kterých dojde k vyčtení hodnoty z gaussmetru přes rozhraní RS-232. Hodnoty magnetické indukce byly změřeny v oblasti 10x10 mm nad magnetem, s rozstupem jednotlivých bodů 1 mm pro vytvoření hrubé mřížky 11x11 hodnot k orientačnímu měření. Pro podrobnější zmapování pole ve vzdálenostech 5,25 a 0,25 mm od čela vzorků **4x2,0 mm** a **3x2,0 mm** byly změřeny body v rozstupech 0,2 mm, byla tedy naměřena mřížka 51x51 hodnot. Tyto hodnoty byly zpracovány a doopraveny v programu MATLAB R2019a, byl vytvořen povrchový graf.



Obr. 2.1: Ukázka chyby polohy senzoru a magnetu (5,25 mm od čela)

Graf 2.1 zobrazuje v levé polovině rozložení normálové magnetické indukce  $B_n$  ve vzdálenosti 5,25 mm od magnetu. Z grafu lze vyčíst, že následkem ručního upevnění magnetu na polohovací zařízení nešlo nikdy dokonale nastavit polohu nulového výchozího bodu měření magnetu. Osa měřicí sondy nebyla nikdy dokonale rovnoběžná s osou magnetu, ani nedošlo k správnému nastavení počáteční oblasti s maximální hodnotou  $B_n$ , která by se v grafu měla nacházet na pozici  $[0,0]$ . Tato

skutečnost je zakreslena v grafu v pravé polovině obrázku modrou tečkou. Ve vzdálenosti 5,25 mm od čela magnetu mohou začít ovlivňovat měření krokové motory polohovacího zařízení, jejichž magnetické pole se projeví převážně v okrajích měřené oblasti, jelikož se k sondě přibližují. Naměřená křivka tak nebude úplně symetrická. Dalším důvodem je fakt, že v okrajích měřené oblasti je nejnižší velikost normálové složky měřeného pole, lze tak snáze zpozorovat zvýšené hodnoty na straně blíže motoru. Velikost magnetické indukce je oproti cca 270 mT u povrchu magnetu pouhých 7,6 mT pro 5,25 mm od povrchu magnetu. Pro další zvyšování vzdálenosti by bylo zapotřebí měřit v prostředí bez jiných zdrojů magnetického pole, odstranit z blízkosti všechny železné předměty a upevnit magnet do větší vzdálenosti od polohovacích motorů. Poté by bylo vhodné použít senzor pro měření menších velikostí magnetické indukce, jelikož se pohybujeme u spodního rozsahu gaussmetru F.W. Bell 5080, který má na nejnižším rozsahu 30 mT rozlišení 0,01 mT.



Obr. 2.2: Ukázka chyby polohy senzoru a magnetu (0,25 mm od čela)

K porovnání s rozložením z grafu 2.1 je v grafu 2.2 přiloženo i měření pro vzdálenost 0,25 mm od povrchu magnetu. Je zde vidět mnohem strmější změna  $B_n$  s rostoucí vzdáleností od středu magnetu. Na okrajích magnetu je totiž silně nehomogenní pole. V případě, že bychom pole proměřovali sondou měřící ve 3 osách, naměřili bychom zde největší velikost magnetické indukce. V grafu na pravé části obrázku lze podobně jako v 2.1 pozorovat nedokonalou počáteční pozici senzoru a magnetu.

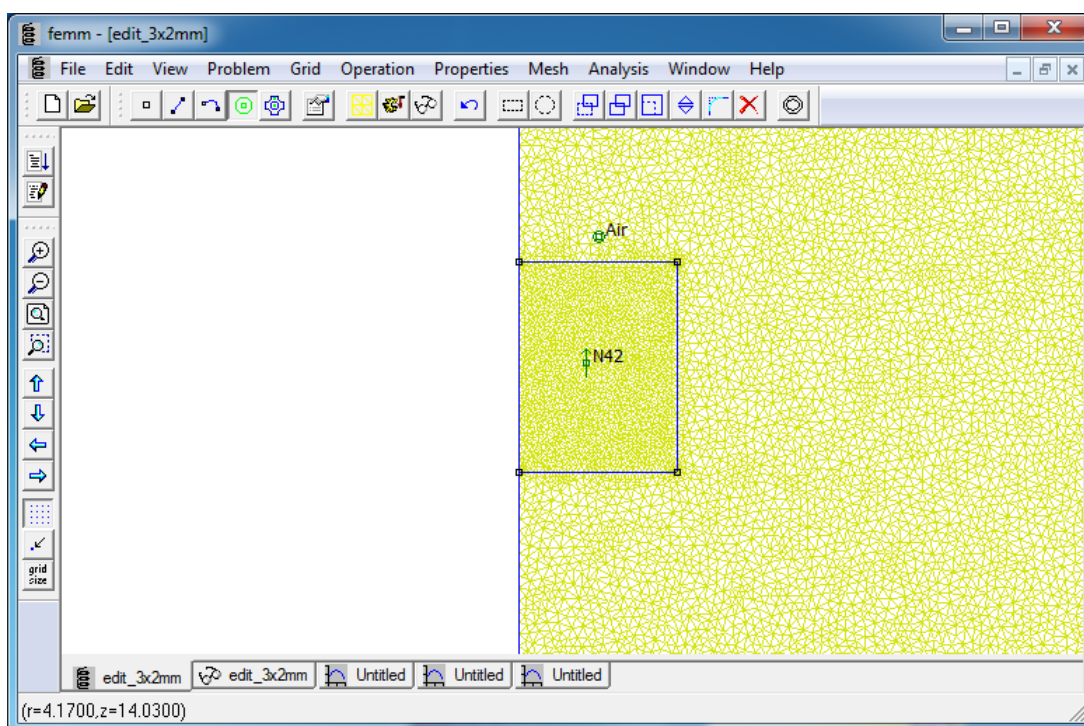


## 3 Simulování pole v okolí magnetů

Pro simulaci magnetického pole v okolí magnetu byly zvoleny dvě odlišné filozofie simulace ve dvou softwarových řešeních. Prvním programem je simulační program FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics). Dalším programem je Ansys Discovery AIM 2019 R3. Důvod použití dvou programů na simulování stejného problému je objasněn v následujícím textu. Pro všechny magnety simulované v této práci byly použity materiálové vlastnosti pro materiál N42 a N42H z následujícího zdroje [25].

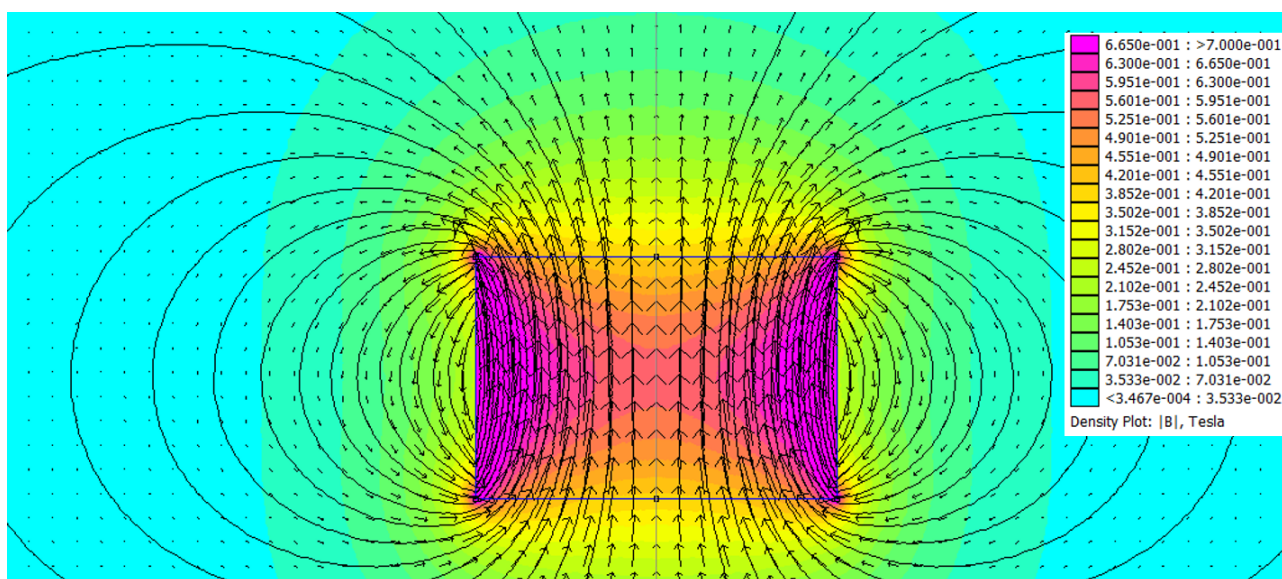
### 3.1 Simulační program FEMM

Jedná se o freeware, který simuluje metodou konečných prvků. Oblast, kde chceme zjišťovat rozložení magnetického pole se rozdělí na velké množství trojúhelníků, tedy jednoduchých geometrických útvarů, kde se řeší jednoduché diferenciální rovnice. Pokud je síť těchto oblastí dostatečně hustá, je řešení téměř totožné se skutečným řešením. Program tedy řeší relativně jednoduché výpočty, jichž je ale velké množství. Při modelování metodou konečných prvků je důležité vhodně zvolit síť prvků simulace a také nastavit okrajové podmínky u hranic zkoumaného prostředí, aby se zajistilo řešení problému.



Obr. 3.1: Prostředí programu FEMM s vykresleným rozložením oblasti na prvky a osově souměrnou geometrií magnetu 3x2,0 mm

Velkou výhodou tohoto nástroje je možnost simulace osově souměrného objektu. Tento přístup velmi sníží náročnost na výpočetní výkon oproti totožnému problému ve 3D. Výsledek simulace poté stačí zrcadlit podle osy  $y$ , počítá se tak navíc jen poloviční oblast. V programu je nutno definovat oblastem materiálové vlastnosti – velikost koerzivní síly magnetického materiálu a relativní permeabilitu. V případě simulace materiálu s nelineární BH křivkou (např.: Alnico magnety) je třeba definovat jednotlivé body BH křivky. Relativní permeabilitu materiálu určíme z normálové BH křivky v datasheetu výrobce. U NdFeB materiálu jde o hodnotu blízkou 1 (cca 1,05 – 1,1).



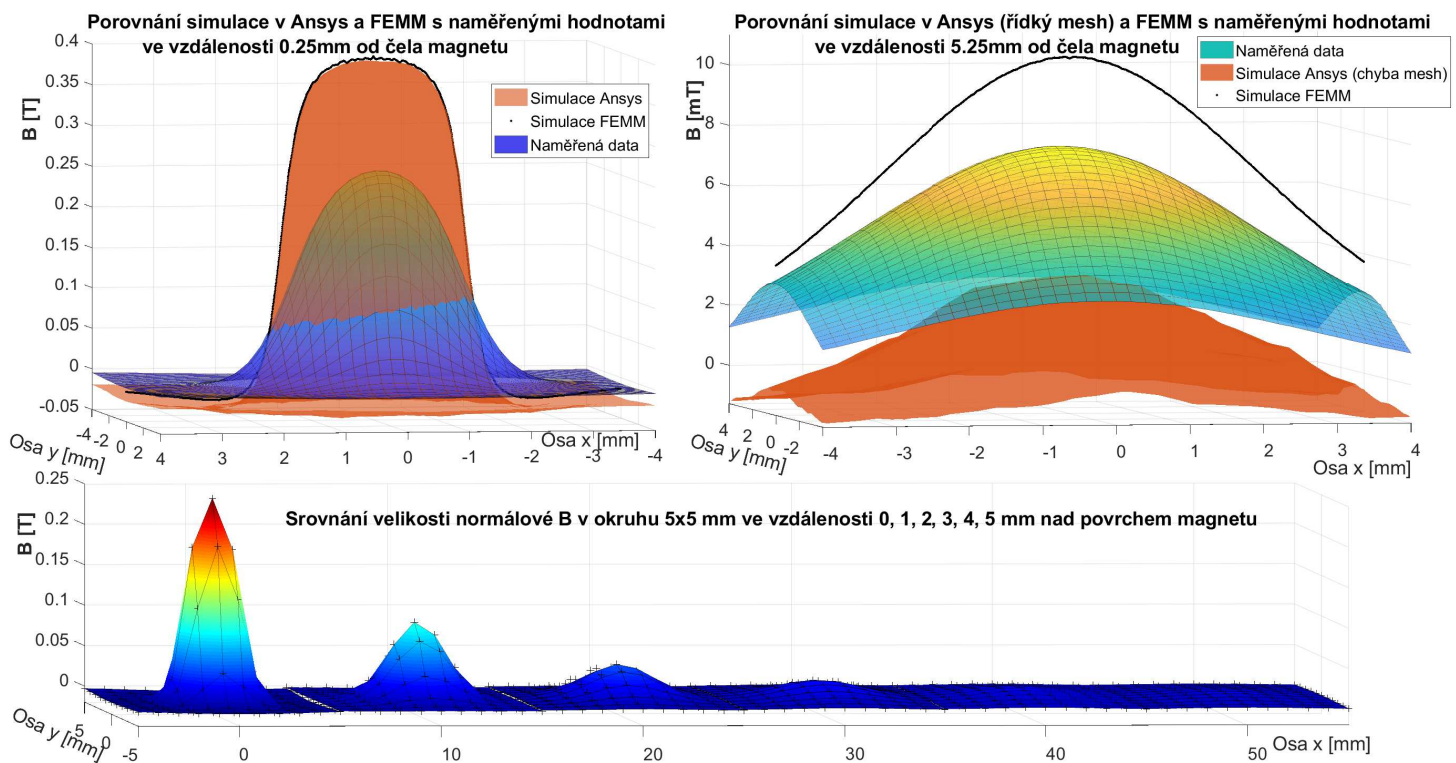
Obr. 3.2: Grafický výstup simulace ve FEMM (magnet 3x2 mm)

Po rozložení simulované oblasti na prvky a provedení výpočtu můžeme zobrazit hodnoty různých veličin popisující magnetické pole. Lze také graficky znázornit směr a velikost magnetické indukce pomocí vektorů, siločár či barevně, jak je vidět na obrázku 3.2. Jako výstup ze simulace bylo zvoleno vygenerování csv souboru s hodnotami normálové indukce podél úsečky o délce 5 mm a vzdálenosti 0,25 mm od čela magnetu a 5,25 mm od čela magnetu. Tato data byla následně zrcadlena a zpracována v programu MATLAB R2019a.

## 3.2 Simulační program Ansys AIM

Po prvním srovnání se hodnoty zjištěné v simulaci s naměřenými daty neshodovaly. Z počátku padlo podezření na chybnou simulaci v programu FEMM, k ověření výsledků bylo tedy nutno najít další dostupný simulační software. Další freeware, který

dosahuje kvality softwaru FEMM už dostupný nebyl, bylo tedy nutno vybírat mezi komerčními produkty. Jako vhodné nástroje se jeví Ansys a COMSOL Multiphysics. COMSOL bohužel nenabízel možnost přímého stažení studentské verze a jeho použití tak nebylo možné. Ansys nabízí licenci Academic volně ke stažení s omezením na 50000 útvarů simulační sítě (tetrahedrons – čtyřstěny) pro řešení magnetických problému. Jedno ze softwarových řešení od Ansys je produkt Ansys Discovery AIM 2019 R3, který má zabudovaný modul na 3D CAD. Discovery AIM používá standardní Ansys solvery, takže je zajištěna přesnost simulace. Software je navržen tak, aby zrychlil workflow od modelu k výsledku simulace. Po navržení geometrie a fyzikálním nastavení solveru lze výsledek simulace prohlížet a exportovat data z různých řezů objemy.



Obr. 3.3: Porovnání simulace a naměřených dat pro magnet 3x2 mm

V grafu 3.3 lze vidět všechna naměřená i simulovaná data pro rozměr magnetu 3x2,0 mm. Na levé straně je srovnání pro vzdálenost 0,25 mm od povrchu magnetu. Je vidět, že simulace v Ansys se téměř shoduje se simulací v programu FEMM, obě simulace ukazují větší hodnoty magnetické indukce oproti změřeným datům téměř nad celou zkoumanou oblastí, také strmost změn na okrajích magnetu je větší než hodnoty naměřené. To je pravděpodobně způsobeno tím, že měřící sonda průměruje přes určitou malou, ale konečnou plochu (výrobce udává kruh o průměru

0,4 mm), neměříme tedy intenzitu bodově, ale nad oblastí. Toto by nebyl problém v případě, že bychom měřili pole, která má v oblasti dané plochou senzoru konstantní hodnotu, což ale není případ miniaturních magnetů. V části grafu napravo jsou stejná data pro vzdálenost 5,25 mm od povrchu magnetu. Je zde vidět větší shoda simulace v programu FEMM s měřenými daty, pravděpodobně proto, že jsou změny velikosti magnetické indukce pole méně prudké a konečná velikost senzoru tedy nezpůsobuje takové problémy. Je zde také patrné, že data ze simulace v Ansys jsou chybná, projeví se zde nedostatečná hustota sítě čtyřstěnnů následkem omezení Academic licence. V případě korektní simulace v plné verzi programu by se simulace v Ansys také blížila simulaci v FEMM jako v levé části grafu. Grafy pro všechny magnety včetně řezů osou  $x=0$  mm lze nalézt v přílohách A začínajících na straně 59.

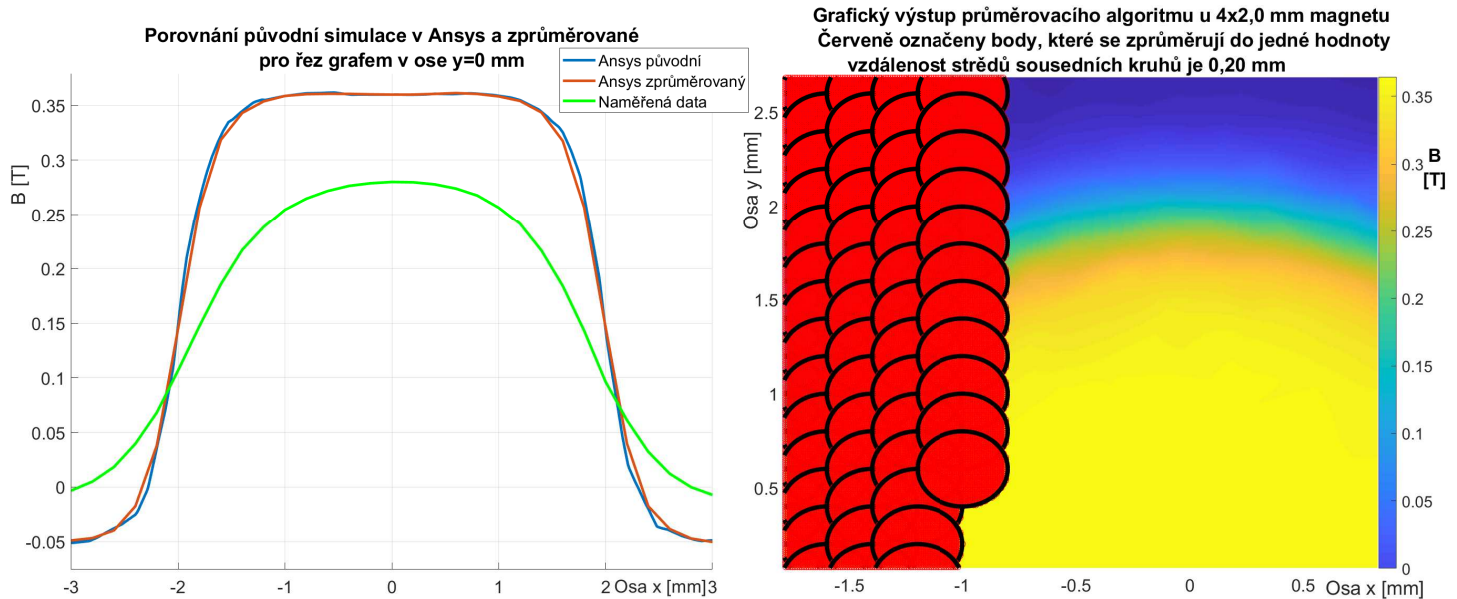
### 3.2.1 Vysvětlení chybného výsledku z Ansys ve větší vzdálenosti

Softwarové řešení Ansys Discovery AIM 2019 R3 neumožňuje simulaci osově souměrného 2D modelu, což způsobuje problémy především v kombinaci s omezením Academic licence. Data z tohoto programu jsou z důvodu licenčního omezení pro malé vzdálenosti od čela magnetu v pořádku, pro vzdálenost 5 mm už je ale síť čtyřstěnnů příliš řídká a data jsou nepřesná. Na vině ovšem není přímo software, ale hlavně nelogická volba simulovat jednoduchý osově symetrický problém v 3D prostoru, což celý výpočet zkomplikuje a zároveň zde není žádná přidaná hodnota, jelikož řešení 2D osově symetrické simulace lze jednoduše rozvinout do 3D prostoru. V případě použití Ansys bez licenčních omezení by došlo k neúměrným požadavkům softwaru na operační paměť při použití hustší sítě čtyřstěnnů. Pro uspokojivý výsledek simulací v komerčních programech by bylo vhodné opakovat simulaci v Ansys Maxwell bez licenčních omezení nebo v COMSOL Multiphysics jako 2D problém.

V případě jednoduché geometrie těchto magnetů se ale především velmi osvědčil software FEMM, který dává pro správné nastavení téměř totožné výsledky jako Ansys. Je ovšem mnohem méně náročný na velikost operační paměti a je rychlejší. Uživatelské prostředí je sice poněkud zastaralé, ale je funkční. Ansys Discovery AIM je velmi pomalý a často se stane, že software spadne při pouhém navigování v kontextovém menu. Pro simulování v Ansys Discovery AIM byly použity celkem 3 aktualizovaná vydání – verze R1 2019, verze R3 2019 a verze R1 2020. Ani nejnovější vydání nezlepšuje práci se softwarem. Z tohoto důvodu nelze tento software na modelování jednoduchého pole doporučit.

### 3.2.2 Zprůměrování dat ze simulace přes plochu senzoru

V datasheetu gaussmetru F.W. Bell 5080 je uvedeno, že aktivní část senzoru má průměr 0,4 mm. Skript v MATLABu zprůměruje data v bodech daných mřížkou měření (např. pro magnet 4x2,0 mm to jsou body (-5: 0,2: 5) mm v ose  $x$  a  $y$ ). Průměr hodnot se počítá přes kruhovou oblast o poloměru 0,2 mm, grafický výstup z algoritmu je na grafu 3.4 napravo. Jde o prostý aritmetický průměr. Výstupem ze skriptu je matice se zprůměrovanými hodnotami, která odpovídá rozměry matici hodnot změřené pomocí gaussmetru F. W. Bell 5080. Kód je v přílohách A.1.



Obr. 3.4: Výstup algoritmu pro průměrování oblasti pro magnet 4x2 mm

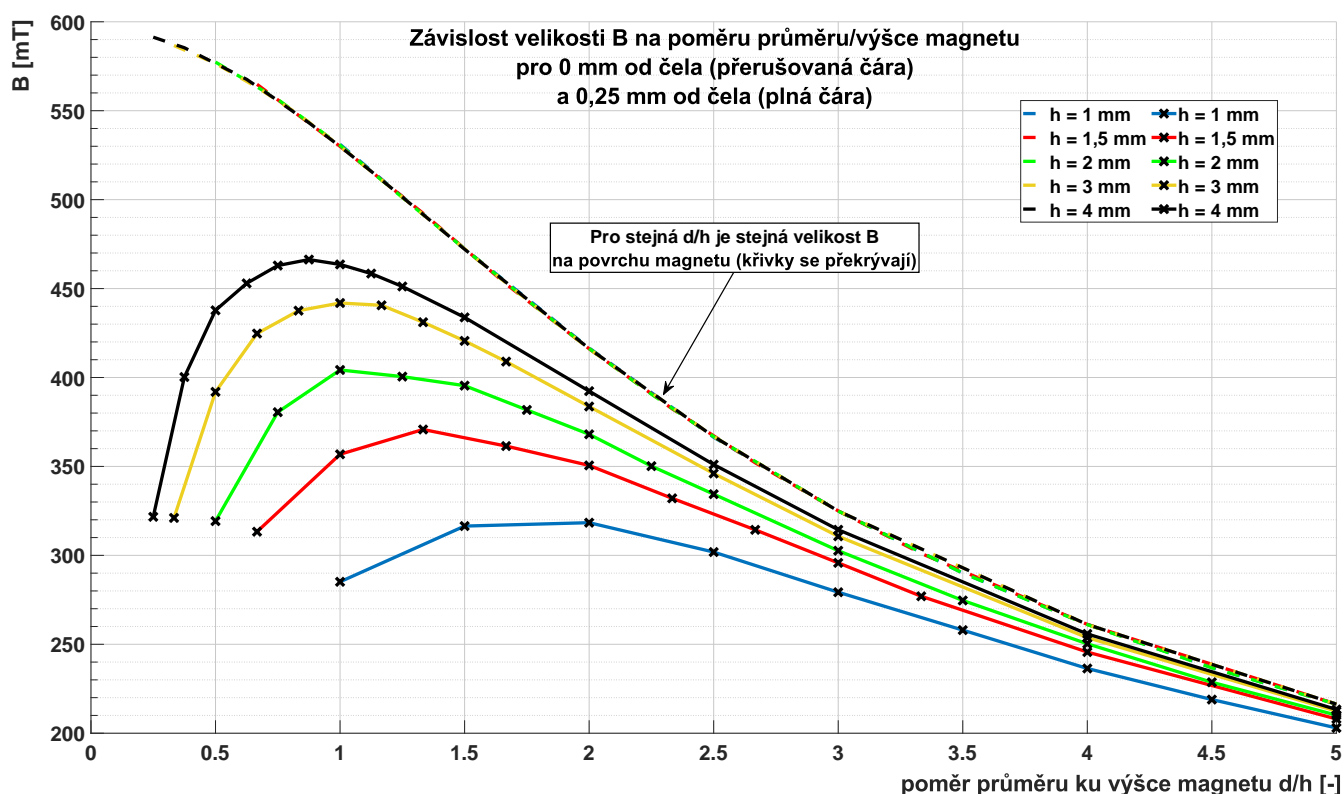
V pravé části grafu je vidět postup algoritmu přes původní data ze simulace. Plochu senzoru znázorňuje černý kroužek, data, která se zprůměrují do jedné hodnoty jsou označena červeně. Graf je vybarven barvou od modré do žluté, kdy barva odpovídá velikosti magnetické indukce v daném bodě podle colorbaru úplně napravo. Na levém grafu je řez pro  $y=0$  mm. Je vidět, že průměrování hodnot ze simulace pro tento rozměr magnetu téměř nezmění rozložení magnetické indukce. O něco více je patrná změna pro magnet 1x1,0 mm, jelikož zde je peak magnetické indukce vzhledem k velikosti aktivní oblasti senzoru relativně úzký. Tento graf je v příloze na obrázku A.13. Z grafů 3.4 a A.13 vyplývá, že primárním důvodem neshody simulace a naměřených zřejmě není velikost aktivní oblasti senzoru. Vzhledem k tomu, že výsledky simulace vyšly stejné pro dva různé simulační softwary, chyba z důvodu špatné simulace je málo pravděpodobná.



## 4 Závislost magnetické indukce na rozměrech magnetů

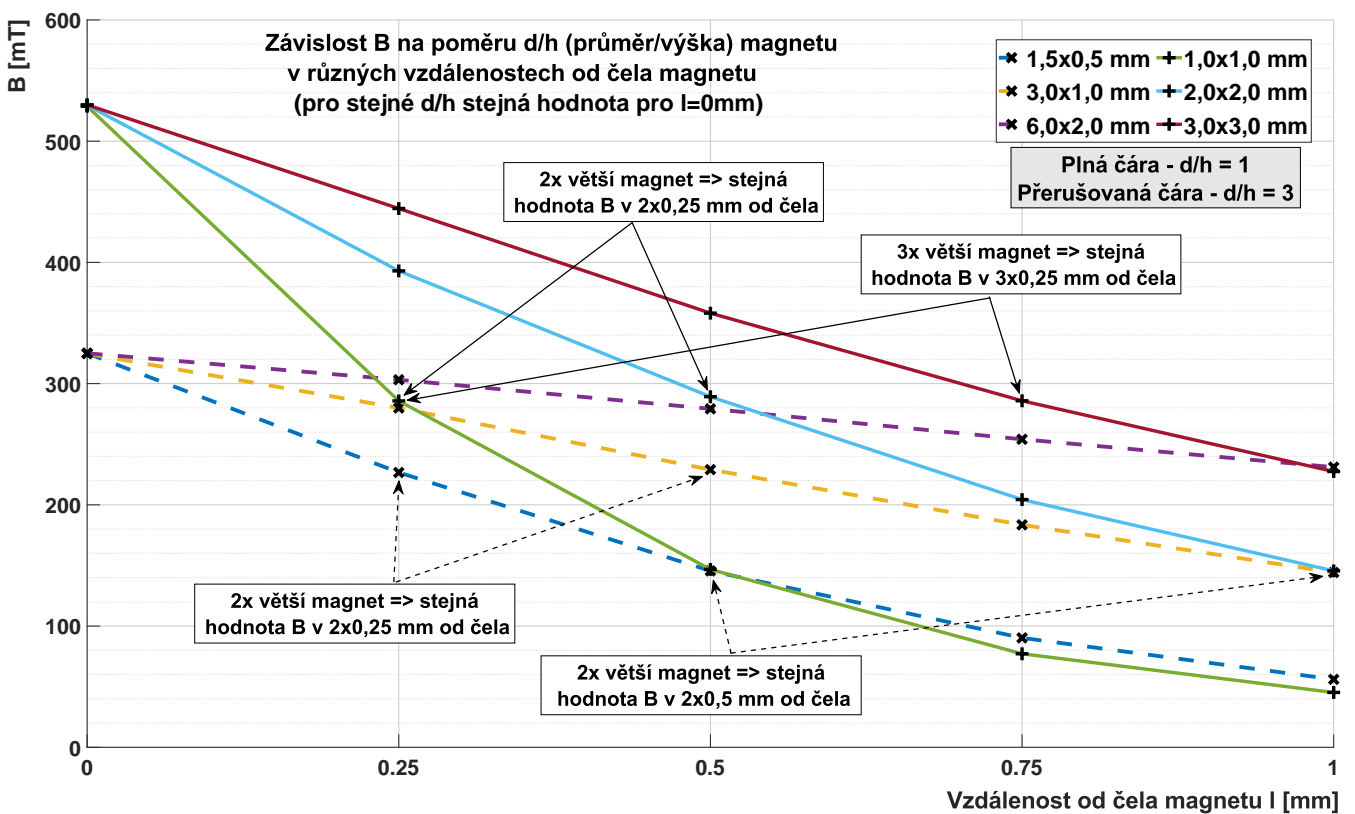
Dá se předpokládat, že velikost normálové složky magnetické indukce je nějakým způsobem závislá na rozměrech magnetů. Jako intuitivní by se zprvu mohlo zdát, že velikost magnetické indukce bude růst s objemem magnetu. Z orientačního měření velikosti magnetické indukce nad povrchem magnetu ale vyplývá, že například magnet 3x2 mm má větší hodnotu magnetické indukce na povrchu než magnet 4x1,5 mm, a to i přes to, že má menší objem magnetického materiálu. Za účelem prozkoumání závislosti velikosti magnetické indukce magnetu na jeho rozměrech byla provedena simulace magnetů s různými rozměry a byly vytvořeny grafy závislostí.

Předpokládaná byla určitá závislost velikosti  $B_n$  na objemu magnetu, výšce magnetu a průměru magnetu. Pro demonstraci byla zkoumána velikost  $B_n$  i ve vzdálenosti 0 mm nad povrchem magnetů, i když je měření v této vzdálenosti reálným senzorem nemožné. Dalším bodem měření byla poté vzdálenost 0,25 mm nad čelem magnetu. Data získaná simulací byla zpracována v programu MATLAB 2019b a vynesena do grafů.



Obr. 4.1: Závislost  $B_n$  na  $d/h$  pro 0 a 0,25 mm od čela magnetu

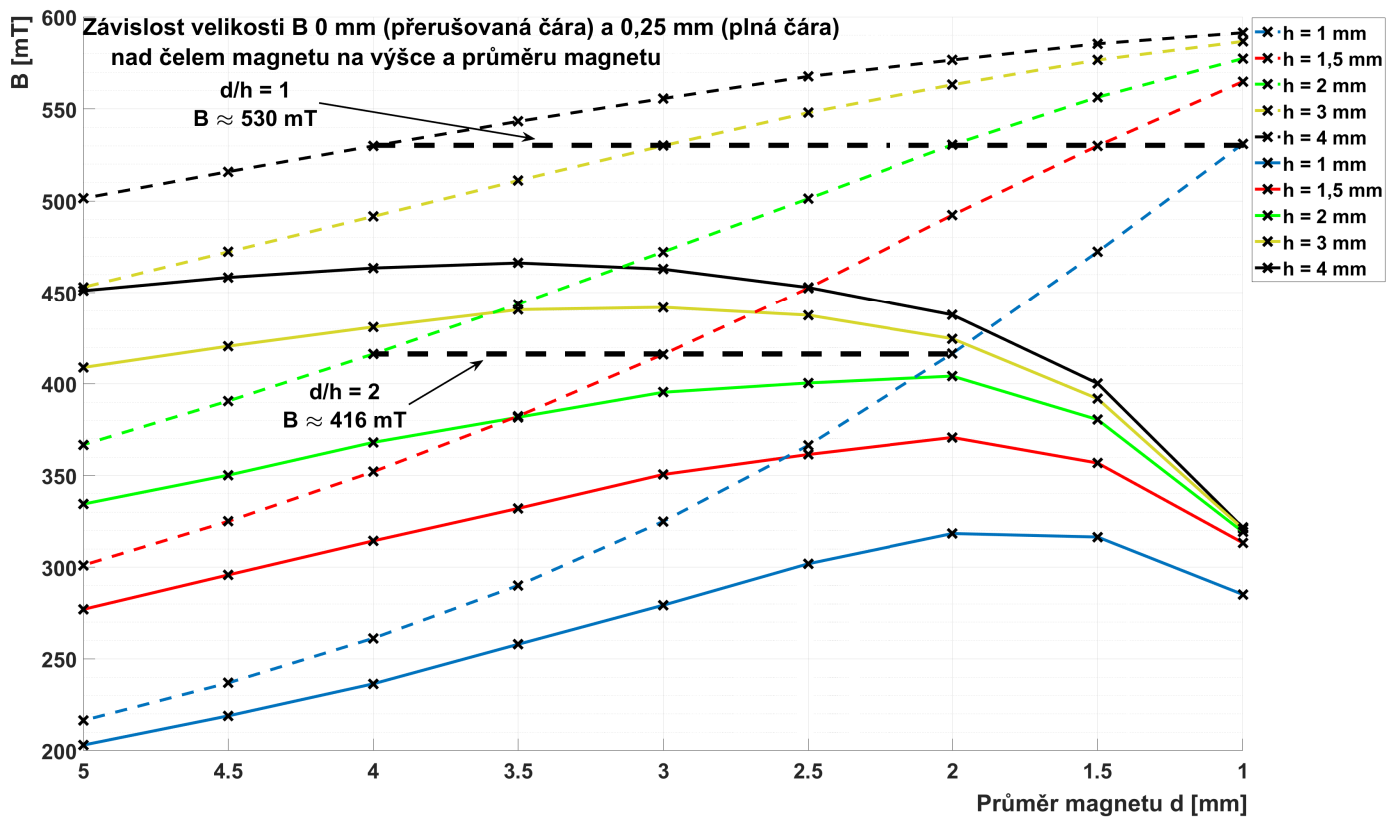
Jako nejzajímavější se jeví závislost velikosti  $B_n$  na poměru průměru ku výšce magnetu (poměr  $d/h$ ). Z grafu 4.1 vyplývá, že velikost  $B_n$  ve vzdálenosti 0 mm nad povrchem magnetu je závislá právě jen na poměru  $d/h$ . Menší poměr  $d/h$  tedy znamená větší velikost povrchové  $B_n$  v ose magnetu (z pohledu rozměrů jde tedy o vyšší magnet s malým průměrem). Při zvětšování vzdálenosti od čela magnetu je dále už velikost  $B_n$  závislá i na konkrétní velikosti magnetu. Křivky vykreslené plnou čarou jsou naměřené ve vzdálenosti 0,25 mm od čela magnetu. Se zmenšujícím se  $d/h$  je nejdříve pozorovatelný růst  $B_n$ , od určité hodnoty  $d/h$  ale začne křivka klesat. Tento fakt nevyovídá až tak moc o magnetech jako spíše o způsobu sběru dat. Zmenšování  $d/h$  totiž bylo při konstantní výšce magnetu dosaženo zmenšováním průměru. Tímto se zmenšuje i celková velikost magnetu, kvůli čemuž i mnohem rychleji klesá velikost  $B_n$  se zvyšující se vzdáleností od čela magnetu.



Obr. 4.2: Závislost  $B_n$  na  $d/h$  a vzdálenosti od čela magnetu

Zajímavým zjištěním vyplývajícím ze simulace je skutečnost, že magnety se stejným  $d/h$  mají podobné rozložení magnetického pole. Pokud tedy známe velikost magnetického pole v určité vzdálenosti od čela u jednoho magnetu, můžeme určit vzdálenost, ve které stejné pole naměříme u většího magnetu se stejným  $d/h$ . Tato vzdálenost je rovna násobku původní vzdálenosti číslem, které odpovídá zvětšení

magnetu. Tato skutečnost je patrná z grafu 4.2. Jsou zde zobrazeny závislosti  $B_n$  na vzdálenosti od čela pro magnety s  $d/h = 1$  (plnou čarou) a  $d/h = 3$  (přerušovanou čarou). Od každého  $d/h$  jsou simulovány 3 rozměry magnetu. Například pro magnet  $1 \times 1$  mm naměříme hodnotu  $B_n \approx 290$  mT  $0,25$  mm od čela magnetu, pro magnet  $3 \times 3$  mm (3x větší rozměry při stejném  $d/h$ ) naměříme stejnou hodnotu  $B_n$  ve vzdálenosti  $3 \times 0,25$  mm =  $0,75$  mm od čela magnetu. Zároveň je na tomto grafu platné i zjištění z předešlého grafu 4.1, a to sice, že pro vzdálenost 0 mm od čela magnetu je velikost povrchové magnetické indukce pro stejný poměr  $d/h$  totožná bez závislosti na rozměrech magnetu.



Obr. 4.3: Závislost  $B_n$  na průměru magnetu

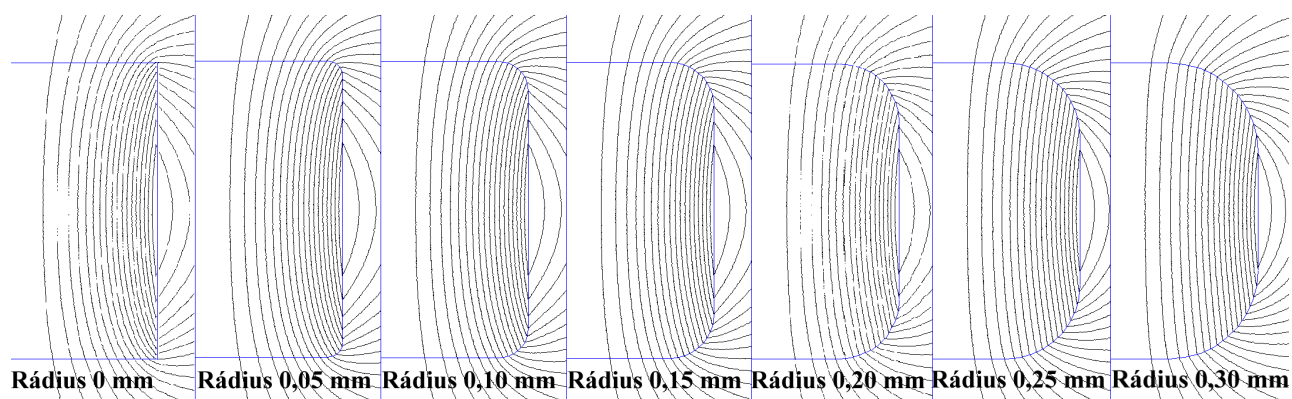
Graf 4.3 poté zobrazuje podobnou situaci, pro 0 mm od čela magnetu (přerušovaná čára) a  $0,25$  mm od čela magnetu (plná čára). Zde při konstantní výšce magnetu zmenšujeme průměr, dochází tedy ke zmenšování  $d/h$  a tím pádem ke zvyšování  $B_n$  na povrchu magnetu.

Výsledky simulace výše souhlasí s teorií uvedenou v podkapitole 1.2. Magnet s větším poměrem  $d/h$  má větší demagnetizační faktor  $N$ , následkem tohoto má zátěžová přímka více zápornou směrnici a pro magnet ve volném prostoru tak vytváří pracovní bod s nižší hodnotou  $B_d$ .



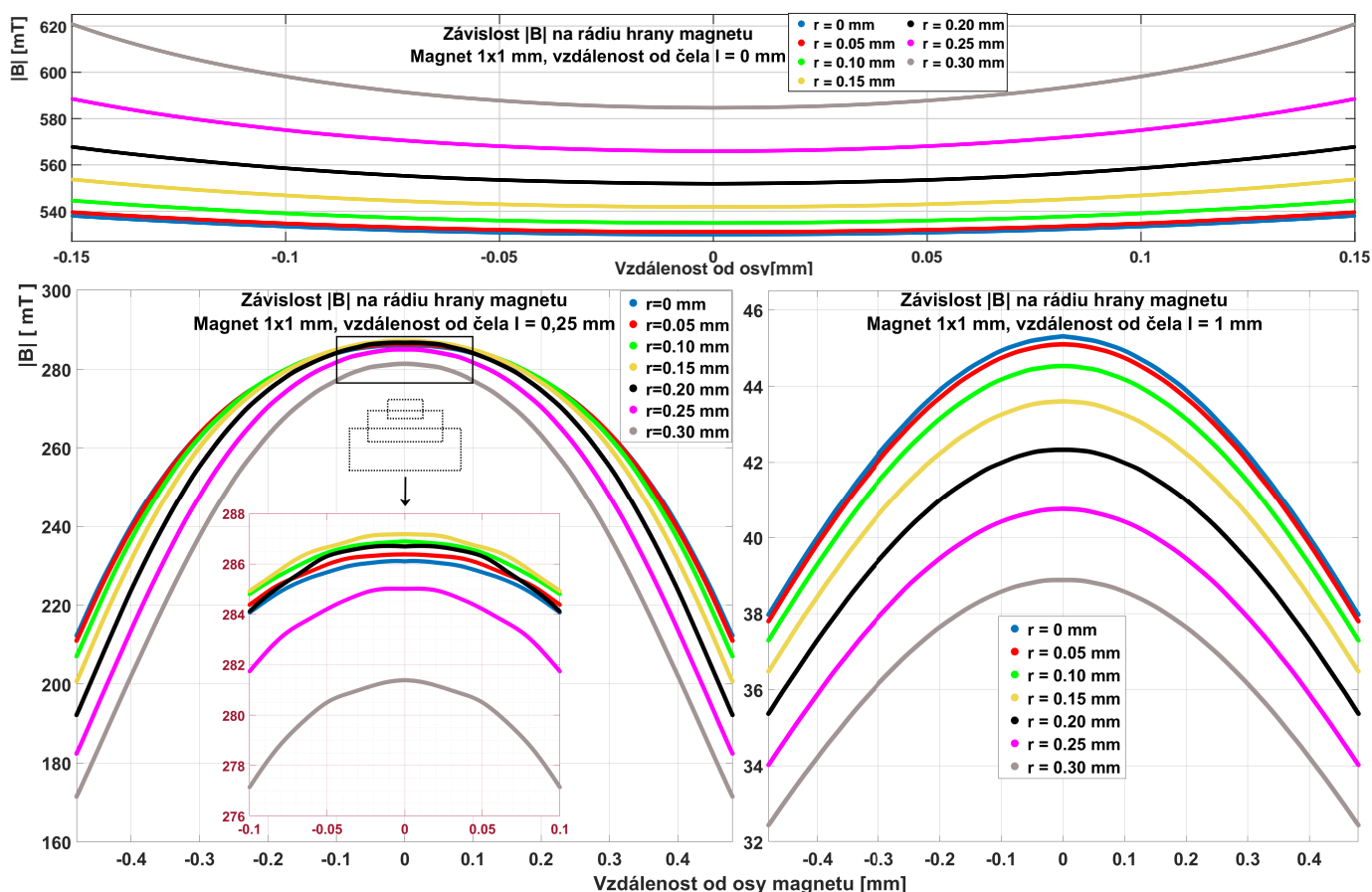
## 4.1 Rádus hrany magnetu

Cylindrické neodymové magnety mají standardně zkosené hrany. Jedná se o vhodnou povrchovou úpravu, jelikož zmenšuje šanci, že magnet něco poškrábe a také se zmenší pravděpodobnost, že se roh magnetu ulomí, jelikož se jedná o relativně křehký materiál. Výrobce magnetů, které jsou měřeny v této práci hodnotu rádia u jednotlivých velikostí magnetů neudává. Pro představu vlivu rádia na velikost magnetické indukce a na rozložení pole v rámci okolí magnetu byly simulovány různé hodnoty zaoblení hran. Hodnoty rádií porovnávaných v následujícím grafu lze vyčíst z obrázku 4.4. Jedná se o polovinu řezu objemem magnetu 1x1 mm z grafického výstupu simulačního programu FEMM 4.2. Z obrázku je patrné, že rádies  $>0,15$  mm jsou pro tento rozměr cylindrického magnetu moc velké, jde spíše o demonstraci vlivu v simulaci.



Obr. 4.4: Rozdílné nastavení zaoblení hran pro magnet 1x1 mm

V grafech srovnání je vynesena velikost  $\mathbf{B}$  v okolí magnetu. Křivky byly vyhlazeny plovoucím oknem přes 300 vzorků metodou *gaussian* (průměr vážený Gaussovým rozložením). Zprůměrování touto metodou dávalo nejlepší výsledky a lze si ho vzhledem ke skutečnému tvaru křivky dovolit, jelikož se jednotlivé body získané simulací v tomto okně příliš rychle nemění. Průměrování bylo provedeno z důvodu zpřehlednění zobrazovaných křivek. Při velkém zvětšení grafu byla totiž data kostrbatá následkem nedostatečné hustoty sítě prvků v simulaci.



Obr. 4.5: Závislost velikosti  $B$  na rádiu hrany pro magnet 1x1 mm, simulace

Graf 4.5 zobrazuje v horní části závislost pro vzdálenost 0 mm od čela, v dolní levé části pro 0,25 mm od čela a v dolní pravé části 1 mm od čela magnetu. Jedná se o řez hodnotami pole vedený středem magnetu, kdy vzdálenost na ose  $x$  udává vzdálenost od osy magnetu. U grafu v levé dolní části je pro přehlednost zvětšena oblast kolem vrcholu křivky. Pro vzdálenost 0 mm od čela magnetu platí, že největší velikosti magnetické indukce dosahuje magnet s největším rádiem, hodnota velikosti  $B$  se postupně zmenšuje se zmenšováním rádia až po nejmenší hodnotu u nulového zaoblení hran. Se zvětšující se vzdáleností od povrchu magnetu se poté postupně posouvá magnet s největším rádiem níže v grafu, pro vzdálenost 1 mm od čela magnetu je poté už velikost magnetické indukce pro největší rádius nejmenší a pro nulový rádius je maximální.

Ze srovnání tedy vyplývá, že nezáleží pouze na velikosti zaoblení hrany magnetu, ale také na vzdálenosti, v jaké pole zkoumáme. V dostatečné vzdálenosti od povrchu se poté zmenšení množství magnetického materiálu následkem zaoblení hran projeví už očekávaným jevem, tedy dojde k zmenšení velikosti magnetické pole u největšího zaoblení oproti menšímu zaoblení.

## 4.2 Povrchová úprava NdFeB

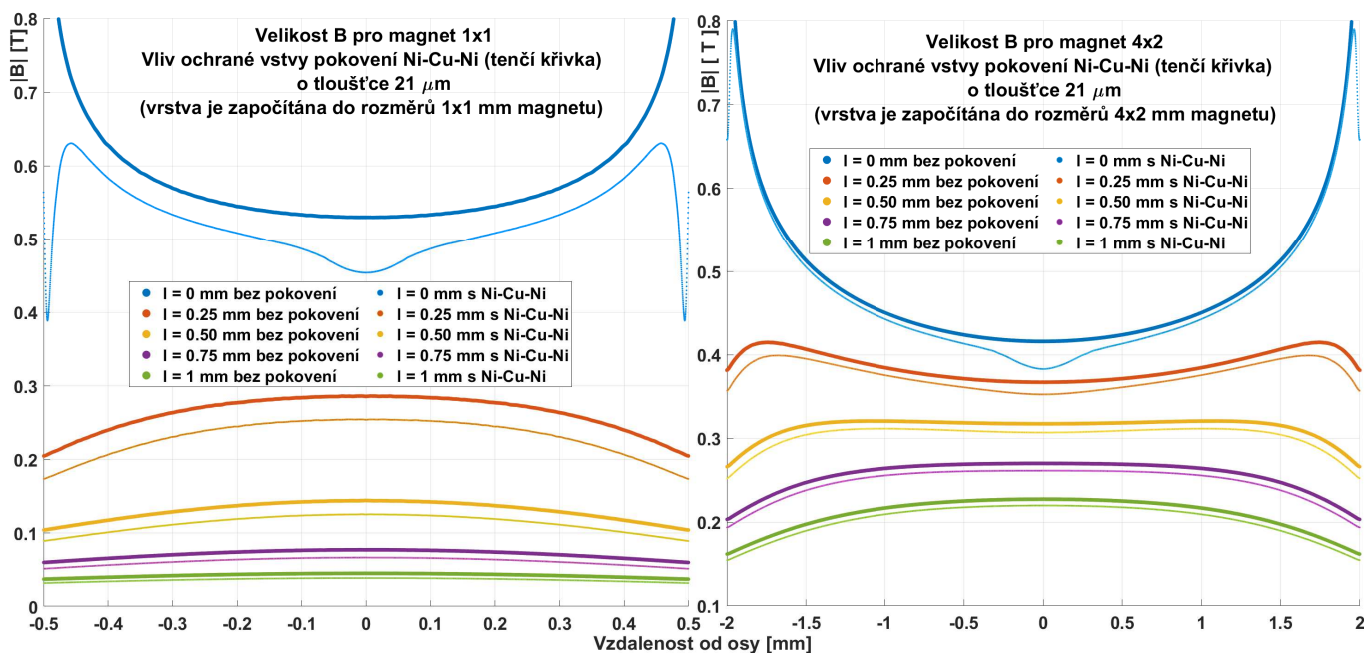
Samotný magnetický materiál je velmi náchylný ke korozi [22]. K zajištění ochrany materiálu je prakticky nutnost nanést na povrch ochranou vrstvu. Pro magnety menších rozměrů srovnatelných s rozměrem magnetů zkoumaných v této práci je předpokládán určitý dopad tohoto pokovení na velikost magnetické indukce magnetu. Za účelem ověření tohoto předpokladu je tedy provedena simulace magnetu 1x1 mm a 4x2 mm pro různé vzdálenosti od povrchu magnetu.

Materiál ochranné vrstvy je zvolen podle určení magnetu, standardně se jedná o trojvrstvé pokovení Ni-Cu-Ni, pro aplikace vyžadující zvýšenou odolnost (např. kulový magnet) se poté přidá ještě vrstva Cr. Pro specifické aplikace se přidává vrstva polymeru. V této podkapitole je testována pouze trojvrstva Ni-Cu-Ni. Vnitřní vrstva niklu je tenčí, slouží k lepšímu přilnutí následné vrstvy mědi k magnetu. Měď slouží k celkovému zvětšení tloušťky ochranné vrstvy magnetu [26]. Měď má díky relativní permeabilitě blízké 1 pro neměnná magnetická pole téměř stejné vlastnosti jako vzduchová mezera stejné tloušťky. Povrchová vrstva niklu poté slouží jako ochrana před korozi a také jde o tvrdší kov než měď, je tedy odolnější proti otěru a tlaku.

Tloušťku jednotlivých vrstev je zřejmě relativně těžké kontrolovat nebo se liší podle technologie či není dokonale rovnoměrná, jelikož výrobci magnetů uvádějí pouze určitý interval hodnot, tradičně je uváděna tloušťka trojvrstvy jako 15-21  $\mu\text{m}$  [25]. Výrobce magnetů [26] uvádí tloušťku vnitřní vrstvy niklu na 4-5  $\mu\text{m}$ , tloušťku vnější vrstvy niklu poté na 8-10  $\mu\text{m}$ . Z těchto informací vyplývá, že tloušťka měděné vrstvy je zhruba 6-9  $\mu\text{m}$ .

Pro účely demonstrace je brána tloušťka pokovení v simulaci jako 21  $\mu\text{m}$ . V simulaci je tak nastavena spodní vrstva niklu o tloušťce 5  $\mu\text{m}$ , vrstva mědi o tloušťce 6  $\mu\text{m}$  a vrchní vrstva niklu o tloušťce 10  $\mu\text{m}$ , je také předpokládáno dokonale rovnoměrné pokovení materiálu. Z údajů od výrobců není zcela zřejmé, zda je rozměr magnetů v datasheetech udáván včetně pokovení, nebo před pokovením. V případě situace, kdy je rozměr stanovený až po pokovením bude samotného magnetického materiálu méně o tloušťku ochranné vrstvy, po pokovení by tak měl magnet přesně rozměry dané výrobcem. Například pokud má cylindrický magnet pokovený 21  $\mu\text{m}$  vrstvou výšku 1000  $\mu\text{m}$ , před pokovením by měl cylinder výšku 958  $\mu\text{m}$ .

Druhou možností je, že se magnetický materiál vytvoří na rozměry udávané výrobcem a až poté se pokoví. V tomto případě by měl nepokovený cylinder výšku 1000  $\mu\text{m}$ , po pokovení 21  $\mu\text{m}$  vrstvou pak 1042  $\mu\text{m}$ . Je předpokládáno, že rozdíly mezi těmito dvěma možnostmi budou největší právě pro nejmenší vzorky magnetů.



Obr. 4.6: Srovnání vlivu vrstvy pokovení pro magnety 1x1 mm a 4x2 mm

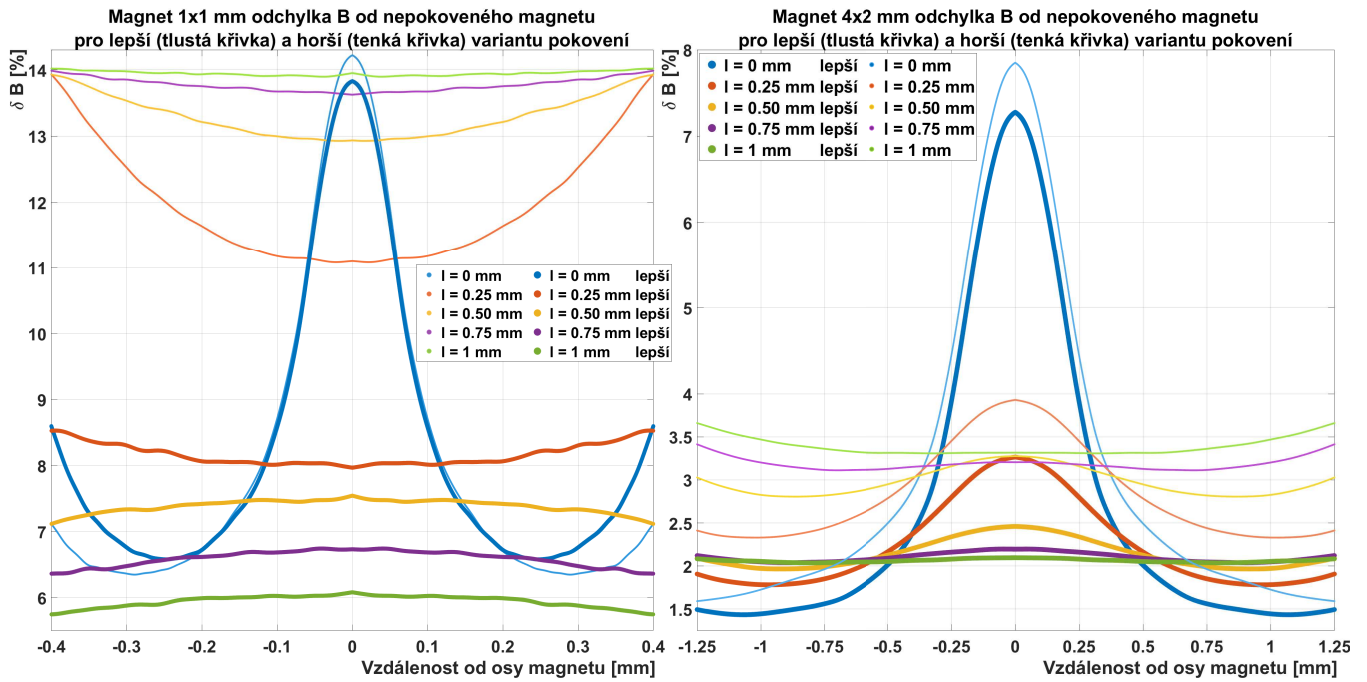
Na grafu 4.6 je vidět srovnání horší varianty pokovení (vrstva pokovení je započítána do celkových rozměrů magnetů) pro magnety 1x1 mm a 4x2 mm s nepokovenými modely těchto magnetů. Graf pro výhodnější variantu (vrstva pokovení je nanášena navíc k rozměru magnetu) je pro úsporu místa umístěn v příloze A.14.

Pro číselné srovnání dvou variant slouží tabulka, kde je srovnán rozdíl mezi oběma variantami jako relativní odchylka velikosti  $\mathbf{B}$ . Tato odchylka je vynesena pro různé vzdálenosti  $l$  od čela magnetu a je měřena v ose magnetu.

Tab. 4.1: Srovnání lepší a horší varianty pokovení magnetů

1x1 mm	$l = 0$ mm	$l = 0,25$ mm	$l = 0,5$ mm	$l = 0,75$ mm	$l = 1$ mm
$\Delta  \mathbf{B} $ dvou variant [mT]	-2,342	-10,019	-7,924	-5,159	-3,562
$\delta  \mathbf{B} $ dvou variant [%]	-0,513	-3,800	-5,958	-7,162	-8,381
4x2 mm	$l = 0$ mm	$l = 0,25$ mm	$l = 0,5$ mm	$l = 0,75$ mm	$l = 1$ mm
$\Delta  \mathbf{B} $ dvou variant [mT]	-2,373	-2,396	-2,776	-2,643	-2,668
$\delta  \mathbf{B} $ dvou variant [%]	-0,616	-0,675	-0,896	-1,000	-1,198

Z hodnot v grafu 4.6 a tabulky 4.1 je patrné, že tloušťka vrstvy pokovení má negativní vliv na hodnotu magnetické indukce na povrchu magnetu. Je také zřejmé, že u menšího magnetu 1x1 mm je rozdíl mezi horší a lepší variantou větší než u magnetu 4x2 mm.



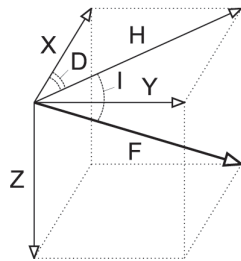
Obr. 4.7: Odchylka od nepokoveného magnetu pro magnety 1x1 mm a 4x2 mm

Graf 4.7 zobrazuje odchylku  $|\mathbf{B}|$  obou variant od magnetu bez pokovení v závislosti na vzdálenosti od osy magnetu. Je vidět, že pro menší magnet 1x1 mm se pohybuje odchylka  $|\mathbf{B}|$  v rámci rozměrů magnetu se zanedbáním jevu u hran magnetu od cca 6 do 14 % pro obě varianty pokovení. Pro magnet 4x2 mm se odchylka  $|\mathbf{B}|$  od nepokoveného magnetu pohybuje od cca 1,5 do 8 %. Při porovnání obou grafů je vidět jev zmiňovaný výše, a sice že pro menší magnet 1x1 mm je rozdíl mezi lepší a horší variantou pokovení větší než pro magnet 4x2 mm. Křivky odchylek jsou vyhlazeny pro lepší přehlednost. Odchylky jsou samozřejmě záporné (pokovené magnety dosahovaly menších hodnot  $|\mathbf{B}|$  než nepokovené), pro přehlednost je ovšem vykreslena jejich absolutní hodnota.

V případě rozměrů magnetů je problematická také udávaná tolerance rozměrů magnetu, protože ta je standardně  $\pm 0,1$  mm [25]. Pro velké magnety to může být dostačující, ale pro miniaturní magnety se jedná o relativně velkou odchylku od udávané hodnoty, která bude mít na velikost magnetické indukce magnetu větší vliv než tenká vrstva pokovení.

### 4.3 Minimalizace vlivu magnetického pole Země

Při měření malých magnetických polí magnetů je nutno počítat i se sčítáním jednotlivých složek magnetického pole Země s polem magnetu. Magnetické pole Země lze rozdělit do tří základních složek. Vektorem  $\mathbf{X}$  se označuje komponent magnetického pole směřující na geografický sever, vektorem  $\mathbf{Y}$  se označuje složka směřující na východ, vektorem  $\mathbf{Z}$  se označuje složka směřující do středu Země a složka  $\mathbf{F}$  je poté celková velikost magnetického pole a je dána součtem tří složek uvedených výše. Dalším důležitým parametrem magnetického pole Země je úhel mezi složkou pole  $\mathbf{X}$  a složkou pole  $\mathbf{H}$  (součet složek  $\mathbf{X}$  a  $\mathbf{Y}$ ), který se nazývá deklinace a udává zkreslení měřené hodnoty od skutečného geografického severu. Pro přehlednost jsou jednotlivé složky magnetického pole Země znázorněny na obrázku 4.3.



Obr. 4.8: Jednotlivé složky magnetického pole Země [23], upraveno

Velikosti jednotlivých složek se liší v závislosti na poloze na Zemi, a navíc jsou hodnoty časově proměnné. Pro Brno lze z [24] vyčíst hodnoty uvedeny v tabulce 4.2.

Tab. 4.2: Hodnoty jednotlivých složek magnetického pole pro Brno dne 11. 3. 2020

Složka pole	$\mathbf{X}$	$\mathbf{Y}$	$\mathbf{Z}$	$\mathbf{F}$	D	I
Velikost $\mathbf{B}$ [ $\mu\text{T}$ ]    Úhel [ $^\circ$ ]	$\approx 20$	$\approx 1,5$	$\approx 45$	$\approx 49,2$	$\approx 4,5$	$\approx 66$

Vzhledem k velikosti magnetického pole, které dosahují magnety miniaturních rozměrů se magnetické pole Země projeví na výsledku měření, je tedy potřeba nějakým způsobem potlačit jeho vliv. Jednou z možností by bylo využít znalost magnetického pole Země v místě, kde probíhá měření a toto pole odečíst od měřených hodnot. Tento přístup by ale fungoval pouze za předpokladu, že je sonda stacionární a perfektně orientovaná. Dalším problémem tohoto přístupu je, že magnetické pole uvnitř budov nemusí mít kvůli železné konstrukci takové hodnoty, jako lze vyčíst z [24], jelikož feromagnetické objekty zakříví magnetické pole. Jistým způsobem, jak tento fakt obejít je vždy před začátkem měření uložit hodnoty z magnetometrů bez přítomnosti měřeného objektu a tento offset poté odečíst při měření pole. Tento

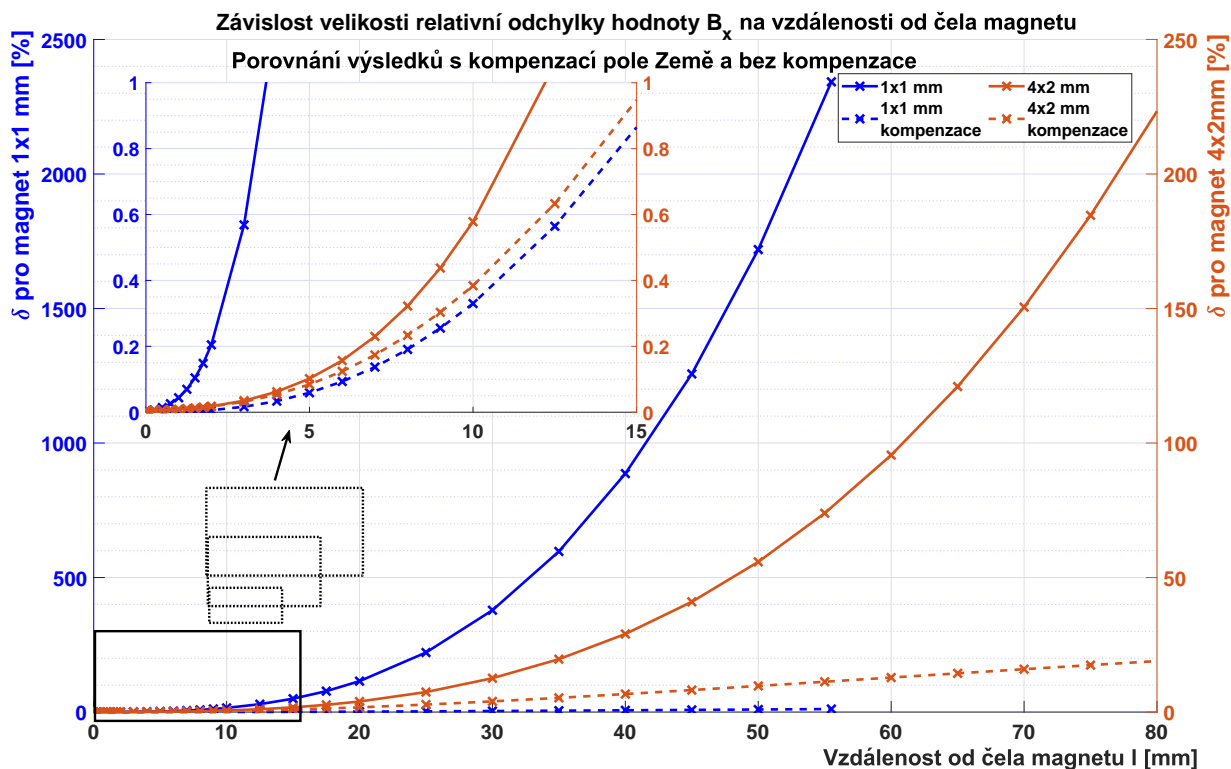
postup by fungoval pouze za předpokladu, že sonda bude naprosto stacionární. Pokud by toto nebylo dodrženo, způsobil by odečítaný offset znehodnocení výsledku, po každém pohybu sondy mimo pohybu po rovině, na které došlo k původnímu měření rušivého pole by muselo být provedeno nové měření rušivého pole bez přítomnosti měřeného objektu.

Jako flexibilnější řešení tohoto problému se jeví umístění druhého stejného senzoru na stejnou rovinu jako senzor, kterým měříme magnetické pole magnetů. Tento kompenzační senzor je nutno umístit v takové vzdálenosti od měřícího senzoru, aby zde už byla velikost magnetického pole magnetu zanedbatelná vzhledem k magnetickému poli Země. Reálně je limitujícím faktorem vzdálenosti senzorů fyzický rozměr měřící sondy a také velikost magnetu, pro který sondu navrhujeme. Data v grafech jsou získána z modelové situace, kdy je senzor umístěn na DPS, která je zafixována ve vodorovné poloze a citlivá osa  $x$  senzoru směřuje na sever. Měřený cylindrický magnet je upevněn na polohovací zařízení tak, že osou také směřuje na sever. Při tomto uspořádání pak měří senzor normálovou hodnotu  $B_n$  magnetu pomocí citlivého elementu osy  $x$  a tečnou hodnotu  $B_t$  pomocí citlivého elementu osy  $y$ . V simulaci byla při získávání dat z osy  $y$  sonda vyosená o 0,5 mm od osy magnetu.

Pro sondu navrhovanou v této práci bylo umístění magnetometrů simulováno s magnetem 1x1 mm NdFeB N42. Podmínkou bylo, že magnetické pole magnetu měřené v oblasti kompenzačního senzoru musí být menší než 10 % magnetického pole Země. Jako kompromis mezi dostatečně malou chybou způsobenou přičítáním pole magnetu k poli Země u kompenzačního senzoru a fyzickými rozměry sondy byla zvolena vzdálenost 60 mm kompenzačního senzoru od senzoru měřícího. Měřící senzor je při simulaci umístěný do vzdálenosti 5,236 mm (zde je maximální měřitelná hodnota  $B_n$  pro zvolený senzor) od čela magnetu, kompenzační senzor je tedy 65,236 mm od čela magnetu. V této vzdálenosti je velikost  $B_n$  magnetu v ose  $x$  0,68  $\mu\text{T}$ , pokud je sonda namířena na sever, velikost magnetického pole Země je v této ose 20  $\mu\text{T}$ , jde tedy o 3,4 % z pole Země. Z tabulky 4.3 vyplývá, že pro vzdálenost  $l > \approx 40$  mm je nekompensované měření znehodnoceno magnetickým polem Země.

Tab. 4.3: Vybrané hodnoty z grafu 4.9 pro magnet 1x1 mm a 4x2 mm

Vzdálenost $l$ [mm]	$\delta_{1x1}$ [%] bez komp.	$\delta_{1x1}$ [%] s komp.	$\delta_{4x2}$ [%] bez komp.	$\delta_{4x2}$ [%] s komp.
0,5	0,014	0,0005	0,0063	0,0065
5	2,22	0,059	0,10	0,08
10	15,43	0,33	0,58	0,38
15	49,66	0,86	1,75	0,95
20	114,92	1,65	3,93	1,76
30	378,56	3,83	12,58	3,97
40	886,43	6,55	29,02	6,70
55,5	2342,63	11,25	75,92	11,42



Obr. 4.9: Relativní chyba měření způsobená polem Země pro osu  $x$  magnetometru

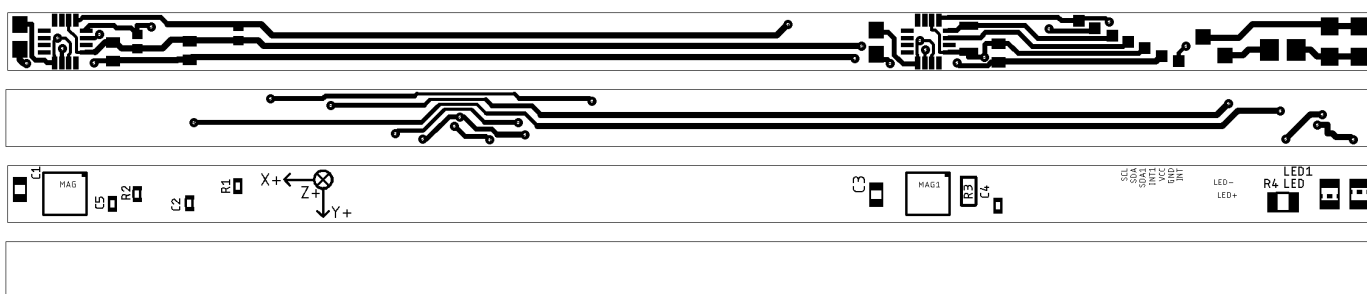
V grafu 4.9 byla pro přehlednost vynesena závislost relativní odchylky měřené magnetické indukce od hodnoty magnetické indukce z magnetu na vzdálenosti od čela magnetu. Pro osu  $z$  je graf v přílohách A.15. Jelikož se závislosti u počátku grafu překrývají, je oblast ohraničená černým obdélníkem zvětšena. Pro magnet 4x2 mm se zkoumá závislost i ve větších vzdálenostech než u magnetu 1x1 mm, aby byl dodržen maximální rozsah magnetometru, který byl zvolen pro koncept sondy. Maximální rozsah je 800  $\mu\text{T}$ , této hodnoty dosáhne pole u většího magnetu až ve větší vzdálenosti. Vzhledem k tomu, že vzdálenost kompenzační sondy od měřící sondy je navržena pro nejmenší z magnetů, dochází k tomu, že při proměřování magnetu 4x2 mm s danou konfigurací sondy je chyba měření vyšší. Toto lze pozorovat jak na grafu 4.9 pro osu  $x$  magnetometru, tak na grafu A.15 pro osu  $z$  magnetometru. Relativní chyba je však převážně pro větší vzdálenosti od čela magnetu ( $l > 35$  mm) stále mnohem menší než při nekompenzovaném měření.

Uspořádání s měřícím a kompenzačním senzorem navíc může potlačit také působení jiného rušivého zdroje magnetického pole, než je magnetické pole Země. To ale pouze za předpokladu, že toto rušivé působí stejně na oba senzory sondy.



## 5 Fyzická realizace sondy

Pro fyzickou realizaci sondy byl vybrán senzor MEMSIC MMC5883MA. Senzor byl zvolen, jelikož disponuje vhodnými parametry, včetně typu pouzdra, které ještě lze zapájet ručně. Fyzická vzdálenost měřícího a kompenzačního senzoru byla zvolena 60 mm, jak je uvedeno v kapitole 4.3. Sonda byla navržena v software Eagle 9.5.2. Schéma je vytvořeno podle doporučeného zapojení výrobce, rozměr desky je poté 4 mm na výšku, 95 mm na délku. Pájecí plošky senzorů byly oproti doporučeným rozměrům v datasheetu výrobce prodlouženy tak, aby částečně vystupovaly za pouzdro senzoru. Účelem této úpravy je zvýšení šance na ruční zapájení. Na obrázku níže popořadě spoje z vrstvy top, spoje z vrstvy bottom, osazení vrstvy top, osazení vrstvy bottom a schéma zapojení.



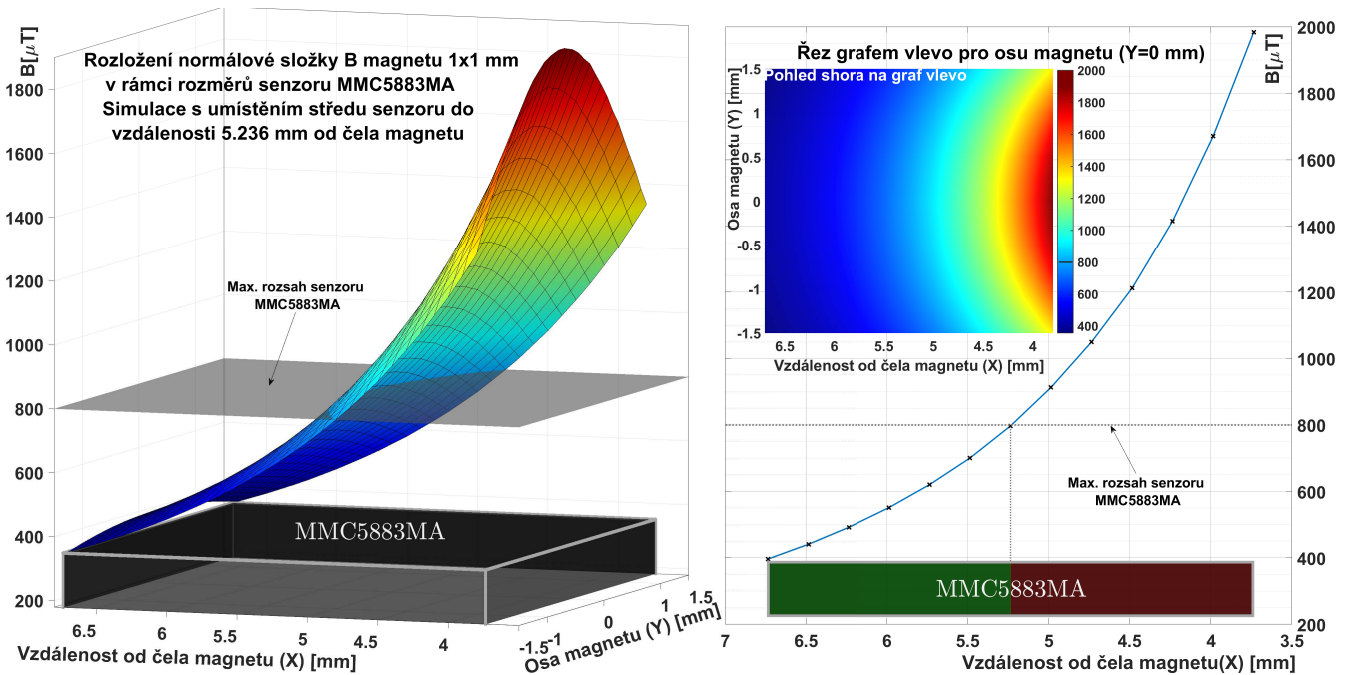
Obr. 5.1: Schéma a fyzické rozložení sondy (1,9x zvětšené)

## 5.1 Možné komplikace návrhu sondy

### 5.1.1 Neznámá poloha měřících elementů

Magnetometry z tabulky 1.2 jsou pro obecné použití, primárně však jako elektronický kompas. Při tomto použití měříme pole Země a lze tedy bezpečně předpokládat, že v rámci vzdáleností, které jsou srovnatelné s rozměry pouzdra senzoru má měřené pole stejné hodnoty. Senzor je v naší aplikaci použit k měření konkrétní hodnoty magnetického pole, které je navíc vzhledem k malým rozměrům magnetů velmi nehomogenní. Aby bylo možné prohlásit, jaká je hodnota měřeného pole v určité vzdálenosti v okolí zdroje magnetického pole, je nutné znát přesnou polohu měřícího elementu v pouzdru senzoru. U většiny miniaturních senzorů se tento údaj neuvádí, z výběru senzorů z tabulky 1.2 má v datasheetu udanou polohu měřícího elementu pouze senzor DRV425, a to pouze náčrtem obrysu na pouzdru (bez konkrétních hodnot rozměrů, ale číselný údaj je vzhledem ke konečné velikosti jádra fluxgate senzoru stejně problematický).

Vizualizace problému popisovaného v následujícím textu je na grafu 5.2.



Obr. 5.2: Vizualizace rozložení magnetického pole na MMC5883MA

U senzoru použitého v návrhu sondy výše je velikost pouzdra  $3 \times 3$   $\text{mm}$ , vzhledem k chybějícím údajům vzájemné polohy soustavy měřících elementů a absolutní polohy těchto elementů vzhledem k pouzdru senzoru vzniká chyba měření, jelikož musíme počítat s tím, že se tyto elementy mohou nacházet v podstatě kdekoliv v

rámci oblasti vymezené rozměry pouzdra. Senzor má rozsah měření intenzity magnetického pole  $\pm 0,8$  mT. Podle dat získaných simulací dosáhne u nejmenšího vzorku magnetu 1x1 mm velikost magnetického pole bezpečně měřitelné hodnoty ve vzdálenosti  $> 5,236$  mm. Pokud bychom předpokládali, že se citlivá část senzoru nachází v jeho středu a měřenou vzdálenost jsme k tomuto středu vztahovali, vznikla by v závislosti na skutečné poloze citlivé části senzoru odchylka reálné vzdálenosti měření až na  $\pm 1,5$  mm. Pokud by se tedy citlivá část nacházela v jedné krajní poloze ( $-1,5$  mm od středu senzoru), velikost magnetického pole v ose rovnoběžné s osou čela magnetu by byla 1,98 mT, tedy více než dvojnásobek z rozsahu sondy. Tato hodnota sice není pro sondu nebezpečná, podle datasheetu výrobce už ale může způsobit změnu charakteristiky senzoru a je tedy potřeba provést úpravu polaritu AMR filmu pomocí zabudované resetovací cívky. Reálně bychom tedy měřili magnetické pole v menší vzdálenosti než očekávané. Stejně tak v případě reálné polohy citlivé části senzoru v druhé krajní poloze ( $+1,5$  mm od středu senzoru) bychom měřili reálně ve větší než předpokládané vzdálenosti, měřené pole by bylo oproti očekávanému zhruba poloviční.

Na grafu 5.2 je v levé části vyobrazeno rozložení složky pole rovnoběžné s osou magnetu. Černý kvádr v spodní části svými rozměry (nikoliv však výškou) odpovídá reálným rozměrům pouzdra senzoru. Pokud umístíme střed senzoru do vzdálenosti 5,236 mm od čela magnetu, bude rozložení magnetického pole v oblasti ohraničené rozměry senzoru odpovídat ploše vykreslené nad modelem senzoru. Šedá rovina symbolizuje maximální měřící rozsah senzoru. V grafu na pravé části je poté vyobrazen řez levého grafu pro hodnotu  $Y=0$  mm, tedy v ose čela magnetu. Na modelu MMC5883MA v pravém grafu je barevně odlišena část, kde by umístění citlivých elementů vyhovovalo max. specifikaci senzoru (zeleně) a část, kde by magnetické pole přesáhlo maximální rozsah senzoru (červeně).

Z této ukázky je zřejmé, že ač má magnetometr MMC5883MA nesporně lepší výrobcem udávané parametry, než Hallova sonda použitá v gaussmetru F.W. Bell z orientačního měření magnetického pole v kapitole 2.1, není v měření magnetického pole malého magnetu nesporným vítězem. Z důvodu neurčitosti polohy citlivých elementů totiž vzniká nejistota ve skutečné hodnotě magnetického pole v námi předpokládané vzdálenosti, kdy hodnota této nejistoty by byla v případě příkladu z grafu 5.2 ve stovkách  $\mu\text{T}$ . Vzhledem k tomu, že gaussmetr FW. BELL dokáže rozlišit na nejnižším rozsahu 10  $\mu\text{T}$  a má přesně udanou polohu a rozměr citlivého elementu, zdá se čistě v tomto ohledu jako lepší řešení. Jako nutnost pro využití potenciálu senzoru MMC5883MA se tedy při měření silně nehomogenních polí jeví zjištění polohy citlivých elementů.

### 5.1.2 Chyby způsobené nedokonalostí senzoru a okolním rušením

Dalším problémem, který může nastat u fyzické realizace sondy je nedostatečně přesné usazení pouzdra senzoru na desce. Následkem tras vedených pod pouzdrém senzoru může také dojít k nazdvižení části senzoru [13], čímž se podle charakteru rotace pouzdra změní některé/všechny osy senzoru od předpokládaného souřadnicového systému určeného DPS. Je třeba dbát na korektní usazení při pájení, což může být při ručním zapájení miniaturní součástky složité.

Další chybou vstupující do měření je působení zmagnetizovaného materiálu v okolí sondy, typicky může jít o nějakou součástku osazenou na tištěném spoji, která vykazuje vlastnosti magneticky tvrdého materiálu. Tento materiál se může následkem působení externího magnetického pole zmagnetovat nebo už je zmagnetován od výroby. Následkem toho produkuje rušivé magnetické pole, které má ale naštěstí konstantní hodnotu, jelikož je se senzory svázáno DPS. Pokud je toto pole dostatečně malé, lze jeho hodnotu změřit a odečítat ji jako konstantní offset od měřených dat. Mírná komplikace může být změření hodnoty tohoto pole, jelikož je třeba odlišit tuto hodnotu od hodnoty pole Země. Vzhledem k tomu, že toto pole může dosahovat obecně různé hodnoty v různých místech, tedy jeho hodnota tohoto pole je jiná u prvního magnetometru sondy než u druhého magnetometru sondy a současně může být více zdrojů tohoto rušení, je nutné změřit jeho vliv u obou magnetometrů sondy zvlášť. Toho lze docílit například umístěním sondy do magnetického stínění a odečtením měřené hodnoty od výstupu sensorů, nebo potlačit pole Země použitím tříosé Helmholtzovy cívky a následně použít naměřené hodnoty bez působení pole Země jako hodnotu offsetu.[27]

Výhoda tohoto procesu kalibrace je také ta, že se odstraní offset způsobený rozvážením měřícího můstku senzoru následkem nedokonalého seřízení hodnot odporu AMR filmu [27] ve větvích můstku při nulovém okolním poli, ovšem už nevyřeší drift tohoto offsetu s teplotou. Pro odstranění offsetu můstku má ovšem výrobce přímo v datasheetu [16] vypracovaný postup, kdy pomocí magnetických impulsů od resetovací cívky měníme polaritu citlivé osy senzoru (otočíme osu citlivosti o 180°). Tento postup je funkční při působení konstantního externího magnetického pole (typicky pole Země) a neměnné poloze senzoru v průběhu kalibrace. Při použití SET funkcionality se AMR senzor zmagnetizuje ve směru pole resetovací cívky a změří se hodnota výstupu senzoru, která je dána součtem působícího externího magnetického pole a offsetu můstku. Poté provedeme RESET funkcionality, čímž se AMR senzor zmagnetuje v opačném směru než v případě SET funkcionality a změříme výstup senzoru. V tomto případě je výstup dán součtem záporně vzatého externího magnetického pole a offsetu můstku. Hodnotu offsetu poté získáme součtem těchto dvou výstupů a vydělením hodnoty dvěma. Výrobce doporučuje provádět

SET funkci dostatečně často, aby se dosáhlo nejlepších výsledků měření.

Kromě rušení magneticky tvrdými materiály působí jako rušení i magneticky měkké materiály na desce sondy. Tyto materiály následkem velké magnetické vodivosti zakřivují okolní magnetické pole. Záleží také na orientaci [27] magneticky měkkého materiálu vzhledem k měřenému magnetickému poli.

Nejschůdnějším řešením problému kalibrace je v našem případě použití metody měření známého konstantního pole. Díky ní lze korigovat jak rušení vzniklé magneticky měkkými materiály, tak magneticky tvrdými materiály svázanými se sondou přes DPS. Jde o jednoduše proveditelnou metodu, ke které nejsou potřeba externí měřicí přístroje, stačí pouze zajistit, že magnetické pole v okolí magnetometru je konstantní. Toho lze docílit kalibrací na volném prostranství s použitím pole Země. V nejjednodušším případě probíhá kalibrace tak, že senzorem rotujeme kolem jedné z jeho os a provádíme měření dvou pohybujících se os. Když si data z těchto dvou os zobrazíme do grafu, lze určit typ a míru rušení. Pokud není senzor rušený, bude grafem kruh se středem v počátku souřadnic a poloměrem o velikost magnetického pole ve dvou pohybujících se osách. Pokud je senzor rušený pouze tvrdými magnetickými materiály, bude kruh posunut od počátku souřadnic. Konkrétní posuv od počátku souřadnic pro zvolenou osu můžeme určit průměrováním maximální a minimální hodnoty ve zvolené ose. Pokud bude působit rušení magneticky měkkými materiály, bude kruh deformovaný do tvaru elipsy. Tyto dvě rušení se mohou kombinovat, elipsa by tedy měla v případě současného působení magneticky tvrdého materiálu posunutý střed mimo počátek. Pro korekci je třeba odečíst konstantní offset středu kruhy/elipsy od měřených dat, případně provést korekci z tvaru elipsy na kruh.[28] Korekční parametry pro kalibraci je možné získat zpracováním surových dat z magnetometru funkcí *magcal* v MATLABu.

Vzhledem k tomu, že se na návrhu DPS nenachází zřejmý zdroj dvou typů rušení z příkladu výše, stačí vyšetřit, zda naměřená surová data zobrazená do grafu s osami odpovídajícími osám citlivosti senzoru dostatečně odpovídají ideálnímu tvaru grafu. Tím je v případě dvou pohybujících se os zmíněných v textu výše kruh, v případě zobrazení všech tří os magnetometru koule.

Dále může být potřeba kalibrovat citlivost na měřícím rozsahu senzoru, výrobce ovšem v datasheetu zmiňuje, že u tohoto konkrétního modelu je kompenzace citlivosti přímo zabudovaná do senzoru.

Tyto problémy lze řešit kalibrací, ale i bez kalibrace by velmi pravděpodobně měly menší vliv na měření v naší konkrétní aplikaci než nejistota umístění měřících elementů v pouzdru senzoru. Proto je primárně třeba zaměřit se na zjištění polohy citlivých elementů senzoru, až poté budeme moci těžit z kalibrace senzoru.

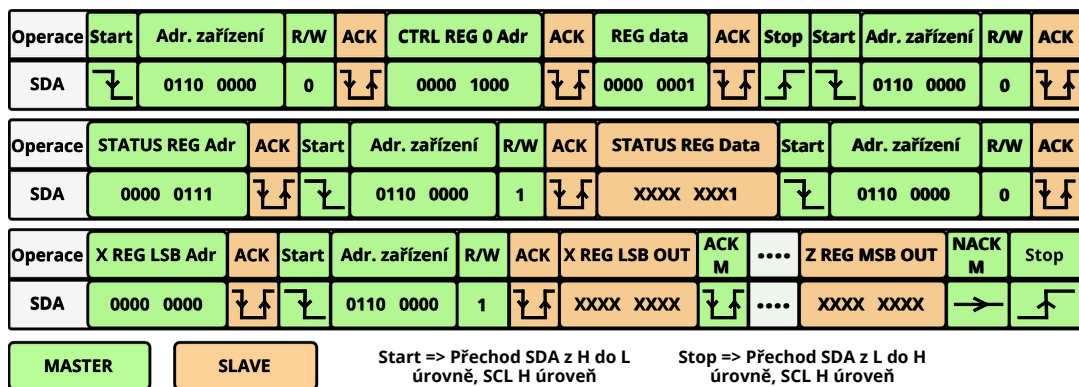
## 5.2 Komunikace sondy s řídicím počítačem

Senzor MMC5883MA komunikuje s řídicím počítačem pomocí rozhraní I<sup>2</sup>C. Jedná se o univerzální sériovou sběrnici, která má dva signály, SCL (hodinový signál) a SDA (data). Na této sběrnici je připojeno řídicí zařízení, zvané master, které komunikuje s dalšími zařízeními, která se nazývají slave. Slave zařízení nemůže přenášet data, pokud není vyzváno masterem. SCL a SDA jsou připojeny přes pull-up rezistory k napájecímu napětí. Linka SDA slouží ke sdílení dat z/do zařízení připojených na sběrnici. Jakákoliv komunikace na sběrnici je započata odesláním start podmínky řídicím zařízením a ukončena odesláním stop podmínky řídicím zařízením. Start podmínka je definována jako přechod úrovně SDA z H do L, když je SCL v úrovni H, stop podmínka je definována jako přechod úrovně SDA z L do H, když je SCL v úrovni H. Pro zamezení neustálého posílání stop podmínky následované start podmínkou je zavedena opakovaná start podmínka. Ta se od klasické start podmínky liší tím, že nastane před stop podmínkou, tedy v momentě, kdy sběrnice není volná. Toto je vhodné pro zamezení přebrání času na sběrnici jiným zařízením typu master, jelikož v případě odeslání stop podmínky se sběrnice uvolní a je tedy možné, že bude zabrána ostatními. Jednotlivé bity dat nesmí na sběrnici měnit logickou úroveň v momentě, když je signál SCL v úrovni H, jelikož by došlo k záměně za start/stop podmínku. Pro ověření korektně přijatých dat odesílá přijímač po každém přijatém bytu (tedy 9. perioda SCL signálu) ACK bit, kterému odpovídá logická úroveň L. Pokud je v 9. periodě SCL signálu na lince SDA hodnota H, je interpretována jako NACK bit, který může sloužit například jako signalizace dokončeného čtení dat řídicím počítačem.[29]

Připojení sondy k řídicímu počítači je možné například pomocí I<sup>2</sup>C karty. Senzor je zařízení typu slave, které disponuje 7-bitovou adresou. Odesláním této adresy na sběrnici počítač vyzývá senzor k vstupně výstupním operacím. Vzhledem k tomu, že řídicí sonda je vybavena dvěma senzory MMC5883MA, je nutno rozlišit, pro který senzor je příkaz z řídicího počítače určen. U některých senzorů z tabulky 1.2 lze pořídit různé varianty, které mají od výroby naprogramovanou navzájem odlišnou adresu. Senzor MMC5883MA je dostupný pouze ve variantě s jedinou adresou, je tedy nutné nějakým způsobem přepínat v řídicím algoritmu mezi datovými sběrnici dvou senzorů sondy. K tomu lze využít například multiplexor adresovaný v řídicím algoritmu, který ve vhodných částech programu po skončení komunikace s měřícím senzorem přepne datový vodič na korekční senzor.

Senzor MMC5883MA může pracovat ve dvou měřících režimech. Prvním je sbírání jednoho vzorku pouze po vyzvání měřícího algoritmu počítače, druhým je kontinuální sběr dat se zvolenou frekvencí. Možnost sbírání jednotlivých vzorků je vhodná především pro použití, kde se vyžaduje snížená energetická spotřeba zařízení a také

v případě, že máme představu o době trvání přechodného děje polohovacího zařízení. Můžeme poté zoptimalizovat efektivitu měření z hlediska energetické náročnosti a současně rychlosti. Kontinuální měřicí režim může při maximálním potlačení šumu senzoru měřit s frekvencí 14 Hz, což může být dostatečná hodnota z důvodu konečného trvání přesunu polohovacího zařízení do žádané polohy. Souhrnný čas potřebný pro změření všech tří os při maximálním potlačení šumu senzoru činí 10 ms. V případě, že je tedy nutné zvýšit frekvenci vyčítání dat nad 14 Hz, je nutné měřit v režimu single sample, tedy vysílat požadavek na každé jedno měření zvlášť. Úměrně frekvenci vyčítání roste také energetická spotřeba senzoru. Příklad jednoho měřicího cyklu senzoru MMC5883MA je na obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Diagram komunikace se senzorem MMC5883MA

Výchozí hodnotou kontrolního registru 1 senzoru MMC5883MA je  $00_h$ , což odpovídá nastavení měření s maximálním potlačení šumu, toto nastavení tedy není nutno měnit. Data pro každou osu jsou 16-bitová, je tedy nutno vyčíst a spojit 2 byty.

Pro začátek měření se zapíše do kontrolního registru 0 na adrese  $08_h$  hodnota  $01_h$ . Toto nastavení odpovídá bitu  $TM\_M$ , který započne měření jednoho vzorku magnetického pole. Poté se periodicky vyčítá obsah status registru zařízení na adrese  $07_h$ , dokud nemá poslední bit  $Meas\_M\_Done$  hodnotu 1, která značí, že je dokončeno měření magnetického pole a lze vyčítat hodnoty dat z jednotlivých registrů. Vyčítání hodnot magnetického pole zahájíme odesláním adresy  $00_h$  LSB registru  $x$ -ové osy. Zařízení poté odešle ACK bit následovaný daty z LSB X registru. Po opakovaném odeslání ACK bitu řídicím počítačem senzor odešle postupně byty všech registrů. Po odeslání obsahu posledního registru, tedy Z register MSB signalizuje řídicí počítač hodnotou H na SDA lince (NACK), že dokončil vyčítání a odešle Stop podmínku. Následně je možné vyčíst také data z korekčního senzoru, kalibrovat data obou senzorů použitím kalibračních koeficientů a provést rozdíl kalibrovaných dat měřicího senzoru a korekčního senzoru.

## Závěr

V první části práce jsem popsal teoretické základy snímačů magnetického pole na principu Hallova jevu, na magnetorezistivním principu a fluxgate snímačů. V závěru teoretické části je tabulka, ve které jsou porovnány základní parametry snímačů pro měření magnetického pole o velikosti magnetické indukce řádově v jednotkách mT. V samotné práci jsem nejdříve orientačně proměřil hodnoty normálové magnetické indukce na povrchu šesti rozměrů cylindrických axiálně magnetovaných NdFeB magnetů. Poté byla v okolí každého z magnetů zmapována velikost normálové složky magnetické indukce. U rozměrů 3x2,0 mm a 4x2,0 byla ve vzdálenosti 0 a 5 mm od povrchu magnetu zmapována síť hodnot o počtu 51x51 bodů. U ostatních vzorků jsem naměřil pouze 11x11 hodnot ve vzdálenostech 0, 1, 2, 3, 4 a 5 mm od povrchu magnetu. Tato síť bodů se ukázala jako nedostatečně hustá pro dobré zmapování pole, jak lze vidět v řezech grafy začínajících na straně 62.

Dále jsem provedl simulaci magnetického pole pro modely všech vzorků magnetů v simulačních programech FEMM 4.2 a Ansys Discovery AIM 2019 R3. Program FEMM 4.2 se ukázal jako ideální pro simulaci osově souměrného magnetu, jelikož poskytuje značné zmenšení výpočetní náročnosti problému bez negativních dopadů na přesnost výsledku. Simulace v programu Ansys AIM se projevila jako problematická z důvodu licenčního omezení počtu útvarů, na které se rozloží simulovaná oblast a také z důvodu zbytečně vysoké výpočetní náročnosti. V rámci simulační části jsem v programu FEMM 4.2 ověřil vliv rozměrů a povrchové úpravy magnetů na velikost magnetické indukce nad povrchem magnetu. Ověřením v simulaci bylo potvrzeno, že velikost magnetické indukce je pro cylindrický magnet závislá výšce a průměru magnetu. Magnety, které mají poměr průměru ku výšce stejný mají stejnou hodnotu indukce na povrchu. Ověřil jsem také vliv rádia hrany magnetu 1x1 mm. Bylo zjištěno, že těsně nad povrchem magnetu roste s rádiem také velikost magnetické indukce, pro vzdálenosti větší než 1 mm od povrchu dosahuje ovšem největší velikosti magnetické indukce magnet s nulovým rádiem. Dále jsem prověřil i vliv povrchové ochranné vrstvy Ni-Cu-Ni na velikost a rozložení magnetického pole magnetu. Bylo zjištěno, že 21  $\mu\text{m}$  tlustá vrstva má negativní vliv na velikost magnetické indukce, převážně pro nejmenší z magnetů. Pro magnet 1x1 mm dojde k relativnímu zmenšení magnetické indukce v závislosti na vzdálenosti od čela o  $\approx 6\text{--}14\%$  oproti nepokovenému vzorku, pro magnet 4x2 mm poté o  $\approx 1,5\text{--}8\%$ .

Vytvořil jsem návrh sondy s dvěma tříosými snímači MMC5883MA, kdy druhý snímač slouží k odstranění vlivu magnetického pole Země na měření. Potřebná vzdálenost kompenzačního senzoru od měřícího senzoru byla s pomocí simulace zvolena jako 60 mm, zde poté dosahuje velikost magnetického pole magnetu 1x1 mm 3,4 % z magnetického pole Země. Pro demonstraci účinnosti kompenzace jsem simuloval



velikost relativní odchylky měřené hodnoty magnetické indukce od hodnoty magnetické indukce čistě z magnetu v případě, že je pole Země kompenzováno a bez kompenzace. Podle dat ze simulace by bylo měření bez kompenzace jak pro magnet 1x1 mm, tak i pro magnet 4x2 mm znehodnoceno (odchylka > 29 % oproti reálné hodnotě) magnetickým polem Země pro vzdálenost senzoru  $l > 40$  mm od čela magnetu. V souvislosti s vlastním návrhem sondy je v kapitole 5.1 zmíněn problém použití miniaturních integrovaných senzorů při měření silně nehomogenního pole magnetů. Pro co nepřesnější měření s daným integrovaným senzorem je třeba zjistit polohu citlivých elementů v pouzdru senzoru. U sondy je totiž bez znalosti polohy citlivých elementů nemožné s jistotou určit vzdálenost a bod, ve kterém konkrétní hodnotu pole měříme. Dále byla nastíněna problematika kalibrace senzoru a možné řešení v našem konkrétním případě. V kapitole 5.2 je popsán způsob komunikace se senzorem MMC5883MA pomocí rozhraní I<sup>2</sup>C.

Hodnoty v téměř celé zkoumané oblasti nad magnetem jsou v simulacích mnohem větší než hodnoty naměřené. Z počátku jsem předpokládal, že původcem je vzhledem k malým průměrům magnetů (řádově jednotky mm) velký průměr aktivní části Hallovy sondy. Proto jsem napsal v MATLABu skript, který zprůměroval hodnoty ze simulace přes kruhovou oblast o stejné ploše, jakou udává výrobce Hallovy sondy F.W. BELL. Po zprůměrování dat ale nedošlo k výraznému zlepšení výsledků, u největšího magnetu jsou rozdíly mezi daty před a po zprůměrování prakticky nepozorovatelné. Například pro graf A.12 má pole v rámci aktivního rozměru citlivého elementu téměř konstantní hodnotu, průměr aktivní oblasti senzoru by zde tedy neměl ovlivnit měření. Měření pole u hran magnetu je ovšem s větším rozlišením pomocí zvolené Hallovy sondy problematické. Hodnoty z gaussmetru F.W. BELL 5080 byly překontrolovány odlišným modelem, který s přihlédnutím na vzdálenost citlivého elementu potvrdil správnost původního měření. Pro další ověření korektnosti měření by bylo vhodné proměřit větší magnet se stejným poměrem  $d/h$  a ze stejného materiálu, jako některý z testovaných magnetů. Pro tento větší magnet by podle simulace měla být stejná povrchová hodnota normálové složky magnetické indukce, jako u miniaturních vzorků proměřovaných v této práci. U velkého magnetu se v menší míře projeví negativní vlivy způsobené zjednodušením modelů simulace, které byly popsány v kapitole 4. U dostatečně rozměrného magnetu lze také zanedbat vliv konečného rozměru aktivní části senzoru.

# Literatura

- [1] PURCELL, Edward M. a David J. MORIN. *Electricity and magnetism*. Third edition. Cambridge: Cambridge University Press, [2013]. ISBN 978-1-107-01402-2. Kapitola 11.
- [2] CONSTANTINIDES, Steve. - Arnold Magnetic Technologies Corp. *The Important Role of Dysprosium in Modern Permanent Magnets*. [online]. 10 [cit. 2020-03-27], Rev. 150903a. Dostupné z: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Important-Role-of-Dysprosium-in-Modern-Permanent-Magnets-150906.pdf>
- [3] CONSTANTINIDES, Steve. The Elements of Magnetism. *MRS Proceedings* [online]. 2013, 1492, 35-46 [cit. 2020-05-26]. DOI: 10.1557/opl.2013.174. ISSN 0272-9172. Dostupné z: [https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S1946427413001747/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S1946427413001747/type/journal_article)
- [4] CHEN, D.-X., J.A. BRUG a R.B. GOLDFARB. Demagnetizing factors for cylinders. *IEEE Transactions on Magnetics*. [online]. 1991, 27(4), 3601-3619 [cit. 2020-03-28]. DOI: 10.1109/20.102932. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/102932/>
- [5] TDK Corporation. *MAGNETIC CIRCUIT DESIGN*. [online]. 6 [cit. 2020-03-28], 20120627. Dostupné z: [https://product.tdk.com/en/products/magnet/pdf/e371\\_circuit.pdf](https://product.tdk.com/en/products/magnet/pdf/e371_circuit.pdf)
- [6] Temperature and Neodymium Magnets. In: *K&J Magnetism, Inc.* [online]. Pipersville(Pensylvánie): K&J Magnetism, Rok vydání neuveden [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.kjmagnetism.com/blog.asp?p=temperature-and-neodymium-magnets>
- [7] DU, Winncy Y. *Resistive, capacitive, inductive, and magnetic sensor technologies*. CRC Press, 2014. ISBN 9781439812440.
- [8] ENNEN, Inga, Daniel KAPPE, Thomas REMPEL, Claudia GLENSKE a Andreas HÜTTEN. *Giant Magnetoresistance: Basic Concepts, Microstructure, Magnetic Interactions and Applications*. *Sensors* [online]. 2016, 16(6) [cit. 2019-10-17]. DOI: 10.3390/s16060904. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/6/904>

- [9] Wikipedia *Giant magnetoresistance*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia (online)*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-10-17]. Dostupné z: [https://simple.wikipedia.org/wiki/Giant\\_magnetoresistance](https://simple.wikipedia.org/wiki/Giant_magnetoresistance)
- [10] EVANS, Ken. *Fluxgate Magnetometer Explained – Mar. 2006 [online]*. 5 [cit. 2019-10-17]. Dostupné z: <http://www.invasens.co.uk/FluxgateExplained.PDF>
- [11] RIPKA, P a S.W BILLINGSLEY. Crossfield effect at fluxgate. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2000, 81(1-3), 176-179 [cit. 2019-10-18]. DOI: 10.1016/S0924-4247(99)00082-5. ISSN 09244247. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424799000825>
- [12] RIPKA, Pavel. New directions in fluxgate sensors. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2000, 215-216, 735-739 [cit. 2019-10-17]. DOI: 10.1016/S0304-8853(00)00273-0. ISSN 03048853. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304885300002730>
- [13] Freescale Semiconductor, Inc [online katalogový list]. *MAG3110*. © 2013 [cit. 04. 01. 2020]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MAG3110.pdf>
- [14] STMicroelectronics [online katalogový list]. *IIS2MDC*. © 2017 [cit. 04. 01. 2020]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/iis2mdc-1309412.pdf>
- [15] MEMSIC, Inc [online katalogový list]. *MMC5603NJ*. © 2018 [cit. 04. 01. 2020]. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/821/Memsic\\_09102019\\_MMC5603NJ\\_Datasheet\\_Rev.B-1635324.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/821/Memsic_09102019_MMC5603NJ_Datasheet_Rev.B-1635324.pdf)
- [16] MEMSIC, Inc [online katalogový list]. *MMC5883MA*. © 2017 [cit. 04. 01. 2020]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/821/MMC5883MA-RevC-1219541.pdf>
- [17] MEMSIC, Inc [online katalogový list]. *MMC3416xPJ*. © 2013 [cit. 04. 01. 2020]. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/821/MMC3416xPJ\\_Rev\\_C\\_2013\\_10\\_30-1075494.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/821/MMC3416xPJ_Rev_C_2013_10_30-1075494.pdf)
- [18] STMicroelectronics [online katalogový list]. *LIS3MDL*. © 2017 [cit. 04. 01. 2020]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/lis3mdl-954956.pdf>

- [19] ROHM Co., Ltd. [online katalogový list]. *BM1422AGMV*. © 2016 [cit. 04. 01. 2020]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/348/bm1422agmv-e-1508116.pdf>
- [20] Bosch Sensortec GmbH [online katalogový list]. *BMM150*. © 2019 [cit. 04. 01. 2020]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/783/BST-BMM150-DS001-1509615.pdf>
- [21] Texas Instruments Incorporated [online katalogový list]. *DRV425* © 2020 [cit. 19. 03. 2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv425.pdf>
- [22] SONG, Y. W., H. ZHANG, H. X. YANG a Z. L. SONG. A comparative study on the corrosion behavior of NdFeB magnets in different electrolyte solutions. *Materials and Corrosion*[online]. 2008, 59(10), 794-801 [cit. 2020-05-26]. DOI: 10.1002/maco.200804175. ISSN 09475117. Dostupné z:<http://doi.wiley.com/10.1002/maco.200804175>
- [23] GVISHIANI, Alexei, Anatoly SOLOVIEV, Roman KRASNOPEROV a Renata LUKIANOVA. *Automated Hardware and Software System for Monitoring the Earth's Magnetic Environment*. *Data Science Journal* [online]. 2016, 15 [cit. 2020-03-11]. DOI: 10.5334/dsj-2016-018. ISSN 1683-1470. Dostupné z: <http://datascience.codata.org/articles/10.5334/dsj-2016-018/>
- [24] World Magnetic Model. *National Centers for Environmental Information* [online]. Boulder, Colorado: NCEI, 2020 [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml>
- [25] Eclipse Magnetics Ltd [online katalogový list]. *NdFeB Magnets* Datum vydání neuvedeno [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: [https://www.eclipsemagnetics.com/media/wysiwyg/datasheets/magnet\\_materials\\_and\\_assemblies/ndfeb\\_neodymium\\_iron\\_boron-standard\\_ndfeb\\_range\\_datasheet\\_rev1.pdf](https://www.eclipsemagnetics.com/media/wysiwyg/datasheets/magnet_materials_and_assemblies/ndfeb_neodymium_iron_boron-standard_ndfeb_range_datasheet_rev1.pdf)
- [26] What is nickel plating on the surface of the magnet. *BearHeart*[online]. Xiamen: Xiamen BearHeart Imp & Exp Co., 2019 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.bearheart-magnet.com/info/what-is-nickel-plating-on-the-surface-of-the-m-34961110.html>
- [27] RENAUDIN, Valérie, Muhammad Haris AFZAL a Gérard LACHAPELLE. Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain. *Journal of Sensors* [online]. 2010, 2010, 1-10 [cit. 2020-05-23]. DOI: 10.1155/2010/967245. ISSN 1687-725X. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/js/2010/967245/>

- [28] CARUSO, M.J. Applications of magnetic sensors for low cost compass systems. In: *IEEE 2000. Position Location and Navigation Symposium (Cat. No.00CH37062)* [online]. IEEE, 2000, s. 177-184 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1109/PLANS.2000.838300. ISBN 0-7803-5872-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/838300/>
- [29] VALDEZ, Jonathan a Jared BECKER, Texas Instruments Incorporated  
*Understanding the I2C Bus*[online] Texas Instruments, Texas, USA [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf?ts=1590245817230>

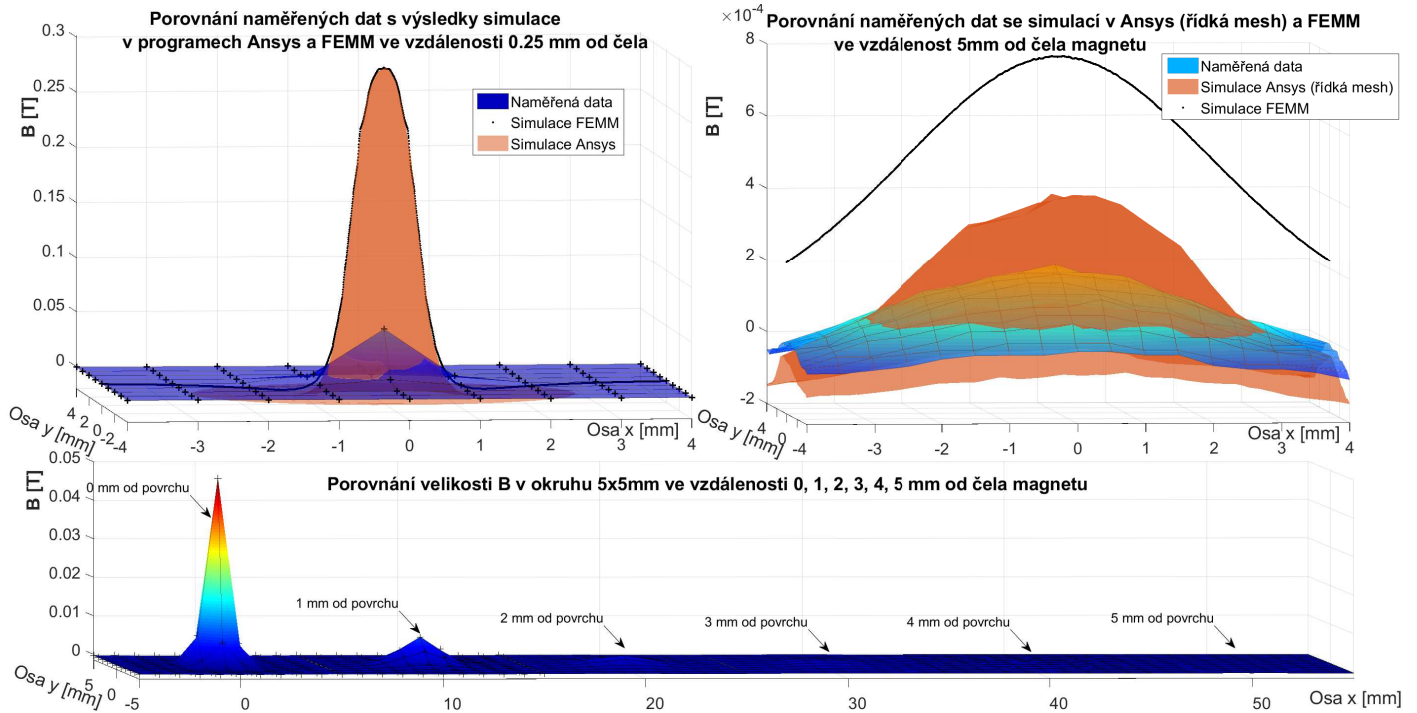
# Seznam symbolů, veličin a zkratek

<b>B</b>	Magnetická indukce [T]
<b>B<sub>n</sub></b>	Normálová složka vektoru magnetické indukce [T]
<b>B<sub>t</sub></b>	Tečná složka vektoru magnetické indukce [T]
<b>M</b>	Magnetizace materiálu [A/m]
<b>P<sub>c</sub></b>	Koeficient Permeance [-]
<b>μ<sub>0</sub></b>	Permeabilita vakua [H/m]
<b>U<sub>h</sub></b>	Hallovo napětí [V]
<b>I</b>	Elektrický proud [A]
<b>q</b>	Elektrický náboj [C]
<b>N<sub>C</sub></b>	Koncentrace nosičů náboje [m <sup>-3</sup> ]
<b>t<sub>h</sub></b>	Tloušťka vodiče [m]
<b>M<sub>R</sub></b>	Míra změny odporu [%]
<b>ρ</b>	Rezistivita vodiče [Ω × m]
<b>R</b>	Elektrický odpor [Ω]
<b>H</b>	Intenzita magnetického pole [A/m]
<b>MR</b>	Magnetorezistence
<b>OMR</b>	Obyčejná magnetorezistence
<b>AMR</b>	Anizotropní magnetorezistence
<b>GMR</b>	Gigantická magnetorezistence
<b>TMR</b>	Tunelová magnetorezistence
<b>AF</b>	Antiferomagnetikum
<b>FM</b>	Feromagnetikum
<b>NM</b>	Normální kov (nemagnetický)
<b>LSB</b>	Least Significant Bit (Nejméně významný bit)
<b>ODR</b>	Output data rate (frekvence výstupních dat)
<b>ADC</b>	Analog-to-digital converter (Analogově digitální převodník)
<b>NdFeB</b>	Magnet ze slitiny neodymu, železa a boru
<b>FEMM</b>	Finite Element Method Magnetics (Magnetika metodou konečných prvků), simulační program
<b>CAD</b>	Computer Aided Design (Návrh použitím počítače)
<b>DPS</b>	Deska plošných spojů

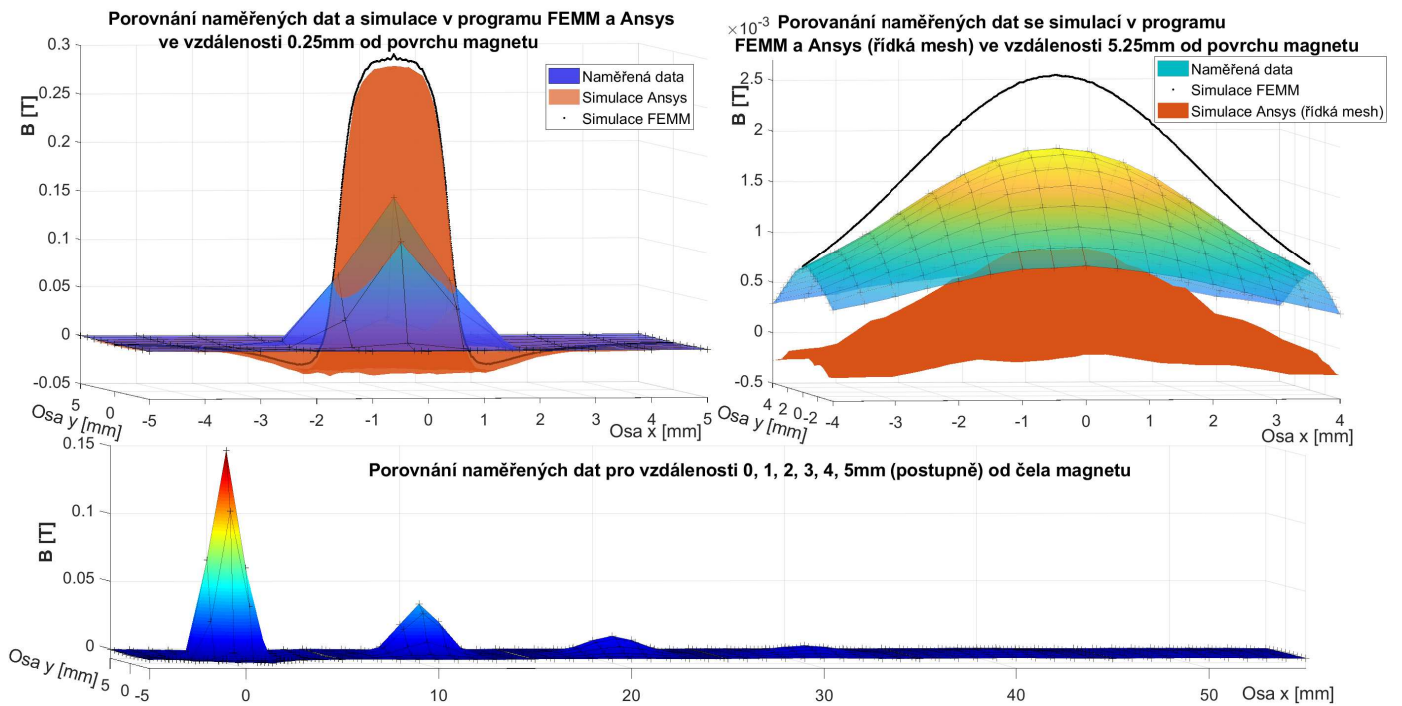
# Seznam příloh

<b>A</b>	<b>Naměřená a simulovaná data</b>	<b>59</b>
A.1	Grafy řezu osou $x=0$ mm pro všechny magnety . . . . .	62
A.1.1	Výstup z algoritmu pro průměrování dat . . . . .	65
A.2	Grafy závislostí B na vlastnostech magnetů . . . . .	66
<b>B</b>	<b>Obsah přiloženého DVD</b>	<b>68</b>

# A Naměřená a simulovaná data

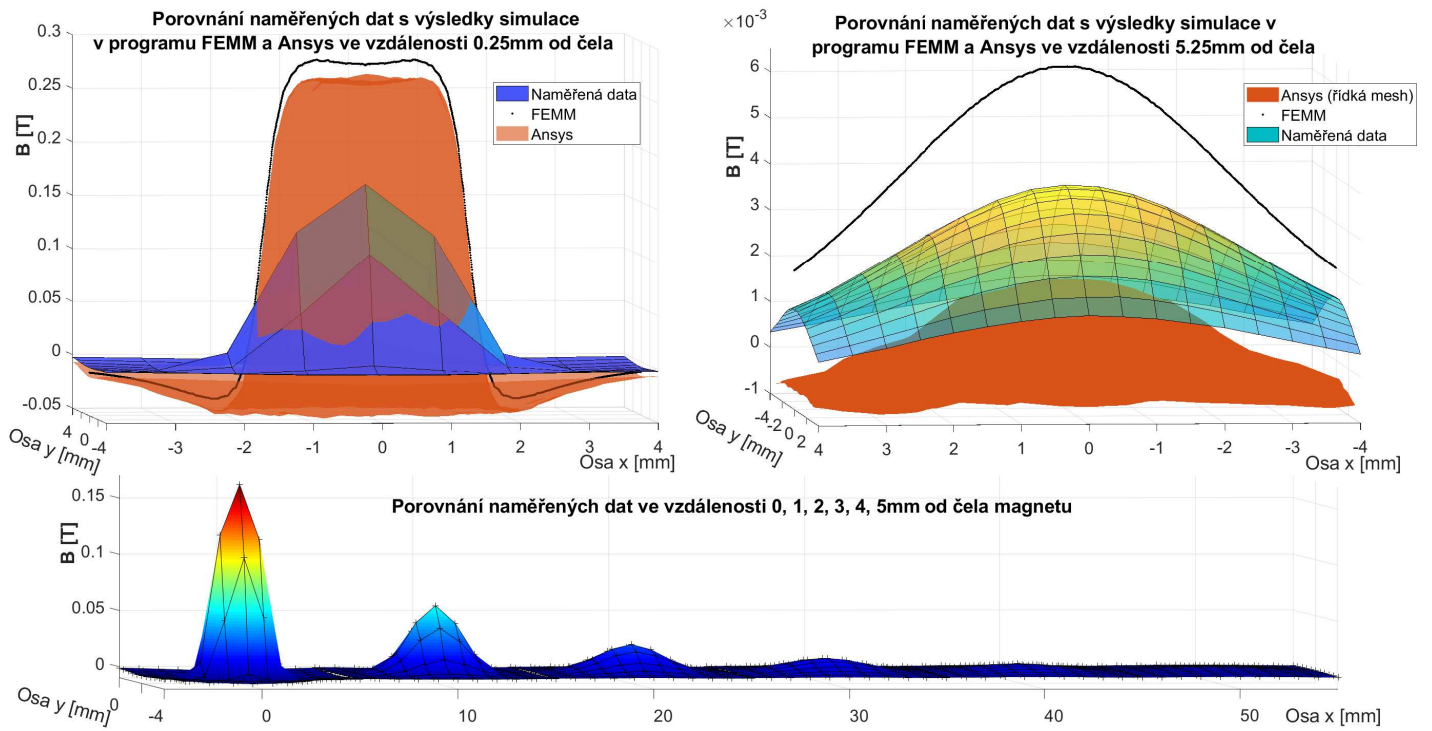


Obr. A.1: Magnet 1x1,0 mm N42 naměřená data a simulace

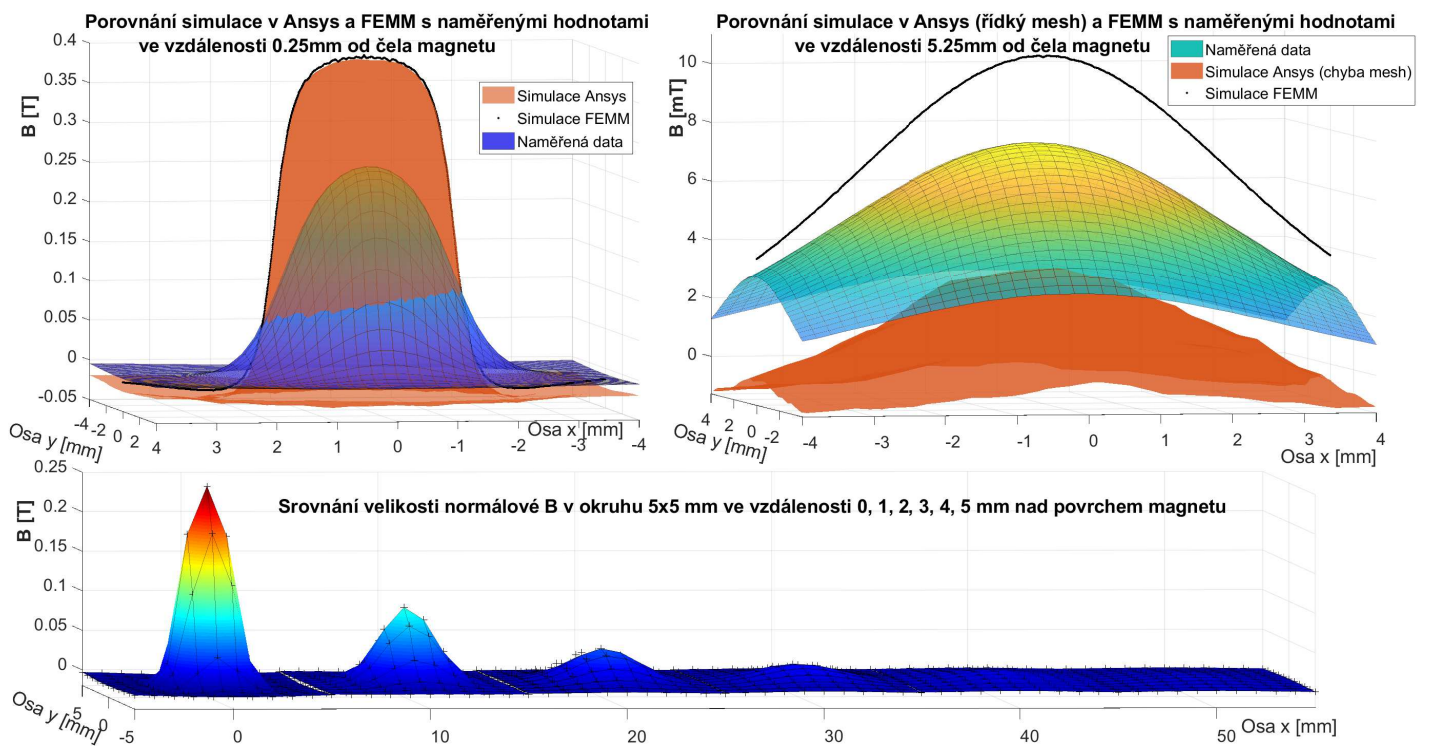


Obr. A.2: Magnet 2x0,8 mm N42H naměřená data a simulace

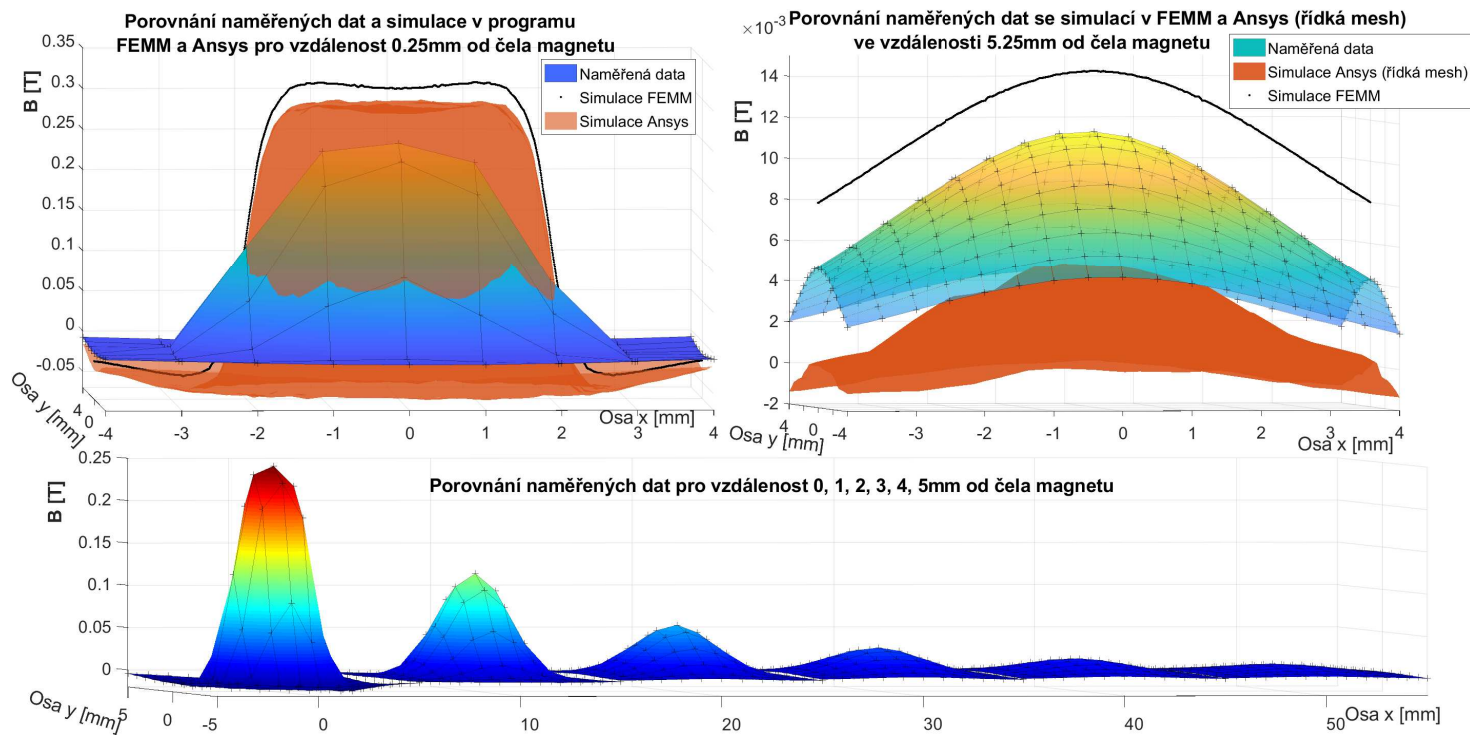




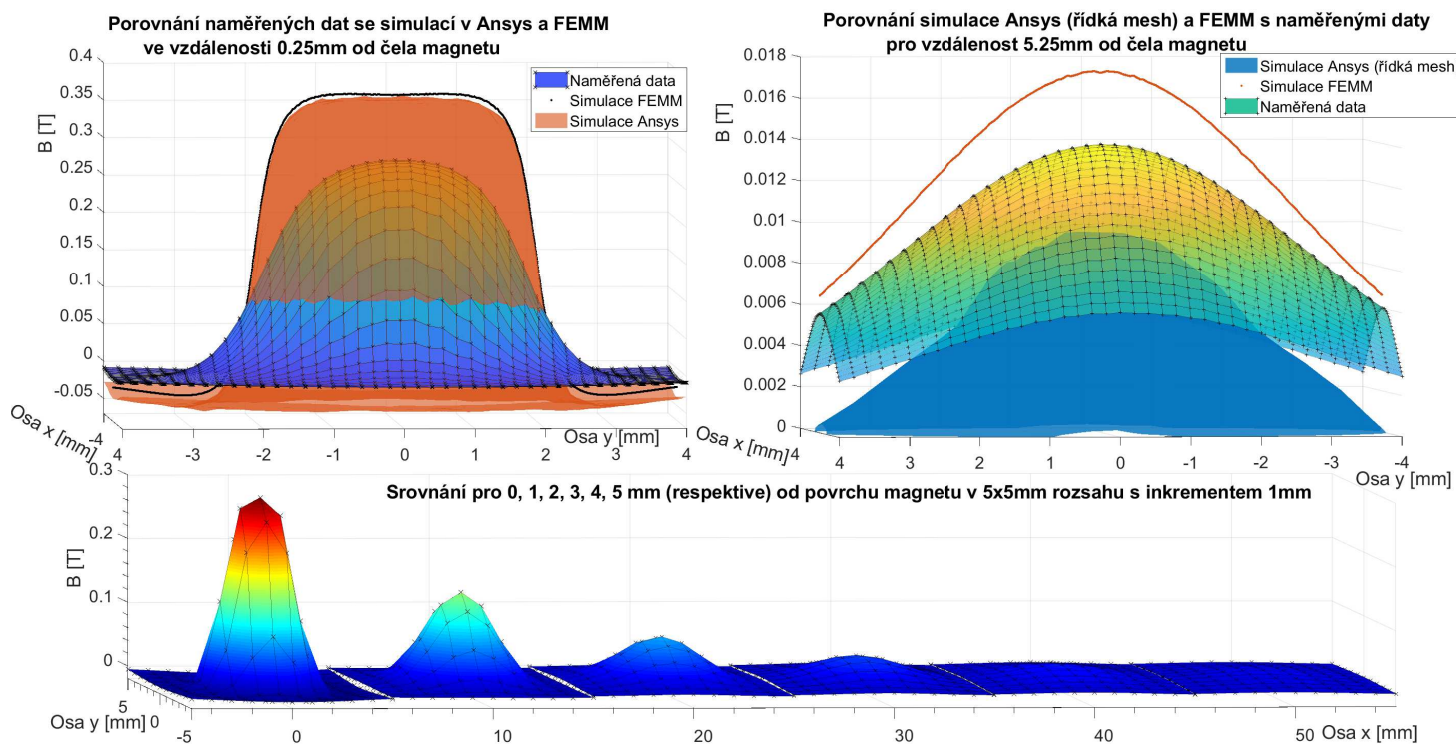
Obr. A.3: Magnet 3x1,0 mm N42 naměřená data a simulace



Obr. A.4: Magnet 3x2,0 mm N42 naměřená data a simulace

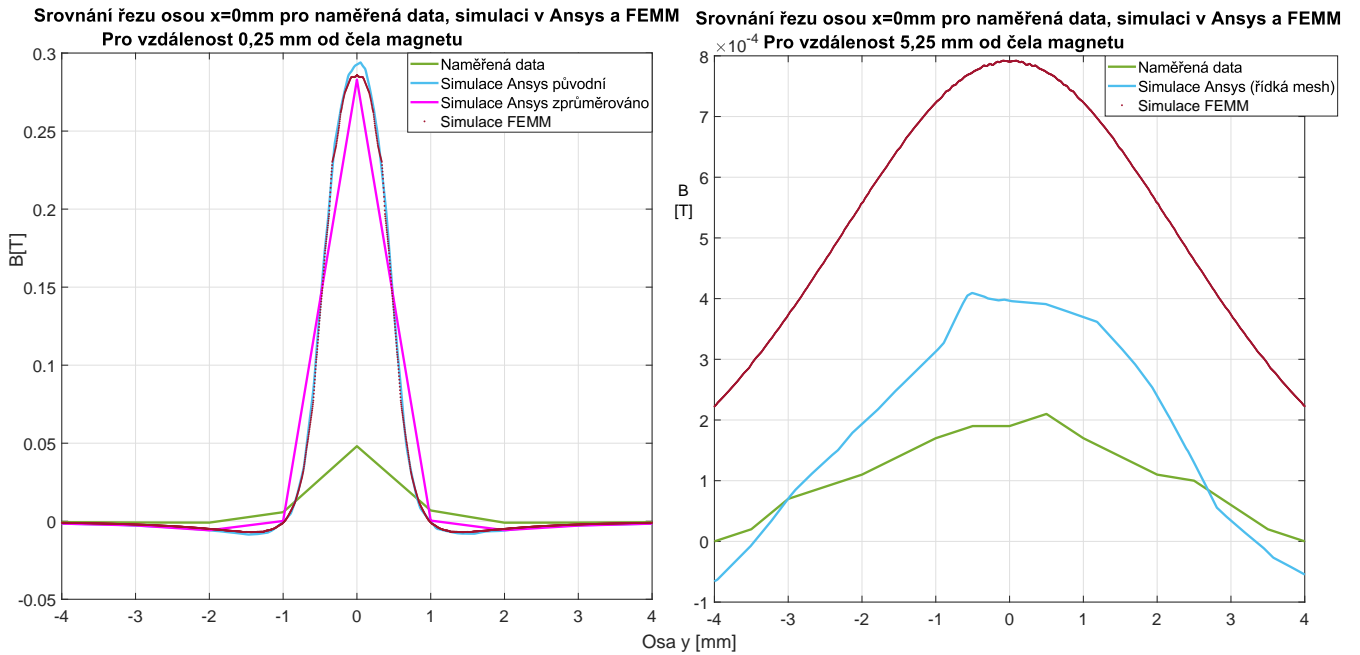


Obr. A.5: Magnet 4x1,5 mm N42 naměřená data a simulace

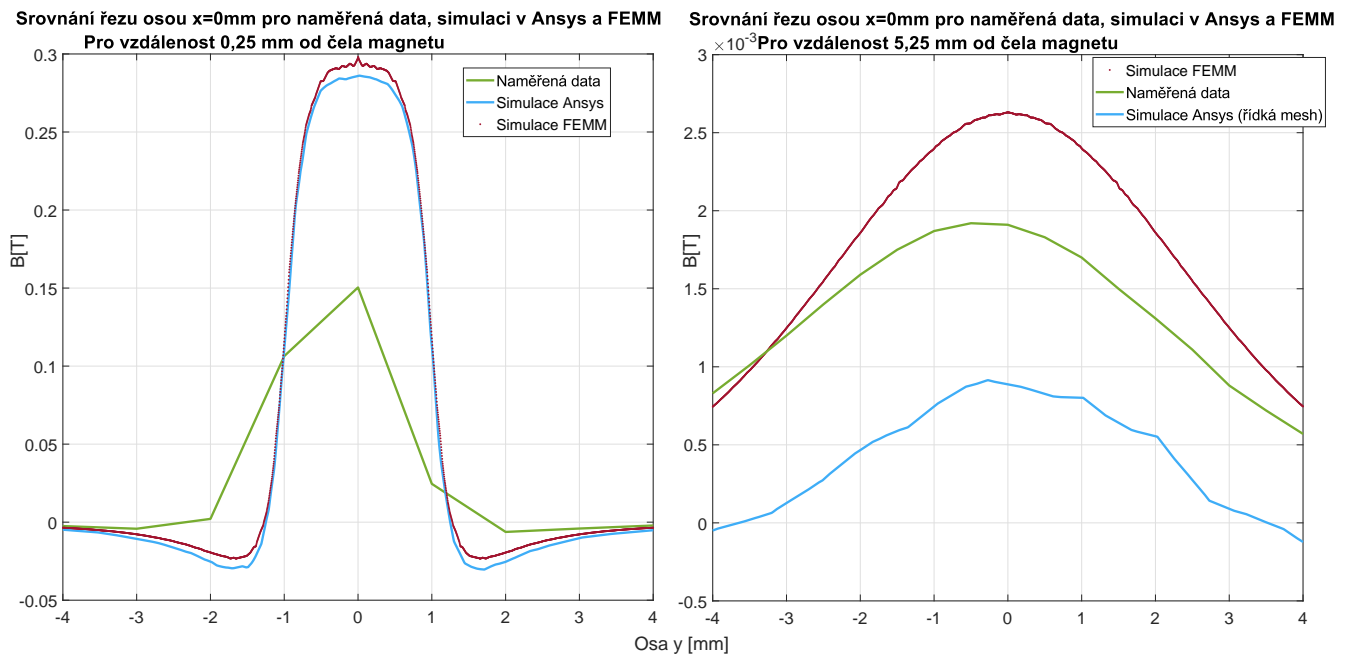


Obr. A.6: Magnet 4x2,0 mm N42 naměřená data a simulace

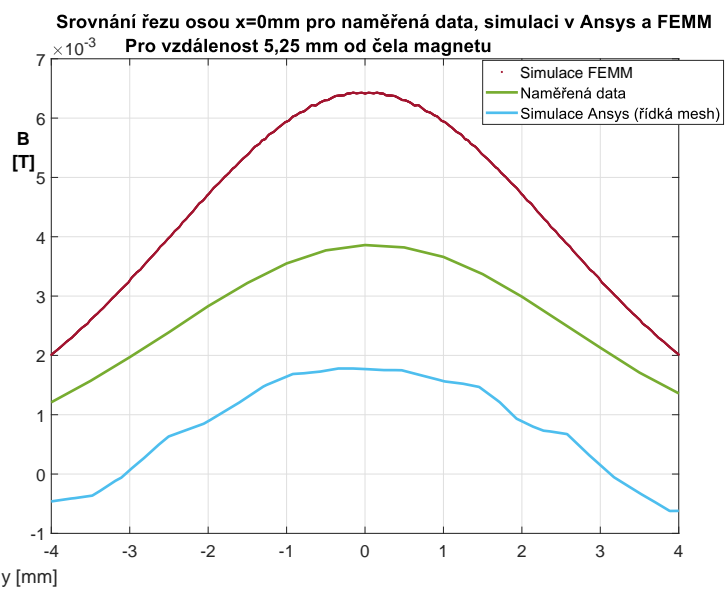
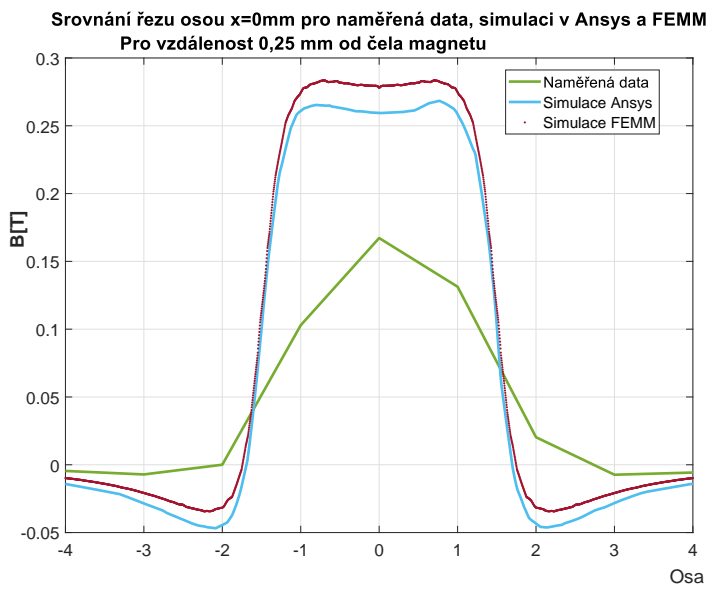
## A.1 Grafy řezu osou $x=0$ mm pro všechny magnety



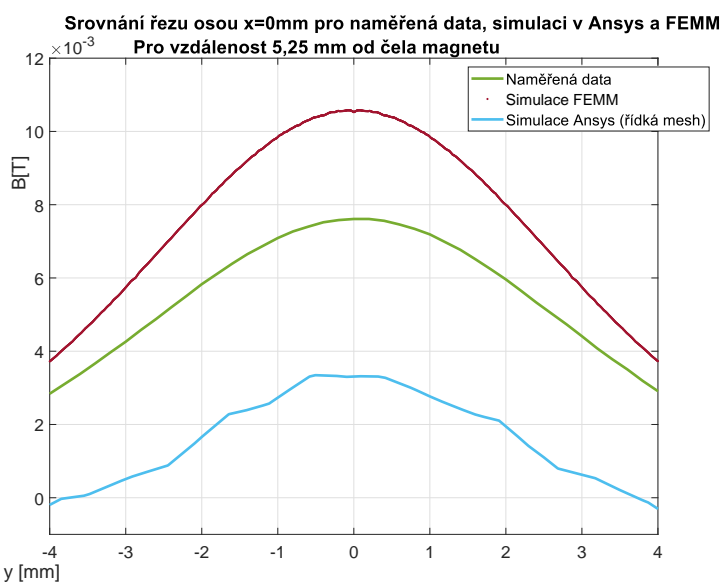
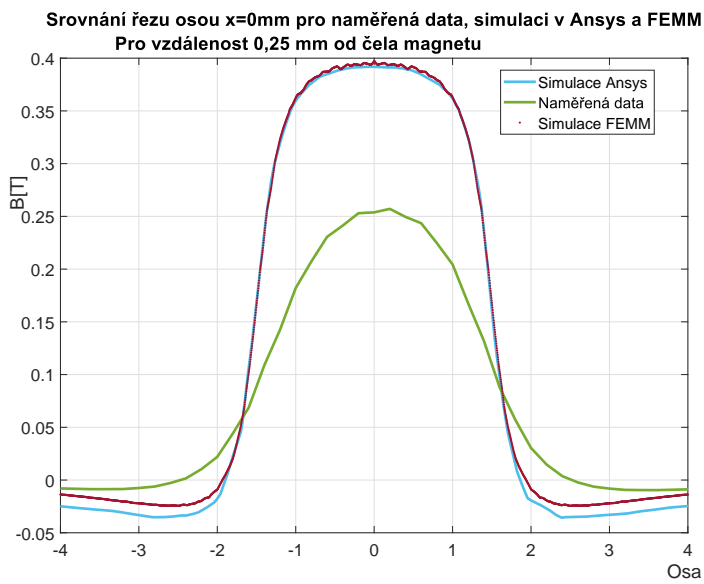
Obr. A.7: Řez osou  $x=0$  mm pro magnet 1x1,0 mm



Obr. A.8: Řez osou  $x=0$  mm pro magnet 2x0,8 mm

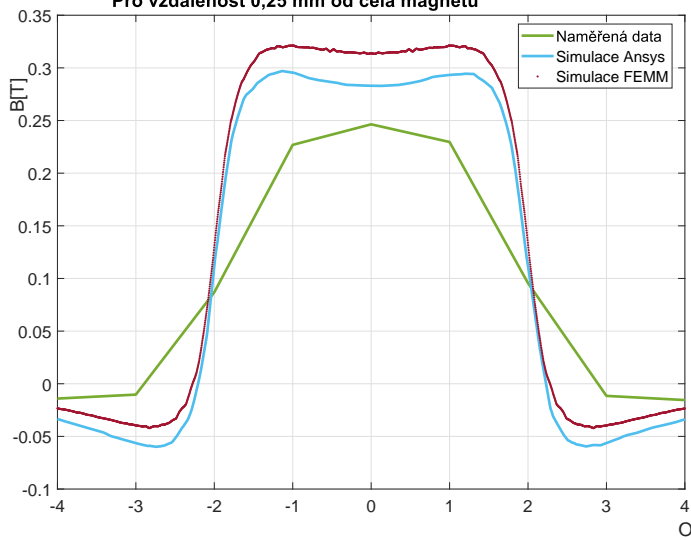


Obr. A.9: Řez osou  $x=0$  mm pro magnet  $3 \times 1,0$  mm

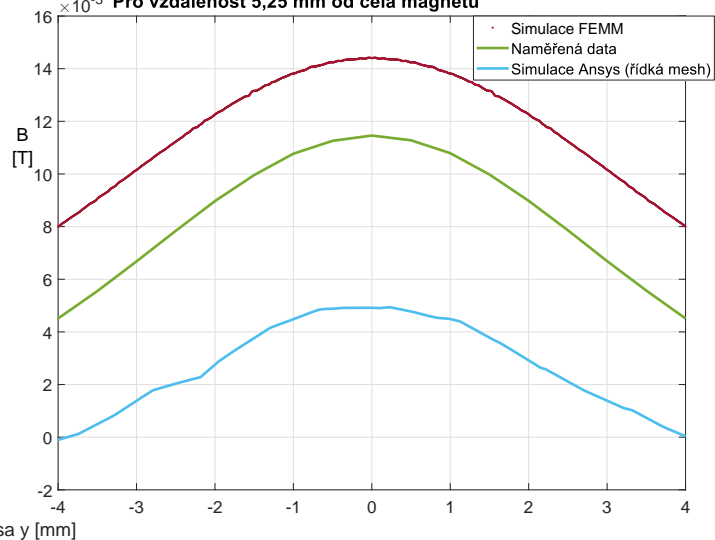


Obr. A.10: Řez osou  $x=0$  mm pro magnet  $3 \times 2,0$  mm

Srovnání řezu osou  $x=0\text{mm}$  pro naměřená data, simulaci v Ansys a FEMM  
Pro vzdálenost 0,25 mm od čela magnetu

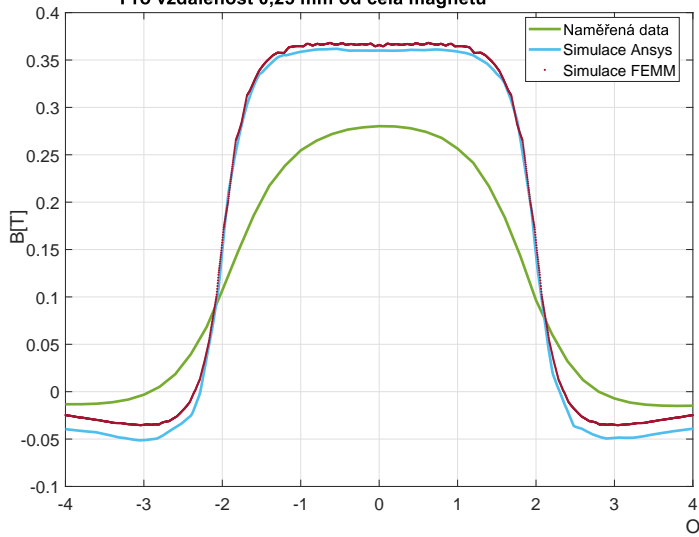


Srovnání řezu osou  $x=0\text{mm}$  pro naměřená data, simulaci v Ansys a FEMM  
Pro vzdálenost 5,25 mm od čela magnetu

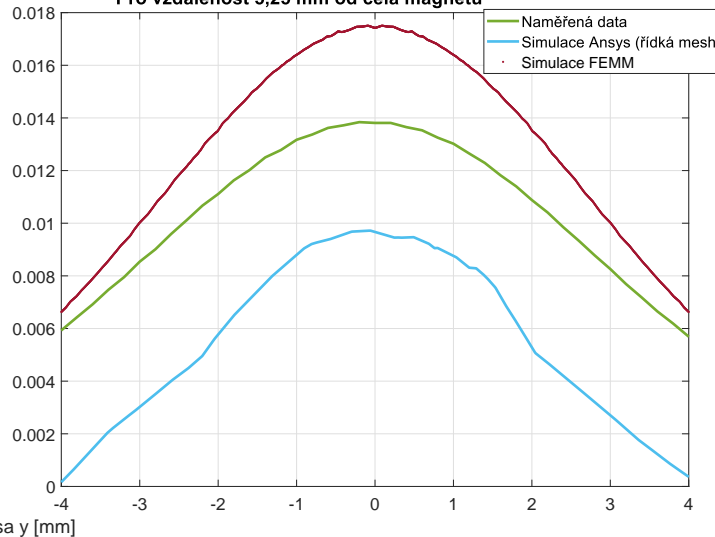


Obr. A.11: Řez osou  $x=0$  mm pro magnet 4x1,5 mm

Srovnání řezu osou  $x=0\text{mm}$  pro naměřená data, simulaci v Ansys a FEMM  
Pro vzdálenost 0,25 mm od čela magnetu

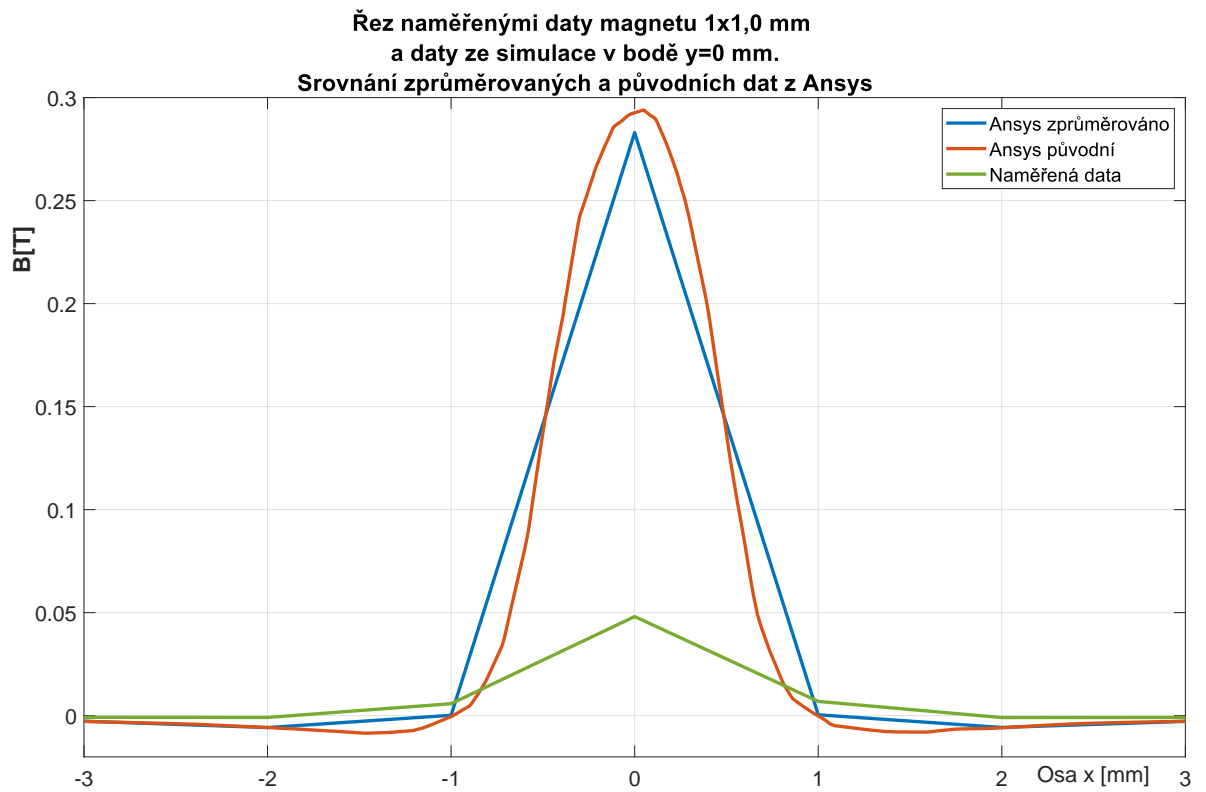


Srovnání řezu osou  $x=0\text{mm}$  pro naměřená data, simulaci v Ansys a FEMM  
Pro vzdálenost 5,25 mm od čela magnetu



Obr. A.12: Řez osou  $x=0$  mm pro magnet 4x2,0 mm

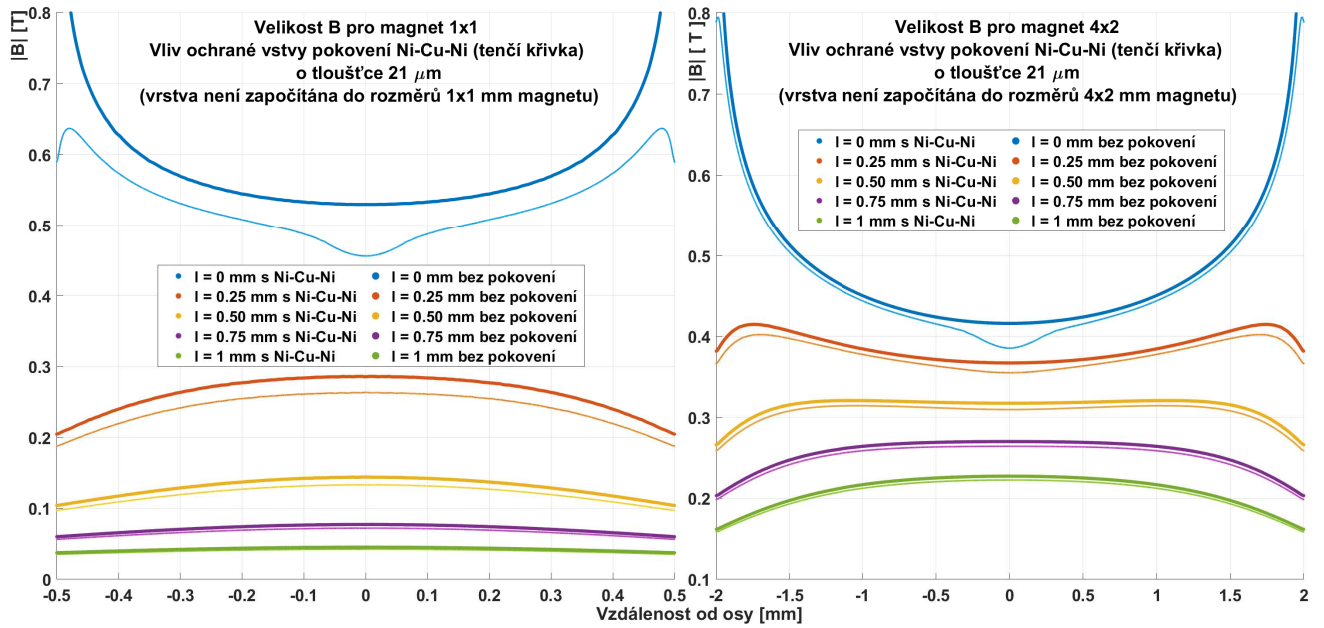
### A.1.1 Výstup z algoritmu pro průměrování dat



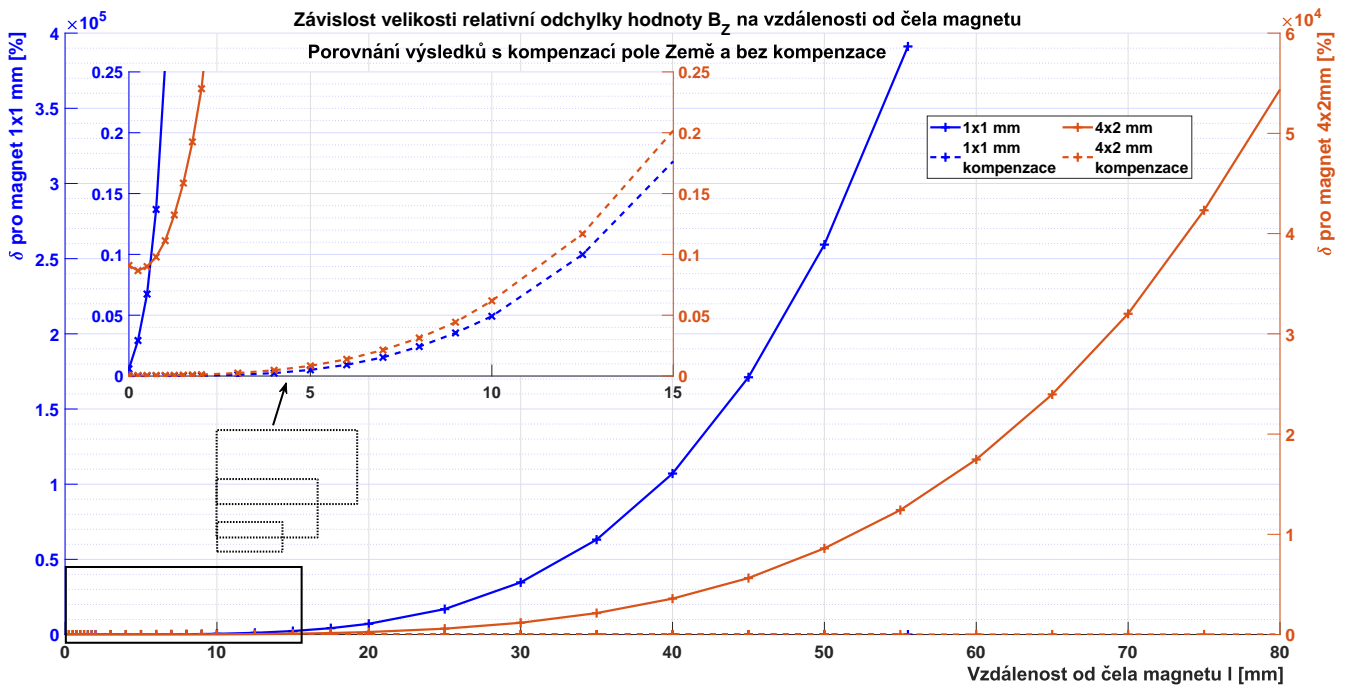
Obr. A.13: Zprůměrování simulace pro magnet 1x1,0 mm N42



## A.2 Grafy závislostí B na vlastnostech magnetů



Obr. A.14: Srovnání vlivu vrstvy pokovení pro magnety 1x1 mm a 4x2 mm (lepší varianta)



Obr. A.15: Relativní chyba měření způsobená polem Země pro osu z magnetometru

Výpis A.1: Algoritmus, který zprůměruje data přes plochu nastavenou parametry

```
1 %%ALGORITMUS NA PRUMEROVANI PRES OBLAST o R=0.2 MM
2 pocet_bodu=11;          %pocet bodu vystupu
3 vykreslit=1;           %prepinac vykresleni do grafu
4 inkr=1;                %%nastaveni inkrementu
5 xq_comp=xq_ansys;     %%nastaveni vektoru osy x
6 yq_comp=yq_ansys;     %%nastaveni vektoru osy y
7 zq_comp=vq_ansys;     %%nastaveni matice osy z
8 avg_val=NaN(pocet_bodu,pocet_bodu);
9 kresli=0;             %aby se objemny graf vykreslil jenom jednou
10 y=5;
11
12 for x=-5:inkr:5
13 C = [x y]; %poloha stredu kruhu v prostoru
14 r = 0.2; %polomer kruhu
15 x_k = C(1)+r*cos(linspace(0,2*pi));
16 y_k = C(2)+r*sin(linspace(0,2*pi));
17     for y=5:-inkr:-5
18         x_curr=int16((x+5)/inkr+1);
19         y_curr=int16((5-y)/inkr+1);
20         C = [x y];
21         x_k = C(1)+r*cos(linspace(0,2*pi));
22         y_k = C(2)+r*sin(linspace(0,2*pi));
23         kruh = inpolygon(xq_comp(:),yq_comp(:),x_k,y_k);
24         avg_val(y_curr,x_curr) = mean(zq_comp(kruh'));
25     if vykreslit
26         if kresli==0
27             figure
28             hold on
29             pcolor(xq_comp,yq_comp,zq_comp')
30             kresli=1;
31             pause(2);
32         end
33         plot(xq_comp(kruh),yq_comp(kruh),'or')
34         plot(x_k,y_k,'Color',[0,0,0],'LineWidth',4)
35         pause(0.1);
36     end
37     if y==5
38         y=5;
39     end
40 end
41 end
```



## B Obsah přiloženého DVD

Soubory .FEM z přílohy byly vytvořeny a jsou spustitelné v programu FEMM 4.2. Jedná se o freeware, lze stáhnout z adresy <http://www.femm.info/wiki/Download>. Po spuštění souborů .FEM je nutno provést výpočet, který v závislosti na hustotě sítě prvků a ploše oblasti může trvat dlouhou dobu a vyžádat si velké množství systémových prostředků. U většiny simulací v přílohách je výstup pro určité vzdálenosti od magnetu exportován do přiloženého textového souboru, případně je zapsán do .xlsx souboru.

```
/.....kořenový adresář přiloženého DVD
├── BP_Mereni_slabeho_magnetickeho_pole_ve_3D_prostoru.pdf ..... text práce
├── simulace ..... složka s daty simulací a s výstupy ze simulací
│   ├── sonda_vzdalenost ..... složka s výstupy simulace rozložení sondy
│   │   ├── mag_vzdalenosti_pro_sondu_magnet1x1.FEM1
│   │   ├── mag_vzdalenosti_pro_sondu_magnet4x2.FEM1
│   │   └── mag_vzdalenosti_zpracovana_data.xlsx
│   ├── zavislost_pokoveni ..... složka s výstupy simulace ochranné vrstvy
│   │   ├── magnet_1x1mm
│   │   │   ├── FEMM_output ..... data ze simulace v .txt
│   │   │   ├── mag_1x1_pokoveni_horsi_moznost.FEM
│   │   │   └── mag_1x1_pokoveni_lepsi_moznost.FEM
│   │   ├── magnet_4x2mm
│   │   │   ├── FEMM_output ..... data ze simulace v .txt
│   │   │   ├── mag_4x2_pokoveni_horsi_moznost.FEM
│   │   │   └── mag_4x2_pokoveni_lepsi_moznost.FEM
│   ├── zavislost_radius ..... složka s výstupy simulace rádia hrany magnetu
│   │   ├── 1x1_radius_0 ..... simulační soubor a výstup ze simulace v .txt
│   │   ├── 1x1_radius_0_05 ..... simulační soubor a výstup ze simulace v .txt
│   │   ├── 1x1_radius_0_10 ..... simulační soubor a výstup ze simulace v .txt
│   │   ├── 1x1_radius_0_15 ..... simulační soubor a výstup ze simulace v .txt
│   │   ├── 1x1_radius_0_20 ..... simulační soubor a výstup ze simulace v .txt
│   │   ├── 1x1_radius_0_25 ..... simulační soubor a výstup ze simulace v .txt
│   │   └── 1x1_radius_0_30 ..... simulační soubor a výstup ze simulace v .txt
│   ├── zavislost_rozmeru ..... složka s výstupy simulace vlivu rozměrů magnetu
│   │   ├── mag_1x1.FEM
│   │   ├── namerena_data_B.xlsx
│   │   └── readme.txt ..... info k simulaci závislosti na rozměru
├── sonda_navrh ..... složka s koncepcí sondy
│   ├── sonda.brd
│   ├── sonda.sch
│   ├── cam_job_Gatema ..... soubory pro výrobce Gatema
│   └── cam_job_PragoBoard ..... soubory pro výrobce PragoBoard
```

<sup>1</sup>Simuluje se velká oblast, náročné na RAM, čas a úložiště (≈ 1,7 GB)