



Permanентní magnety

Bakalářská práce

Studijní program: B1701 – Fyzika
Studijní obory: 1802R023 – Informatika se zaměřením na vzdělávání
7504R006 – Fyzika se zaměřením na vzdělávání

Autor práce: **Jaroslav Dlouhý**
Vedoucí práce: prof. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav Dlouhý**
Osobní číslo: **P14000577**
Studijní program: **B1701 Fyzika**
Studijní obory: **Informatika se zaměřením na vzdělávání**
Fyzika se zaměřením na vzdělávání
Název tématu: **Permanentní magnety**
Zadávající katedra: **Katedra fyziky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Typy permanentních magnetů, materiály a jejich vlastnosti.
2. Magnetická polarizace, tvary magnetů a směry polarizace.
3. Magnetické pole a síly mezi permanentními magnety.
4. Zobrazování magnetického pole pomocí indukčních čar a magnetické folie.
5. Experimenty a demonstrace magnetických polí permanentních magnetů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

O. Lepil, P. Šedivý: Fyzika pro gymnázia - Elektřina a magnetismus, Prometheus Praha 2000, ISBN 80-7196-202-3, str. 148154

F. Jáchim, J. Tesař: Fyzika pro 8.ročník ZŠ, SPN Praha 2000, ISBN 80-4235-125-7, str. 105110

D. Halliday, R. Resnick, J. Walker: Fyzika, Díl 3. Elektřina a magnetismus, Prometheus VUTIUM 2001, ISBN 81-7196-213-9, kapitola 32

Permanentní magnety - Co je třeba vědět o magnetech, firemní text, Feromagnet, s. r. o., Světlá Hora (<http://www.feromagnet.cz/o-magnetech>)


Vedoucí bakalářské práce:

prof. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.

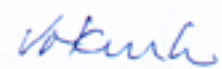
Katedra fyziky

Datum zadání bakalářské práce: **1. dubna 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26. dubna 2017**


prof. RNDr. Jan Pícek, CSc.
děkan




prof. Ing. Karel Vokurka, DrSc.
vedoucí katedry

dne

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Tímto bych rád vřele poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, prof. Mgr. Jiřímu Erhartovi, Ph.D., za odborné a pečlivé vedení, podnětné připomínky a trpělivost před termínem odevzdání.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi permanentních magnetů, materiály, ze kterých jsou vyrobeny, jejich využitím v praxi a vzájemnou interakcí mezi magnety a jejich okolím. Teoreticky zpracovává jev vzniku magnetického pole a jeho chování v látkovém prostředí, zejména se pak věnuje feromagnetickým látkám a permanentním magnetům z nich vyrobených. Z praktického hlediska se zabývá ověřením vlastností permanentních magnetů, zejména remanentní magnetické indukce a porovnáním neodymových, samarium-kobaltových a feritových magnetů. Demonstrace magnetických polí pomocí zobrazování flux detektorovou fólií, železnými pilinami a kapalinou ferrofluid je názornou ukázkou rozmanitosti výroby permanentních magnetů a jejich možností využití. V neposlední řadě se zmiňuje o některých moderních hračkách jako je Levitron a NeoCube.

Klíčová slova

permanentní magnet, magnetické pole, ferit, samarium, neodym, Levitron, NeoCube, flux detektor

Annotation

This bachelor thesis deals with characteristics of permanent magnets, the materials they are made of, their application and mutual interaction between magnets and surrounding area. Theoretically, it describes phenomenon of magnetic field formation and its behaviour inside the material environment, particularly ferromagnetic substances and the permanent magnets made of them. From a practical point of view, it deals with the characterization of permanent magnet properties, in particular, magnetic remanence and comparison of samarium - cobalt, ferrite and neodymium magnets. The demonstration of magnetic fields using flux detector foil, iron sawdust and ferrofluid liquid is an example of production diversity of permanent magnets and their use. Finally, it describes some interesting modern toys such as Levitron and NeoCube.

Key words

permanent magnet, magnetic field, ferrite, samarium, neodymium, Levitron, NeoCube, flux detector

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM GRAFŮ	13
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	14
ÚVOD	16
1 MAGNETISMUS	17
1.1 POJEM MAGNET.....	17
1.2 MAGNETICKÉ INDUKČNÍ ČÁRY.....	18
1.3 OZNAČENÍ MAGNETICKÝCH PÓLŮ.....	18
1.4 VZNIK MAGNETICKÉHO POLE.....	19
1.5 MAGNETICKÝ DIPÓLOVÝ MOMENT.....	21
1.5.1 <i>Magnetický dipól</i>	21
1.5.2 <i>Magnetický moment atomu</i>	22
1.6 MAGNETIZACE.....	23
1.7 PERMEABILITA A SUSCEPTIBILITA.....	24
1.8 LÁTKY DIAMAGNETICKÉ A PARAMAGNETICKÉ.....	25
1.9 MAGNETICKY USPOŘÁDANÉ LÁTKY.....	25
1.10 FEROMAGNETICKÉ LÁTKY.....	26
1.11 CURIEOVA TEPLOTA.....	27
1.12 PRŮBĚH MAGNETIZACE FEROMAGNETIKA.....	28
1.13 KŘIVKA PRVOTNÍ MAGNETIZACE.....	29
1.14 HYSTEREZNÍ SMYČKA, REMANENTNÍ MAGNETIZACE A KOERCITIVITA.....	29
1.15 MAGNETICKY MĚKKÉ A TVRDÉ MATERIÁLY.....	30
2 PERMANENTNÍ MAGNETY	31
2.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY PERMANENTNÍCH MAGNETŮ.....	31
2.2 MAGNETICKY TVRDÉ FERITY.....	32
2.3 ALNICO MAGNETY.....	35
2.4 MAGNETY ZE VZÁCNÝCH ZEMIN.....	36
2.4.1 <i>Samarium-kobaltové magnety</i>	38
2.4.2 <i>Neodymové magnety</i>	40
2.5 KOMPOZITNÍ MAGNETY.....	42
2.6 TVARY MAGNETŮ A SMĚR MAGNETIZACE.....	43

3	MAGNETICKÉ POLE A SÍLY MEZI PERMANENTNÍMI MAGNETY	46
3.1	SILOVÉ ÚČINKY MAGNETICKÉHO POLE	46
3.2	PŘÍDRŽNÁ SÍLA MAGNETU	48
4	MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE PERMANENTNÍHO MAGNETU	50
4.1	MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE TESLAMETREM.....	50
4.2	VYBRANÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	51
4.3	VÝBĚR VZORKŮ MAGNETŮ PRO MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE	51
4.4	MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE PRO RŮZNÉ TVARY MAGNETŮ.....	52
4.4.1	<i>Měření válcového feritového magnetu KT 12-10/F30</i>	<i>53</i>
4.4.2	<i>Měření magnetické indukce samariového magnetu KT-18-06-S/YXG30</i>	<i>54</i>
4.4.3	<i>Měření krychlového magnetu KS-10-N/N42</i>	<i>55</i>
4.4.4	<i>Měření prstencového magnetu KR-26-16-05-N/N42</i>	<i>56</i>
4.4.5	<i>Měření kulového magnetu NM-E 13N-M5/N38.....</i>	<i>57</i>
4.5	POROVNÁNÍ MAGNETŮ SHODNÝCH ROZMĚRŮ Z RŮZNÝCH MATERIÁLŮ	58
4.5.1	<i>Měření válcových magnetů o rozměrech $\varnothing 10 \times 10$ mm</i>	<i>58</i>
4.5.2	<i>Měření válcových magnetů o rozměrech $\varnothing 20 \times 5$ mm</i>	<i>59</i>
4.5.3	<i>Měření pěti kusů magnetů o rozměrech $\varnothing 20 \times 5$ mm</i>	<i>60</i>
5	MĚŘENÍ MAGNETICKÉ POLARIZACE KOMPENZAČÍ TÍHOVOU SILOU.....	62
5.1	MĚŘENÍ MAGNETICKÉ POLARIZACE MAGNETU KT-20-5N/N42	62
6	ZOBRAZOVÁNÍ MAGNETICKÉHO POLE	64
6.1	ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE VÁLCOVÝCH MAGNETŮ NM-A $\varnothing 20 \times 5$ MM	65
6.2	ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE MAGNETU TVARU KOULE	68
6.3	ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE KRYCHLOVÝCH MAGNETŮ KS-10-N/N42	70
6.4	MAGNETICKÉ POLE MULTIPÓLOVĚ MAGNETOVANÉHO FERITU FMI-A $\varnothing 22 \times 8$ MM	73
6.5	ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE TYČOVÝCH MAGNETŮ T-10-40-N/N42.....	75
6.6	ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE ZAPALOVACÍHO ROTORU	77
6.7	ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE ELEKTROMOTORKU	78
6.8	ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE MAGNETICKÉ HRAČKY NEOCUBE	80
6.9	DEMONSTRACE EFEKTNÍCH OBRAZCŮ.....	83
6.10	ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE PLASTICKÝCH MAGNETŮ.....	84
7	ROTAČÍ STABILIZOVANÁ MAGNETICKÁ LEVITACE (LEVITRON)	86
8	DEMONSTRACE ÚČINKŮ MAGNETICKÝCH POLÍ PM	89
8.1	MAGNETY PŘEKONÁVAJÍCÍ TÍHOVOU SÍLU	89
8.2	PROSTUP MAGNETICKÉHO POLE LÁTKOU	89
	ZÁVĚR	91

Seznam obrázků

VZOREK MAGNETOVCE – MAGNETITU.	17
REKONSTRUKCE STAROVĚKÉHO ČÍNSKÉHO KOMPASU.	17
ZNÁZORNĚNÍ PERMANENTNÍHO MAGNETU A INDUKČNÍCH ČAR.	18
ZNÁZORŇOVÁNÍ INDUKČNÍCH ČAR KOLMÝCH K NÁKRESNĚ.	19
LORENTZOVA TRANSFORMACE DVOU PARALELNĚ SE POHYBUJÍCÍCH NÁBOJŮ.	19
SCHEMATA ZÁKLADNÍCH TYPŮ MAGNETICKÉHO USPOŘÁDÁNÍ.	26
MAGNETICKÉ DOMÉNY BEZ VNĚJŠÍHO MAGNETICKÉHO POLE A PŘI VLOŽENÍ DO VNĚJŠÍHO MAGNETICKÉHO POLE.	27
PRŮBĚH MAGNETIZACE FEROMAGNETICKÉ LÁTKY VE VNĚJŠÍM MAGNETICKÉM POLI.	28
KŘIVKA PRVOTNÍ MAGNETIZACE.	29
HYSTEREZNÍ SMYČKY $M(H)$ A $B(H)$	30
DEMAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKA PERMANENTNÍHO MAGNETU.	32
KRYSTALOGRAFICKÁ BUŇKA KRYSTALU $BaFe_{12}O_{19}$	33
SCHEMA VÝROBNÍHO PROCESU FERITOVÝCH MAGNETŮ.	34
TECHNOLOGIE VÝROBY ALNICO MAGNETŮ.	35
VÝROBNÍ SCHÉMA MAGNETŮ ZE VZÁCNÝCH ZEMIN.	37
BUŇKA KRYSTALU $SmCo_5$ A Sm_2Co_{17}	38
KRYSTALOGRAFICKÁ BUŇKA $Ne_2Fe_{14}B$	40
SMĚR MAGNETIZACE DISKOVÝCH A VÁLCOVÝCH MAGNETŮ.	44
SMĚR MAGNETIZACE KVÁDROVÝCH MAGNETŮ.	44
MOŽNOSTI MAGNETOVÁNÍ PRSTENCOVÝCH MAGNETŮ.	44
MOŽNOSTI MAGNETOVÁNÍ SEGMENTOVÝCH MAGNETŮ.	45
MOŽNOSTI MAGNETOVÁNÍ MAGNETŮ TVARU KOULE.	45
SCHEMA PRO VÝPOČET MAGNETICKÉ INDUKCE RŮZNÝCH TVARŮ MAGNETŮ.	48
DIAGRAM PRO URČENÍ MĚRNÉ PŘÍDRŽNÉ SÍLY.	49
SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ PRINCIPU HALLOVA JEVU.	50
POLARIZACE DVOU MAGNETŮ ŘAZENÝCH ZA SEBOU.	65
DVA KUSY NEODYMOVÝCH MAGNETŮ NM-A $\varnothing 20 \times 5$ MM.	65
FLUX DETEKTOROVÁ FÓLIE NA DVOU VÁLCOVÝCH MAGNETECH KOLMO K OSE MAGNETIZACE.	66
FLUX DETEKTOROVÁ FÓLIE NA DVOU VÁLCOVÝCH MAGNETECH PODÉL OSY MAGNETIZACE.	66
FLUX DETEKTOROVÁ FÓLIE UMÍSTĚNÁ PODÉL OSY MAGNETIZACE NA PĚTI VÁLCOVÝCH MAGNETECH.	66
KAPALINA FERROFLUID VE VZDÁLENOSTI 2 CM OD VÁLCOVÝCH MAGNETŮ.	67
KAPALINA FERROFLUID V TĚSNÉ BLÍZKOSTI OD VÁLCOVÝCH MAGNETŮ.	67
MAGNETICKÉ POLE NEDOVLÍ KAPALINĚ FERROFLUID UNIKNOUT Z MISKY.	68
NEODYMOVÝ MAGNET TVARU KOULE NM-E 13N-M5/N38.	68
KROUŽEK Z DESETI NEODYMOVÝCH MAGNETŮ TVARU KOULE.	69
FLUX DETEKTOROVÁ FÓLIE NA KULOVÉM MAGNETU KOLMO K OSE MAGNETIZACE.	69

FLUX DETEKTOROVÁ FÓLIE NA KULOVÉM MAGNETU PODÉL OSY MAGNETIZACE.	70
FLUX DETEKTOROVÁ FÓLIE UMÍSTĚNÁ PODÉL OSY MAGNETIZACE NA DESETI KULOVÝCH MAGNETECH ODDĚLENÝCH PLASTOVOU PODLOŽKOU.	70
POLARIZACE DVOU KRYCHLOVÝCH MAGNETŮ PRO ZOBRAZENÍ KAPALINOU FERROFLUID.	71
DVA KUSY NEODYMOVÝCH KRYCHLOVÝCH MAGNETŮ.....	71
FERROFLUID ZOBRAZUJÍCÍ MAGNETICKÉ POLE KRYCHLOVÝCH MAGNETŮ V USPOŘÁDÁNÍ SJ-SJ.....	72
FERROFLUID ZOBRAZUJÍCÍ MAGNETICKÉ POLE KRYCHLOVÝCH MAGNETŮ V USPOŘÁDÁNÍ V OPOZICI OPAČNÝCH PÓLŮ.....	72
FERROFLUID ZOBRAZUJÍCÍ MAGNETICKÉ POLE KRYCHLOVÝCH NEODYMOVÝCH MAGNETŮ V USPOŘÁDÁNÍ V OPOZICI OPAČNÝCH PÓLŮ Z BOČNÍ POHLEDOVÉ STRANY.	72
POLARIZACE MULTIPÓLOVĚ MAGNETOVANÉHO FERITOVÉHO MAGNETU FMI-A \varnothing 22 \times 8 MM	73
FERITOVÝ MAGNET FMI-A \varnothing 22 \times 8 MM	73
ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE MULTIPÓLOVĚ MAGNETOVANÉHO MAGNETU FLUX DETEKTOREM.....	74
ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE MULTIPÓLOVĚ MAGNETOVANÉHO MAGNETU ŽELEZNÝMI PILINAMI.....	74
ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE MULTIPÓLOVĚ MAGNETOVANÉHO MAGNETU KAPALINOU FERROFLUID.....	74
USPOŘÁDÁNÍ A POLARIZACE TYČOVÝCH NEODYMOVÝCH MAGNETŮ.	75
DVA NEODYMOVÉ TYČOVÉ MAGNETY T-10-40-N/N42.	76
ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE DVOU TYČOVÝCH MAGNETŮ SOUHLASNÝMI PÓLY U SEBE.....	76
ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE DVOU MAGNETŮ UMÍSTĚNÝCH SOUHLASNÝMI PÓLY CCA 3 CM OD SEBE.	76
ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉHO POLE DVOU NEODYMOVÝCH TYČOVÝCH MAGNETŮ ŽELEZNÝMI PILINAMI UMÍSTĚNÝCH OPAČNÝMI PÓLY CCA 4 CM OD SEBE.	77
ROTOR ZAPALOVÁNÍ ČZ 125/150	77
MAGNETICKÉ POLE ROTORU ZAPALOVÁNÍ ČZ 125/150 ZOBRAZENÉ FLUX DETEKTOROVOU FÓLÍÍ.	78
MAGNETICKÉ POLE ROTORU ZAPALOVÁNÍ ČZ 125/150 ZOBRAZENÉ ŽELEZNÝMI PILINAMI.	78
ČÁST ROTORU ELEKTROMOTORKU CD-ROM.	79
NEODYMOVÝ PRSTENCOVÝ MAGNET ZE STATORU ELEKTROMOTORKU CD-ROM.....	79
MAGNETICKÉ POLE ROTORU ELEKTROMOTORKU CD-ROM ZOBRAZENÉ FLUX DETEKTOROVOU FÓLÍÍ.	79
MAGNETICKÉ POLE PRSTENCOVÉHO MAGNETU STATORU ELEKTROMOTORKU CD-ROM.....	80
MAGNETICKÁ HRAČKA NEOCUBE.	80
NEOCUBE SESTAVENÁ DO TVARU ŠESTIÚHELNÍKU.	81
STĚNY NEOCUBE ZOBRAZENÉ FLUX DETEKTOROVOU FÓLÍÍ.	82
ŠESTIÚHELNÍK Z KULÍČEK NEOCUBE ZOBRAZENÝ FLUX DETEKTOROVOU FÓLÍÍ.....	81
USPOŘÁDÁNÍ MAGNETEK PRO "SNĚHOVOU VLOČKU".	83
"SNĚHOVÁ VLOČKA" ZOBRAZENÁ FLUX DETEKTOROVOU FÓLÍÍ.	83
JEDNOSTRANNÁ MULTIPÓLOVÁ MAGNETIZACE DĚTSKÉ MAGNETKY NA LEDNICI ZOBRAZENÁ FLUX DETEKTOROVOU FÓLÍÍ.	84
JEDNOSTRANNÁ MULTIPÓLOVÁ MAGNETIZACE MAGNETICKÉ FÓLIE ZOBRAZENÁ FLUX DETEKTOROVOU FÓLÍÍ.....	85
JEDNOSTRANNÁ MULTIPÓLOVÁ MAGNETIZACE MAGNETICKÉ PÁSKY ZOBRAZENÁ FLUX DETEKTOROVOU FÓLÍÍ.....	85
PŘEMAGNETOVANÁ OBLAST PLASTICKÉ MAGNETICKÉ PÁSKY PO PŘILOŽENÍ SILNÉHO NEODYMOVÉHO MAGNETU.	85
SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ROTACÍ STABILIZOVANÉHO LEVITRONU.	86

TVAR MAGNETICKÝCH INDUKČNÍCH ČAR PRSTENCOVÉHO MAGNETU. MODELOVÁNO V PROGRAMU FEMM.	86
KOMERČNÍ LEVITRON S KÁČOU.	88
MAGNETICKÉ POLE ZÁKLADNÍHO TĚLESA LEVITRONU ZACHYCENÉ FLUX DETEKTOROVOU FÓLÍÍ.	88
LEVITRON A ROTUJÍCÍ KÁČA NAD ZÁKLADNÍM TĚLESEM.	88
VZÁJEMNÉ SILOVÉ ÚČINKY MAGNETICKÝCH POLÍ PERMANENTNÍHO MAGNETU A PŘEKONÁNÍ TÍHOVÉ SÍLY.	89
PROSTUP MAGNETICKÉHO POLE 4 MAGNETŮ TVARU VÁLCE SKRZE OCELOVÝ PLECH.	90
PROSTUP MAGNETICKÉHO POLE 4 MAGNETŮ TVARU VÁLCE SKRZE HLINÍKOVÝ PLECH.	90

Seznam tabulek

MAGNETICKÉ MOMENTY \mathbf{m} VYBRANÝCH ATOMŮ	23
SATURAČNÍ MAGNETIZACE VYBRANÝCH FEROMAGNETIK.....	24
HODNOTY MAGNETICKÉ SUSCEPTIBILITY VYBRANÝCH LÁTEK	25
CURIEOVA TEPLOTA VYBRANÝCH MATERIÁLŮ	27
KOERCITIVITY VYBRANÝCH MATERIÁLŮ	31
MAGNETICKÉ CHARAKTERISTIKY FERITOVÝCH MATERIÁLŮ	34
MAGNETICKÉ VLASTNOSTI VYBRANÝCH LISOVANÝCH ALNiCo MAGNETŮ	36
MAGNETICKÉ VLASTNOSTI VYBRANÝCH MATERIÁLŮ SmCo_5	39
MAGNETICKÉ VLASTNOSTI VYBRANÝCH MATERIÁLŮ $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	40
MAG. VLASTNOSTI VYBRANÝCH $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ MAGNETŮ S PRACOVNÍ TEPLOTOU DO 80 °C.	41
MAG. VLASTNOSTI VYBRANÝCH VSTŘIKOVANÝCH KOMPOZITNÍCH MAGNETŮ	42
MAG. VLASTNOSTI VYBRANÝCH LEPENÝCH KOMPOZITNÍCH MAGNETŮ	43
VZORCE PRO VÝPOČET MAGNETICKÉ INDUKCE MAGNETU V AXIÁLNÍ OSE	47
PARAMETRY TESLAMETRU PHYWE PRO MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE STACIONÁRNÍHO POLE	51
PARAMETRY TESLAMETRU AKAIGU WT10A PRO MĚŘENÍ MAG. INDUKCE STACIONÁRNÍHO POLE.....	51
PARAMETRY VZORKŮ UVEDENÝCH DODAVATELEM MAGNETŮ POUŽITÝCH PŘI MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE.....	52
NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY MĚŘENÍ MAGNETŮ S ROZMĚRY $\varnothing 10 \times 10$ MM	58
NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY MĚŘENÍ MAGNETŮ S ROZMĚRY $\varnothing 20 \times 5$ MM	60
NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY MĚŘENÍ 5 KUSŮ MAGNETŮ S ROZMĚRY $\varnothing 20 \times 5$ MM	61

Seznam grafů

ZÁVISLOST MAGNETICKÉ INDUKCE NA VZDÁLENOSTI V AXIÁLNÍ OSE VÁLCOVÉHO MAGNETU KT-12-10/F30	53
ZÁVISLOST MAGNETICKÉ INDUKCE NA VZDÁLENOSTI V AXIÁLNÍ OSE VÁLCOVÉHO MAGNETU KT-18-06-S/YXG30	54
ZÁVISLOST MAGNETICKÉ INDUKCE NA VZDÁLENOSTI V AXIÁLNÍ OSE MAGNETU TVARU KRYCHLE KS-10-N/N42	55
ZÁVISLOST MAGNETICKÉ INDUKCE MĚŘENÉ V AXIÁLNÍ OSE PRSTENCOVÉHO MAGNETU KR-26-16-05-N/N42	56
ZÁVISLOST MAGNETICKÉ INDUKCE NA VZDÁLENOSTI V AXIÁLNÍ OSE MAGNETIZACE KULOVÉHO MAGNETU NM-E 13N/N38	57
MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE V OSE FERITOVÉHO, SAMARIUM-KOBALTOVÉHO A NEODYMOVÉHO VÁLCOVÉHO MAGNETU S ROZMĚRY $\varnothing 10 \times 10$ MM.....	59
MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE V OSE FERITOVÉHO, SAMARIUM-KOBALTOVÉHO A NEODYMOVÉHO VÁLCOVÉHO MAGNETU S ROZMĚRY $\varnothing 20 \times 5$ MM.....	60
MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE V OSE 5 KUSŮ FERITOVÝCH A NEODYMOVÝCH MAGNETŮ ($\varnothing 20 \times 5$ MM)	61
ZÁVISLOST TÍHOVÉ SÍLY NA GEOMETRICKÉM FAKTORU A PROLOŽENÍ PŘÍMKOU LINEÁRNÍ REGRESE.	63

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
a	[m]	strukturní parametr buňky krystalu
B	[T]	magnetická indukce
B_r	[T]	remanentní magnetická indukce
$(BH)_{max}$	[Jm ⁻³]	maximální energetický produkt
c	[m]	strukturní parametr buňky krystalu
c	[ms ⁻¹]	rychlost světla ve vakuu
C	[-]	Curieho konstanta
d	[m]	šířka
D	[m]	průměr
e	[C]	elementární náboj
E	[J]	energie
E	[Vm ⁻¹]	intenzita elektrického pole
f	[m ⁻³]	geometrický faktor tělesa
F	[N]	síla (Lorentzova)
h	[m]	výška
h	[Js]	Planckova konstanta
\hbar	[Js]	redukovaná Planckova konstanta
H	[Am ⁻¹]	intenzita magnetického pole
H_c	[Am ⁻¹]	koercitivní intenzita magnetického pole
H_{cB}	[Am ⁻¹]	vnější koercitivní intenzita magnetického pole
H_{cJ}	[Am ⁻¹]	vnitřní koercitivní intenzita magnetického pole
i	[-]	jednotkový vektor ve směru osy x
I	[A]	elektrický proud
j	[-]	jednotkový vektor ve směru osy y
J	[T]	magnetická polarizace
k	[-]	jednotkový vektor ve směru osy z
l	[m]	délka
l	[-]	vedlejší kvantové číslo
L	[m]	délka
m_e	[kg]	hmotnost elektronu
m_o	[JT ⁻¹]	orbitální magnetický moment elektronu
m_s	[JT ⁻¹]	spinový magnetický moment elektronu

m	[JT ⁻¹]	magnetický moment atomu
M	[Am ⁻¹]	magnetizace
M	[Nm]	moment síly
M_o	[Am ⁻¹]	saturační magnetizace
M_s	[Am ⁻¹]	spontánní magnetizace
M_r	[Am ⁻¹]	remanentní magnetizace
p_o	[kgm ² s ⁻¹]	orbitální moment hybnosti elektronu
p_s	[kgm ² s ⁻¹]	spinový moment hybnosti elektronu
q	[C]	elektrický náboj
r	[m]	radiální vzdálenost
R	[m]	poloměr
R_H	[m ³ A ⁻¹ s ⁻¹]	Hallova konstanta
s	[-]	spinové číslo
S	[m ²]	plocha
S, S'	[-]	vztažná soustava
U_H	[V]	Hallove napětí
T_c	[°C]	Curieho teplota
v	[ms ⁻¹]	rychlost
V	[m ³]	objem
x	[m]	vzdálenost ve směru osy x
y	[m]	vzdálenost ve směru osy y
z	[m]	vzdálenost ve směru osy z
γ	[-]	Lorentzův faktor
ϵ_0	[Fm ⁻¹]	permitivita vakua
μ_r	[-]	relativní permeabilita
μ_0	[Hm ⁻¹]	permeabilita vakua
μ	[Hm ⁻¹]	permeabilita prostředí

Úvod

Permanentní magnety obklopují život každého jedince v moderní evropské společnosti. Bez nich bychom těžko konstruovali elektrické stroje, které nám ulehčují život, ať jsou to komutátorové elektrické motory, součásti zapalování spalovacích motorů, různé přídržné systémy, reproduktory, magnetické separátory, měřící technika a mnoho dalších aplikací. Protože se s nimi setkáváme každý den, je potřeba dobře znát jejich vlastnosti a možnosti využití.

Magnetismus je začleněn v kurikulárních dokumentech České Republiky v rámci výuky fyziky, kde je očekávaným výstupem praktické využití poznatků o působení magnetického pole na magnet a cívku s proudem a obeznámí se se silovými účinky magnetických polí. Magnetismus je tedy nedílnou součástí výuky každého žáka.

V této bakalářské práci se čtenář seznámí s teorií vzniku magnetického pole jako důsledku relativistické korekce elektrostatické síly Coulombova zákona, s vysvětlením chování různých látek v magnetickém poli, s magnetizací makroskopických těles jako důsledek hromadného účinku magnetických orbitálních a spinových momentů, se silovými účinky magnetického pole, dále pak s hlavními parametry látek využívaných pro výrobu permanentních magnetů různých tvarů a směrů magnetizace a technologií jejich výroby.

V experimentální části budou pak proměřeny magnetické indukce vzorků magnetů některých základních tvarů a ověřeny vzorce pro výpočet magnetické indukce v ose magnetizace. Proběhne také porovnání magnetů stejných rozměrů vyrobených z různých materiálů, měření magnetické polarizace kompenzací tíhovou silou a ověření efektivní remanentní magnetické indukce.

Dále budou využity některé metody pro zobrazování magnetických polí pomocí železných pilin, flux detektorovou fólií a kapalinou ferrofluid, nakonec budou zvoleny experimenty s magnetickými hračkami Levitron a NeoCube.

1 Magnetismus

Každý z nás se již v životě setkal s permanentním magnetem, malým předmětem z materiálu, který na první pohled zaujme svým chováním. Při manipulaci s permanentními magnety zjistíme, že některé materiály, jako je železo, kobalt a nikl, přitahuje, na jiné nepůsobí. Také lze snadno ukázat, že mezi různými stranami magnetů existují síly přitažlivé a odpudivé. Tyto strany, na něž můžeme nahlížet jako na zdroje magnetického pole, nazýváme póly magnetu.

1.1 Pojem magnet

Pojem magnet pochází nejspíše z řeckého slova $\mu\alpha\gamma\eta\tau\eta\varsigma$ - „magnítis“ a bývá spojováno s lokalitou v severovýchodní části evropského Řecka s názvem „Magnésia“. Obdobný název měla dvě místa v Přední Asii (současném Turecku). Na těchto místech byla bohatá povrchová naleziště železné rudy a přirozeného magnetu - minerálu magnetovec (magnetit Fe_3O_4) (viz *Obrázek 1*).



Obrázek 1: Vzorek magnetovce – magnetitu.

Nejsou doklady o tom, že ve starověkém Řecku by byly vlastnosti magnetovce využívány. To však neplatí o jiné starověké civilizaci – Číně, kde byly sestrojeny první kompasu z našeho pohledu netradiční konstrukce. Čínské kompasu byly vytvarovány z magnetitu do tvaru lžičky, která se volně otáčela na vyhlazené měděné či bronzové podložce (viz *Obrázek 2*). [1 s. 4–6]



Obrázek 2: Rekonstrukce starověkého čínského kompasu. Převzato z [1 s. 6]

1.2 Magnetické indukční čáry

Ke znázornění magnetického pole se používají magnetické indukční čáry, což jsou směrově orientované čáry, jejichž tečny jsou shodné s vektorem magnetické indukce \mathbf{B} v každém bodě. Směr čáry se označuje šipkou a hustota indukčních čar je úměrná velikosti gradientu (změny) magnetické indukce \mathbf{B} .

Magnetické pole je pole vírové, nikoli zdrojové jako u elektrického pole okolo stacionárního elektrického náboje, znamená to, že takové pole nemá svůj počáteční ani koncový bod a magnetické indukční čáry jsou tedy uzavřené. Ze severního pólu vycházejí z tělesa, jižním pólem se vrací zpět a jsou uzavřené vnitřkem tělesa (viz *Obrázek 3*).

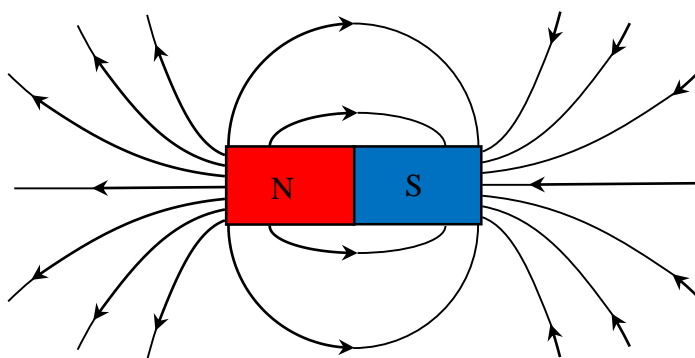
V případě, že je potřeba znázornit indukční čáry kolmo k náněsň, tedy, že vektor magnetické indukce \mathbf{B} vstupuje či vystupuje kolmo například k papíru, vyznačují se magnetické indukční čáry dle obrázku 4 (viz *Obrázek 4*). [3] [4][2 s. 5]

1.3 Označení magnetických pólů

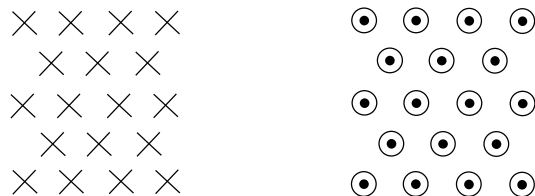
Označování magnetických pólů bylo stanoveno dohodou. (viz *Obrázek 3*)

- a) „SEVERNÍ“ pól – „S“ (mezinárodní označení „N“ z anglického „NORTH“) označuje dle dohody místo, kde magnetické indukční vystupují z tělesa (např. permanentní magnet) a bývá označen barevným (často červeným) pruhem.
- b) „JIŽNÍ“ pól – „J“ (mezinárodní označení „S“ z anglického „SOUTH“) označuje dle dohody místo, kde magnetické indukční čáry vstupují zpět do tělesa (např. permanentní magnet) a většinou není označen (v některých případech modře, zeleně či černě).

;[3][4] [2 s. 5]



Obrázek 3: Znázornění permanentního magnetu a indukčních čar.



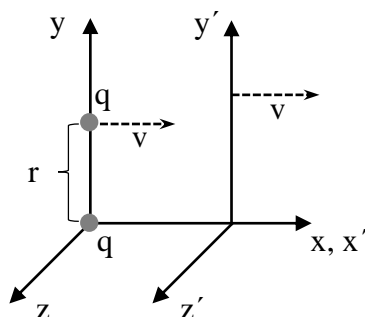
Vektor **B** vstupuje do papíru.

Vektor **B** vystupuje z papíru.

Obrázek 4: Znázorňování indukčních čar kolmých k náběžné.

1.4 Vznik magnetického pole

Magnetické pole je produkováno okolo každého pohybujícího se náboje, např. kolem vodiče, kterým protéká elektrický proud. Při popisu vzniku magnetického pole vyjdeme z popisu sil mezi dvěma náboji q pohybujícími se stálou rychlostí v podél dlouhého vodiče ve směru x , se vzájemnou stálou vzdáleností r ve směru osy y ve vztažné soustavě S . Z pohledu vztažné soustavy S' pohybující se relativně vůči soustavě S rychlostí v , jsou náboje q v klidu se vzájemnou vzdáleností r (viz Obrázek 5).[5]



Obrázek 5: Lorentzova transformace dvou paralelně se pohybujících nábojů

Síly mezi náboji budou z pohledu těchto dvou vztažných soustav rozdílné, tento rozdíl závislý na rychlosti je relativistickou korekcí elektrostatické síly, tedy Lorentzovou transformací Coulombova zákona [6 s. 567].

Ve vztažné soustavě S' platí z Coulombova zákona:

$$F'_x = 0$$

$$F'_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r^2} \quad (1.1)$$

$$F'_z = 0$$

ve vztažné soustavě S pohybující se rychlostí v :

$$F_x = 0$$

$$F_y = \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1.2)$$

$$F_z = 0$$

pro $\gamma = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}$, pro složku ve směru y platí:

$$F_y = \gamma \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1.3)$$

pro $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$ a po úpravě:

$$F_y = \gamma \left(\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} - \frac{\mu_0 q^2 v^2}{4\pi r^2}\right) \quad (1.4)$$

Pro malé rychlosti, kde $v \ll c$, je možné položit parametr $\gamma = 1$.

$$F_y = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} - \frac{\mu_0 q^2 v^2}{4\pi r^2} \quad (1.5)$$

První část vztahu (1.5) je elektrostatická síla (Coulombův zákon) mezi náboji a ve druhé části nalezneme vyjádření korekce sil pohybujícího se náboje, kterou nazveme „magnetickou silou“. Převedením do vektorové formy (\mathbf{j} ve směru síly):

$$\mathbf{F} = q \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}\right) \mathbf{j} - q \left(\frac{\mu_0 q v^2}{4\pi r^2}\right) \mathbf{j}, \quad (1.6)$$

zavedením elektrického pole ve směru \mathbf{j} a pro $\mathbf{j} = -\mathbf{i} \times \mathbf{k}$ je výpočet *Lorentzovy síly*:

$$\mathbf{F} = q \left[\mathbf{E} - \frac{\mu_0 q v^2}{4\pi r^2} (-\mathbf{i} \times \mathbf{k}) \right] \quad (1.7)$$

Tento vztah je možné dále upravit a definovat náboj pohybující se vodičem $q\mathbf{v} = I\delta\mathbf{l}$ a vektor rychlosti $\mathbf{v} = v\mathbf{i}$ ve směru pohybu náboje jako vyjádření *Biot-Savartova zákona*.

$$\mathbf{F} = q \left(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \frac{\mu_0 I \delta\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{4\pi r^3} \right). \quad (1.7)$$

Tento zákon je často přepsán zavedením vektoru magnetické indukce a vektoru intenzity magnetického pole

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mu_0 q\mathbf{v} \times \mathbf{H} \quad (1.8)$$

$$\delta\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{I\delta\mathbf{l}}{r^3} \times \mathbf{r} \quad (1.9)$$

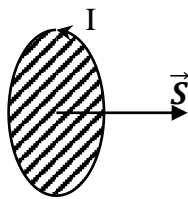
Vektor \mathbf{H} je *intenzita magnetického pole*. Závisí na proudu I [A] procházejícím elementem dráhy $\delta\mathbf{l}$ a na radiální vzdálenosti r [m]. Její jednotkou je tedy ampér na metr [Am^{-1}] [5][6 s. 3,4]

1.5 Magnetický dipólový moment

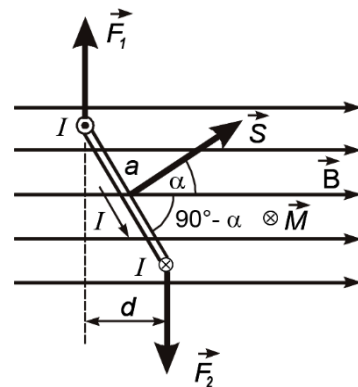
Pro popis chování pohybujícího se náboje v magnetickém poli se využívá popis uzavřené proudové smyčky umístěné ve vnějším homogenním magnetickém poli.

1.5.1 Magnetický dipól

Místo „běžné“ plochy se zavádí vektor plochy \mathbf{S} uzavřený v proudové smyčce s proudem I , jehož směr je stanoven podle pravidla pravé ruky (viz *Obrázek 6*). Při vložení proudové smyčky do vnějšího homogenního magnetického pole (viz *Obrázek 7*) platí, že síly \mathbf{F}_1 a \mathbf{F}_2 jsou opačně orientované s velikostí $F_1 = F_2 = I \cdot b \cdot B$ a vytváří dvojici sil s ramenem $d = a \cdot \sin\alpha$ o velikosti $M = F_1 \cdot d = I \cdot b \cdot B \cdot a \cdot \sin\alpha = I \cdot S \cdot B \cdot \sin\alpha$. Při zvážení vzájemné orientace vektorů \mathbf{S} a \mathbf{B} , platí:



Obrázek 6: Vektor plochy \mathbf{S} proudové smyčky s proudem I



Obrázek 7: Silové účinky homogenního magnetického pole na proudovou smyčku. Převzato z [7 s. 259]

$$\mathbf{M} = I\mathbf{S} \times \mathbf{B} \quad (1.10)$$

Vektor momentu síly \mathbf{M} je shodný se směrem osy, kolem které se otáčí proudová smyčka. *Magnetický moment* \mathbf{m} charakterizuje pohyb proudové smyčky v magnetickém poli $\mathbf{m} = I\mathbf{S}$. Tuto proudovou smyčku s magnetickým momentem nazveme *magnetický dipól*. [7 s. 259–260]

$$\mathbf{M} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \quad (1.11)$$

1.5.2 Magnetický moment atomu

Magnetické vlastnosti látek jsou dány magnetickým stavem atomů látky, především pak stavem elektronového obalu. K celkovému magnetickému momentu atomu přispívá orbitální magnetický moment, magnetický spin elektronů a vnější magnetické pole ovlivňující pohyb elektronu kolem jádra. [5]

Dle klasického modelu atomu obíhají elektrony (záporné elementární náboje) po kružnicových drahách a tvoří tak proudovou smyčku s magnetickým dipólovým momentem \mathbf{m} dle (1.12). Vytváří tedy *orbitální magnetický moment elektronu* \mathbf{m}_o :

$$\mathbf{m}_o = -\frac{e}{2m_e} \mathbf{p}_o, \quad (1.12)$$

kde \mathbf{p}_o je orbitální moment hybnosti. V kvantové mechanice jsou dráhy elektronů kvantovány, tedy i orbitální magnetický moment elektronu je kvantován jako $p_o = l\hbar$, kde l je vedlejší kvantové číslo a \hbar je redukovaná Planckova konstanta ($\hbar = h/2\pi$).

Elektron je v kvantové mechanice charakterizován vlastností spinového momentu hybnosti \mathbf{p}_s , tedy jakési představy rotace elektronu. Této rotaci přísluší *spinový magnetický moment* \mathbf{m}_s :

$$\mathbf{m}_s = -\frac{e}{m_e} \mathbf{p}_s \quad (1.13)$$

Rovněž spinový moment hybnosti je kvantován pomocí spinového čísla s : $p_s = s\hbar$. Výsledný *magnetický moment atomu* je součtem orbitálního magnetického momentu elektronu a spinového magnetického momentu. [6 s. 259–263]

$$\mathbf{m} = \mathbf{m}_o + \mathbf{m}_s = \left(-\frac{e}{2m_e}\right) (2\mathbf{p}_s + \mathbf{p}_o) \quad (1.14)$$

Výsledný vektor magnetického momentu atomu je vektorovým součtem orbitálního a spinového magnetického momentu všech elektronů daného atomu. Protože

elektrony mají různé prostorové orientace momentu hybnosti, při velkém počtu elektronů v atomu se jejich účinky vyruší, rovněž pak u spárovaných elektronů se vyruší účinky spinových momentů a výsledný moment je bez přítomnosti vnějšího magnetického pole nulový.

V atomech s nespárovanými elektrony a v atomech, jež mají jen částečně zaplněné valenční slupky (např. H, Na), nedochází k úplnému vykompenzování jednotlivých magnetických momentů a tyto atomy se pak vyznačují vlastním permanentním magnetickým momentem. Druhou možností atomů s nenulovým magnetickým momentem jsou pak tzv. *přechodové atomy* s částečně zaplněnou vnitřní 3d podslupkou (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu). [7 s. 279] [8 s. 391]

Tabulka 1: Magnetické momenty m vybraných atomů. Převzato z [7 s. 279]

atom (iont)	magnetický moment (10^{-24}JT^{-1})
H	9,27
He	0
O	13,9
Yb ³⁺	37,1

1.6 Magnetizace

Jev, který nastane při vložení materiálu do magnetického pole, tedy magnetické zpolarizování, popisujeme veličinou *magnetizace* M , která je definována jako vektorový součet magnetických momentů všech atomů na jednotku objemu, její jednotkou je Am^{-1} : [9 s. 4]

$$\mathbf{M} = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i}{V} \quad (1.15)$$

Vztah mezi magnetizací, intenzitou vnějšího magnetického pole a magnetickou indukcí:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{H}, \quad (1.16)$$

případně někdy zapsané pro veličinu *magnetické polarizace* ($J = \mu_0 M$) [T]:

$$\mathbf{J} = \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{H}. \quad (1.17)$$

Vedle pojmu magnetizace je potřeba zavést ještě pojem *saturační magnetizace*, tedy limit magnetizace daného materiálu. Je to stav materiálu, kdy je celý jeho objem magnetován se stejnou orientací magnetických dipólových momentů jako jedna doména¹.

Tabulka 2: Saturační magnetizace vybraných feromagnetik. Převzato z [6 s. 88,360]

materiál	saturační magnetizace M_0 [10^6 Am^{-1}]
Fe	1,71
Co	1,42
Ni	0,48
Permalloy ($\text{Ni}_{78}\text{Fe}_{22}$)	0,86
Supermalloy ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{15}\text{Mo}_5$)	0,63
Permendur ($\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$)	1,91
NdFeB	1,27
SmCo	0,77
AlNiCo	0,95

1.7 Permeabilita a susceptibilita

To, jakým způsobem prostředí či materiál ovlivňuje účinky vnějšího magnetického pole, tedy polarizovatelnost (magnetickou vodivost či prostupnost pro magnetické pole) je vyjádřeno parametrem *permeabilita prostředí* μ [Hm^{-1}]:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.18)$$

Často bývá permeabilita prostředí vyjádřena pomocí *relativní permeability* μ_r charakterizující dané látkové prostředí a *permeability vakua* μ_0 , jejíž hodnota je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$. Relativní permeabilita vakua je 1.

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1.19)$$

Magnetická susceptibilita, která popisuje chování látkového prostředí ve vnějším magnetickém poli je definována vztahem:

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (1.20)$$

$$\mu_r = \chi + 1 \quad (1.21)$$

¹ viz kapitola 1.10

Z výše uvedených vztahů pak vyplývá, že látky se susceptibilitou $\chi > 0$ magnetické pole zesilují, naopak látky se susceptibilitou $\chi < 0$ magnetické pole zeslabují. Magnetická susceptibilita vakua je rovna nule. [3 s. 117–118] [6 s. 83–84]

1.8 Látky diamagnetické a paramagnetické

Diamagnetické látky jsou charakterizovány zápornou susceptibilitou (relativní permeabilitou menší než jedna) a chovají se tak, že zeslabují vnější magnetické pole. Toto chování je dáno zákonem elektromagnetické indukce, kdy změny vnějšího magnetického pole indukují v látce proudy vytvářející vlastní magnetické pole působící proti těmto změnám. Vznikají tak dodatečné magnetické momenty, které se snaží vnější magnetické pole vykompenzovat. U některých látek s kladnou susceptibilitou ($\mu_r > 1$), které nazýváme *paramagnetické*, může být tento jev překryt projevem magnetických momentů některých elektronů (atomů s částečně zaplněnými podslupkami). [3 s. 112–118] [8 s. 397–399]

Tabulka 3: Hodnoty magnetické susceptibility vybraných látek. Převzato z [3 s. 118][8 s. 397]

diamagnetické látky		paramagnetické látky	
látka	susceptibilita $\chi [\cdot 10^{-5}]$	látka	susceptibilita $\chi [\cdot 10^{-5}]$
antimon	-6,8	sodík	85
bismut	-16,0	draslík	57
stříbro	-2,51	hliník	2
zinek	-1,56	platina	29
měď	-0,97	yttrium	11,8
křemík	-0,32	mangan	90,8
voda	-0,905	neodym	345
etylalkohol	-0,73	kapalný kyslík	360
helium	-0,0001	vzduch	0,0369

1.9 Magneticky uspořádané látky

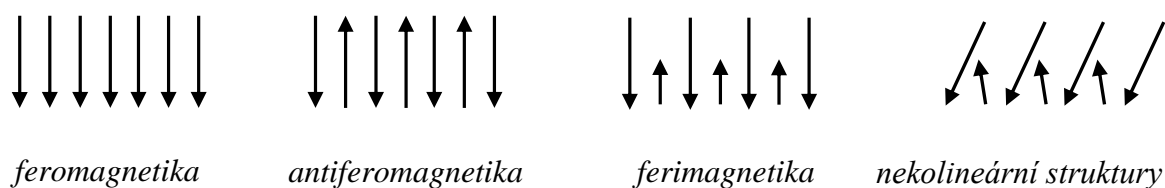
Silné magnetické projevy látek jsou možné pouze u takových látek, kde magnetické momenty jednotlivých atomů a molekul nejsou vzájemně vykompenzovány. Takové chování je možné pouze u pevných látek s krystalovou strukturou, kde atomy či ionty tvoří krystalové mřížky. Uspořádání magnetických momentů těchto látek dělíme do čtyř kategorií. (viz *Obrázek 8*).

Feromagnetika, kde jsou všechny atomové magnetické momenty o stejné velikosti a směru uspořádány paralelně.

Antiferomagnetika, u nichž se střídají antiparalelně orientované magnetické momenty, které se vzájemně vykompenzují a výsledný magnetický moment dané struktury je nulový.

Ferimagnetika tvoří rovněž antiparalelně orientované magnetické momenty, mají ale odlišnou velikost a celkový magnetický moment není nulový.

Poslední kategorií jsou *nekolineární magnetické struktury*. [3][8][10]

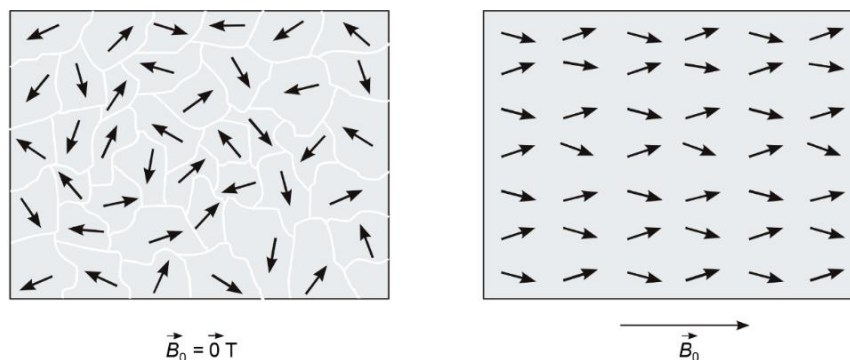


Obrázek 8: Schemata základních typů magnetického uspořádání.

1.10 Feromagnetické látky

Nejvýznamnější skupinou magneticky uspořádaných látek jsou feromagnetické látky, které mají spontánní magnetický moment i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole. Stejně jako u paramagnetických látek je tento moment tvořen nevykompenzovanými atomovými magnetickými momenty, avšak feromagnetika tvoří uzavřené struktury se spontánní magnetizací tzv. *domény* (viz Obrázek 9) vázané na krystalickou mřížku látek. Příčinou tohoto jevu je působení tzv. výměnných sil (někdy také výměnné Weissovo pole) mezi atomy, jejichž působení zapříčiňuje souhlasné orientování jednotlivých magnetických momentů v určité malé oblasti (*doméně*) s objemem 10^{-3} – 10 mm³, jenž jsou „odděleny“ od okolí tzv. Blochovými stěnami o tloušťce 10^{-6} – 10^{-8} mm. Magnetické domény jsou orientovány nahodile a bez přítomnosti vnějšího magnetického pole jsou jejich účinky vzájemně vykompenzovány.

Feromagnetismus se vyskytuje za běžných teplot u některých prvků a jejich slitin, jako je železo, kobalt, nikl a gadolinium. Dále bylo feromagnetické chování zjištěno u dalších slitin, které neobsahují feromagnetické prvky, tyto slitiny jsou nazývány *Heuslerovy*. Příkladem je možné uvést slitiny manganu s cínem, hliníkem, arsenem, bismutem či mědí. [2 s. 8][3 s. 119] [10 s. 455–456]



Obrázek 9: Magnetické domény bez vnějšího magnetického pole a při vložení do vnějšího magnetického pole. Převzato z [7 s. 284]

1.11 Curieova teplota

Magnetické uspořádání látek může existovat pouze za určitých teplot, které jsou nižší než *Curieova teplota*. Je to tedy teplotní bod, nad nímž je látka v magneticky neuspořádaném stavu. Pod tímto bodem se feromagnetikum rozděluje na jednotlivé, již zmíněné Weissovy domény spontánní magnetizace. Při zvyšování teploty látky mohou atomové magnetické momenty měnit svou orientaci v důsledku tepelného pohybu. Nad Curieovou teplotou ztrácí feromagnetická látka své magnetické uspořádání a chová se jako paramagnetikum.

Při teplotě $T = 0 \text{ K}$ je uspořádání kompletní a spontánní magnetizace je největší. Pro susceptibilitu feromagnetické látky platí *Curieův-Weissův zákon*:

$$\chi = \frac{C}{T - T_c}, \quad (1.22)$$

kde C je *Curieova konstanta* a T_c je *Curieova teplota*. [10 s. 455–457]

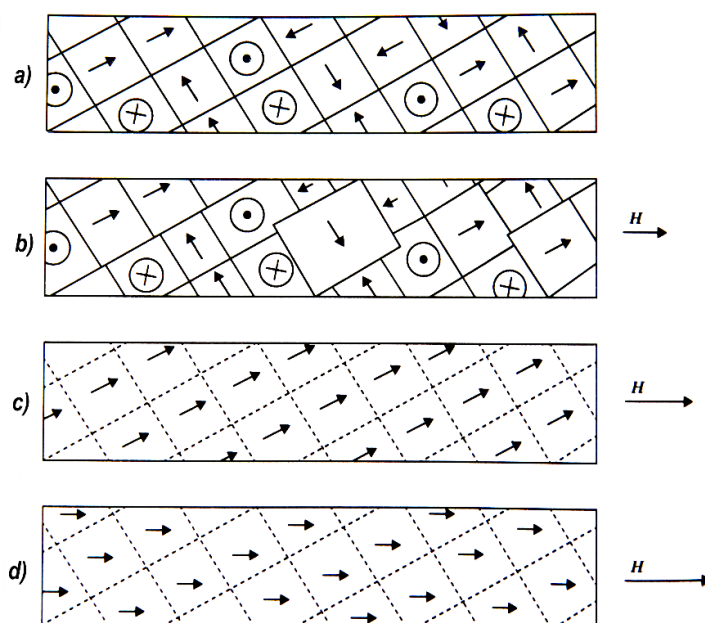
Tabulka 4: Curieova teplota vybraných materiálů. Převzato z [6 s. 90]

materiál	Curieova teplota [°C]
železo	770
kobalt	1130
nikl	358
Nd ₂ Fe ₁₄ B	312
AlNiCo	850
SmCo ₅	720
Sm ₂ Co ₁₇	810
tvrdé ferity	400–700
barnaté ferity	450

1.12 Průběh magnetizace feromagnetika

Feromagnetický materiál bez působení vnějšího magnetického pole vytváří domény se spontánní magnetizací M_s nahodile, magnetické momenty se vykompenzují a vektor celkové magnetizace tělesa je nulový (viz *Obrázek 10a*).

Při vložení tělesa z feromagnetického materiálu do vnějšího magnetického pole intenzity H vyvolá toto pole postupné uspořádání vektorů spontánních magnetizací M_s do směru vnějšího pole. Při malé intenzitě H vnějšího magnetického pole se objevuje růst domén, které jsou orientovány obdobně jako vnější magnetické pole a zmenšování domén opačně orientovaných (viz *Obrázek 10b*). Při zvyšování intenzity vnějšího magnetického pole se začne projevovat další mechanismus tzv. *doménové rotace*, kdy jednotlivé atomové momenty, které nejsou orientovány obdobně s vnějším magnetickým polem, překročí energii anisotropie a otočí se ve směru některé tzv. *lehké krystalografické osy*², jež je nejbližší orientaci vnějšího magnetického pole. (viz *Obrázek 10c*). Poslední proces uplatňovaný při velmi vysokých intenzitách vnějšího magnetického pole je postupná rotace magnetických momentů, které leží ve směru lehké krystalografické osy do směru vnějšího magnetického pole, takže je těleso magnetováno jako jedna doména. Tento poslední proces je vratný a po odstranění vnějšího pole ustupuje. (viz *Obrázek 10d*) [6 s. 144–146]



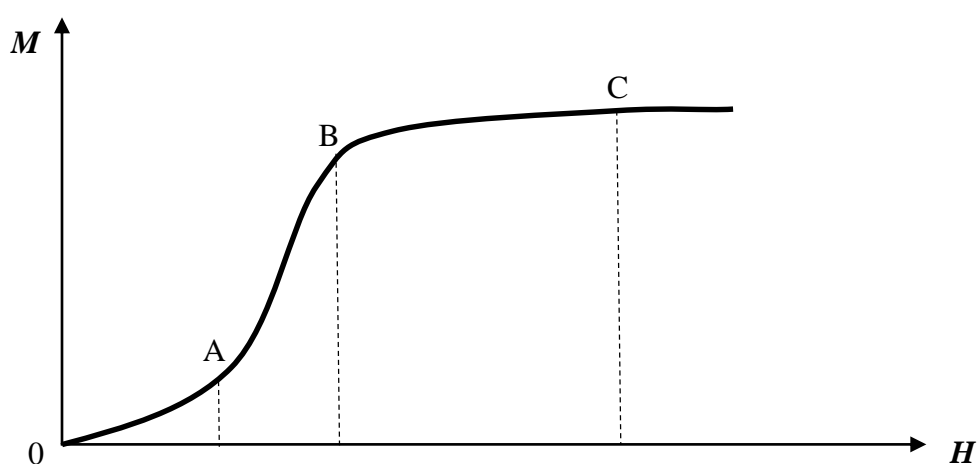
Obrázek 10: Průběh magnetizace feromagnetické látky ve vnějším magnetickém poli. Převzato z [6 s. 146]

² Vysvětlení pojmu lze nalézt v literatuře. [16 s. 844–848]

1.13 Křivka prvotní magnetizace

Charakteristiku průběhu působení vnějšího magnetického pole (magnetizace) feromagnetického materiálu, který nebyl předtím zmagnetován (výchozí stav chaoticky uspořádaných magnetických momentů), popisuje *křivka prvotní magnetizace*.

Při magnetizaci feromagnetika vnějším polem o malé intenzitě H dochází k vratným posuvům hranic domén (oblast 0 až A viz *Obrázek 11*). V oblasti mezi body A až B dochází k již nevratnému posuvu hranic domén. V okolí bodu B se začíná natáčet vektor celkové magnetizace M ve směru vektoru intenzity H a od bodu C jsou oba vektory téměř shodně orientovány. Další zvyšování intenzity vnějšího pole již nezpůsobuje vyšší magnetizaci materiálu, výsledná magnetizace je saturační. [3 s. 121–122] [11 s. 15]



Obrázek 11: Křivka prvotní magnetizace

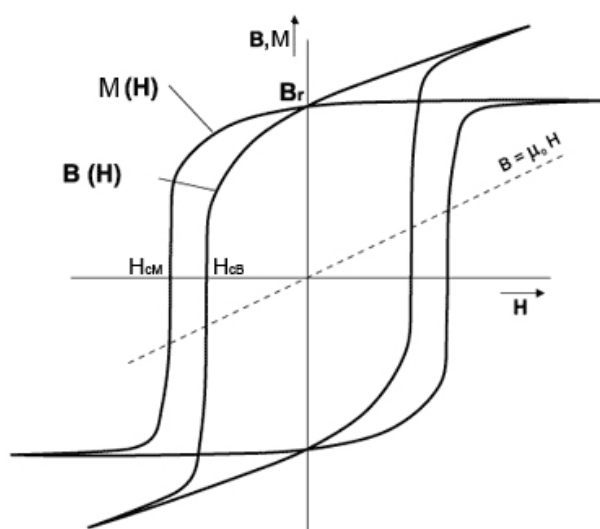
1.14 Hysterezní smyčka, remanentní magnetizace a koercitivita

Při následném snižování intenzity H dochází ke snížení magnetizace, avšak děj není zcela vratný a magnetizace klesá pomaleji. Při odstranění vnějšího pole zůstane v materiálu určitá hodnota magnetizace nazývaná *remanentní magnetizace* M_r . Pro dosažení nulové magnetizace je potřeba materiál vložit do vnějšího, opačně orientovaného magnetického pole o intenzitě H_c , jež nazýváme *koercitivitou* či *koercitivní intenzitou magnetického pole*. Při dalším zvyšování intenzity tohoto magnetického pole dojde v opačném směru opět k nasycení. Opětným přemagnetováním opačnou orientací vnějšího magnetického pole se uzavře křivka zvaná *hysterezní smyčka*. (viz *Obrázek 12*)

Plocha uzavřená křivkou hysterezní smyčky závislosti magnetizace na intenzitě vnějšího magnetického pole $M(H)$ je úměrná velikosti práce na jednotku objemu (*hysterezní ztráty*) potřebné k přemagnetování materiálu.

V praxi se často využívá místo závislosti $M(H)$ závislost magnetické indukce na intenzitě vnějšího magnetického pole $B(H)$, jenž je podle vztahu (1.16) až na násobnou konstantu součtem magnetizace M a intenzity magnetického pole H . Obě závislosti jsou vyneseny na Obrázku 12. Zde je také znázorněn bod *remanentní magnetizace* shodný s *remanentní indukcí* B_r (je shodný pro $H = 0$).

Pro obě uvedené závislosti rozeznáváme dvě koercitivity. *Koercitivní intenzitu vnitřní* H_{cM} (případně H_{cJ}) pro snížení celkové magnetické polarizace na nulu a *koercitivní intenzitu vnější* H_{cB} pro snížení celkové magnetické indukce na nulu. Vždy platí: $H_{cM} > H_{cB}$. Pro praxi je využívána hodnota H_{cB} označovaná pouze H_C . [3 s. 123][13 s. 13] [14]



Obrázek 12: Hysterezní smyčky $M(H)$ a $B(H)$. Převzato z [12]

1.15 Magneticky měkké a tvrdé materiály

Tvar hysterezní smyčky charakterizuje chování materiálu při změnách magnetizace, tedy hodnoty remanentní indukce a koercitivní intenzity.

Podle velikosti koercitivní intenzity (šířky hysterezní smyčky) se feromagnetické materiály dělí:

- a. *magneticky tvrdé* – vyznačují se větší šířkou hysterezní smyčky (koercitivní intenzita $H_c > 10^3 \text{ Am}^{-1}$) a velkou hodnotou remanentní indukce B_r . Jsou poměrně odolné vůči zmagnetování. Po odstranění vnějšího magnetického pole zůstávají nadále zmagnetovány a chovají se jako permanentní magnet. Hlavními zástupci magneticky tvrdých materiálů jsou tvrdé ferity, slitiny typu AlNiCo a materiály na bázi vzácných zemin. [13][15]

- b. *magneticky měkké* – vyznačují se úzkou hysterezní smyčkou (koercitivní intenzita $H_c < 10^3 \text{Am}^{-1}$) a poměrně malou hodnotou remanentní indukce B_r . Dají se snadno zmagnetovat (využití např. pro magnetofonové pásky, diskety, transformátorové plechy). Mají malou hodnotu B_r , což znamená, že po odstranění vnějšího magnetického pole je jejich vlastní magnetické pole malé. [13][15]

Tabulka 5: Koercitivity vybraných materiálů. Převzato z [6 s. 89][8 s. 403]

magneticky měkké materiály		magneticky tvrdé materiály	
materiál	koercitivita H_c [Am^{-1}]	materiál	koercitivita H_c [kAm^{-1}]
transformátorová ocel	40	uhlíková ocel (0,9%C)	4
čisté železo	4	kobaltová ocel	18,3
78-permalloy	4	AlNiCo V	52
supermalloy	0,32	barnatý ferit	135
kovové sklo	0,3	SmCo	800
nikl	50	NdFeB	1000

2 Permanentní magnety

Permanentní magnet je těleso vyrobené z magneticky tvrdého materiálu, který byl vystaven vnějšímu magnetickému poli a je trvale zmagnetizován, vytváří tak kolem sebe trvalé magnetické pole. Je to tedy pasivní prvek, který nepotřebuje k produkci magnetického pole vnější zdroj elektrického proudu. Aby nedošlo k odmagnetování, je potřeba zajistit při magnetizaci permanentních magnetů vysokou koercitivní intenzitu magnetického pole. Potřeba vysokých hodnot remanentní indukce odpovídá potřebě velkých hodnot saturační magnetizace.

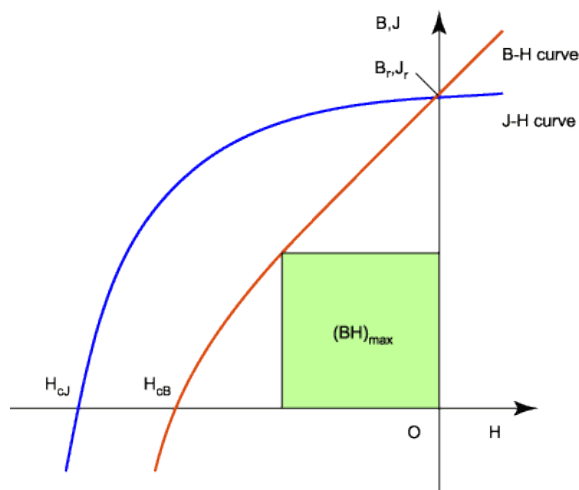
Největší část permanentních magnetů se v současné době vyrábí ze čtyř druhů materiálu. Jsou to tvrdé ferity, magnety ze vzácných zemin (neodymové a samarium-kobaltové) a AlNiCo magnety. Světovou produkci permanentních magnetů tvoří z 34 % ferity, 65 % magnety ze vzácných zemin a 1 % AlNiCo. [6 s. 359]

2.1 Základní charakteristiky permanentních magnetů

Materiály, z nichž jsou permanentní magnety vyrobeny, se popisují pomocí charakteristických hodnot zmíněných v kapitole 1. Jsou to především remanentní

magnetizace B_r , Curieova teplota T_c , hodnoty koercitivní intenzity vnitřní H_{cM} , koercitivní intenzity vnější H_{cB} a maximální energetický produkt $(BH)_{max} [Jm^{-3}]$

Maximální hustota magnetické energie uložené v permanentním magnetu je úměrná součinu magnetické indukce B a intenzity vnějšího magnetického pole H . Tyto hodnoty mají průnik v bodě na demagnetizační křivce v místě, kde jejich součin má maximální možnou hodnotu. (viz *Obrázek 13*) [6 s. 361–363][14]



Obrázek 13: Demagnetizační charakteristika permanentního magnetu. Převzato z [14]

2.2 Magneticky tvrdé ferity

Tvrdé ferity, nazývané někdy keramické, jsou cenově nejpříznivější a stále velice rozšířené magnety. Nejčastěji používané ferity jsou

- barnaté ferity $BaFe_{12}O_{19}$, (viz *Obrázek 14*) jejich využití je široké vzhledem k jejich stálosti a odolnosti vůči korozi (permanentní magnetky, reproduktory, magnetické pásky)
- vysoce koercitivní strontnaté ferity $SrFe_{12}O_{19}$, využívané v mikrovlnných zařízeních, telekomunikacích a magnetooptických zařízeních.
- kobaltové ferity $CoFe_2O_4$ pro magnetické záznamy a magnetické snímače.

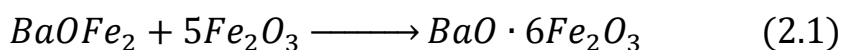
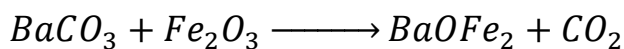
Feritové magnety jsou vyráběné práškovou metalurgií jako *izotropní* a *anizotropní*. Proces práškové metalurgie zahrnuje mletí materiálu na malé částice o průměru asi 1 μm , což je zhruba velikost jedné magnetické domény, a jejich následné lisování a magnetizaci.

Izotropní feritové magnety se vyrábí z izotropního materiálu a lisují se bez přítomnosti magnetického pole, magnetizují se až po vylisování. Jejich výhodou je kromě nízkých nákladů na výrobu také to, že nemají přednostní osu magnetizace, a tak je možné je magnetovat v libovolném směru. Energetický součín $(BH)_{max}$ je však malý.

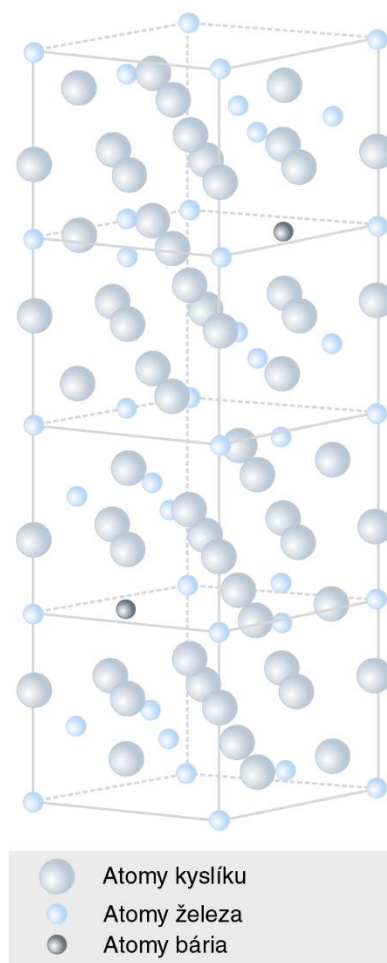
Anizotropní feritové magnety se vyrábí lisováním materiálu v magnetickém poli, čímž získají prioritní osu magnetizace, podél které jsou následně magnetovány. Při stejném objemu je možné dosáhnout 1,5–2krát větší remanentní magnetické indukce. [2 s. 10] [6 s. 377] [9 s. 32]

Buňka krystalu feritu má celkem 64 atomů a tvoří hexagonální základní strukturu (viz *Obrázek 14*) se základními strukturními parametry $a = 0,588 \text{ nm}$ a $c = 2,32 \text{ nm}$. V buňce krystalu jsou dva atomy barya či stroncia místo dvou atomů kyslíku. Magnetická osa orientace je kolmá k základní ploše.

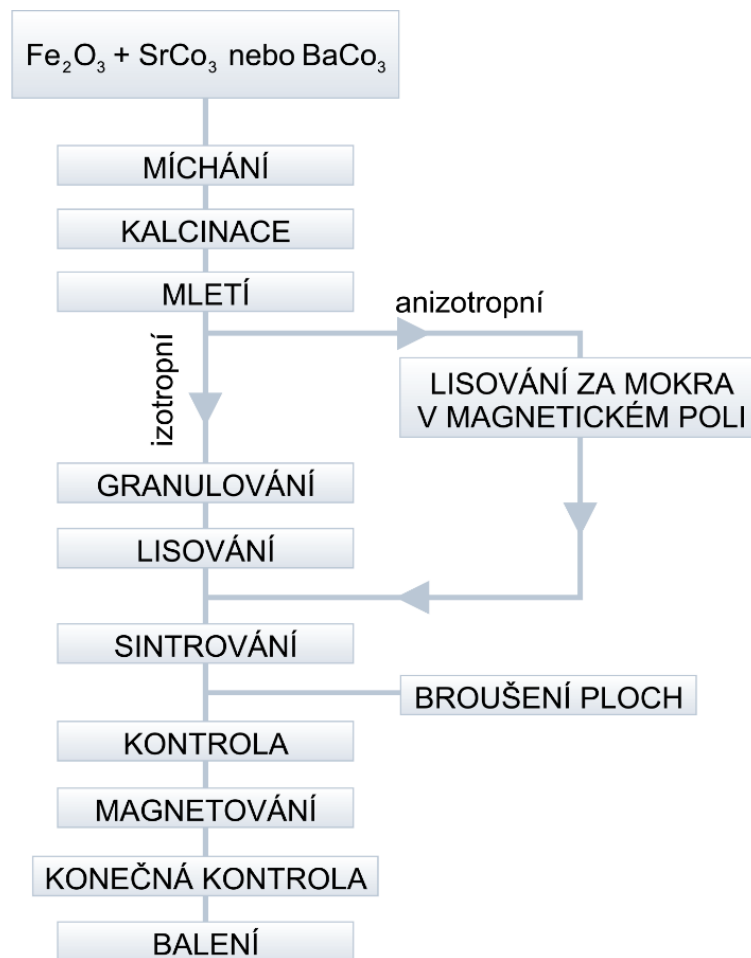
Feritové permanentní magnety se skládají z cca 86 % Fe_2O_3 a cca 14 % BaO nebo SrO. Základní suroviny pro výrobu jsou oxid železitý Fe_2O_3 a uhličitany barya či stroncia BaCO_3 resp. SrCO_3 . [2 s. 11] [9 s. 34]



Suroviny se smísí a kalcinací za teplot 1000–1350 °C vzniká hexaferit. Tato směs se rozdrtí, rozemele a následuje lisování do požadovaného tvaru buď za sucha ve formě prášku s příměsí pojiva, nebo ve formě vodné suspenze. V případě anizotropních magnetů se permanentní magnety lisují v magnetickém poli. Konečný tvar a pevnost dostávají permanentní magnety výpalem (sintrováním) při teplotách 1100–1300 °C. Nakonec jsou magnety zabroušeny, začištěny do finální podoby, zmagnetovány a distribuovány. [2 s. 11] [9 s. 34]



Obrázek 14: Krystalografická buňka krystalu $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Převzato z [2]



Obrázek 15: Schéma výrobního procesu feritových magnetů. Převzato z [2 s. 12]

Feritové permanentní magnety se vyznačují mnoha typickými vlastnostmi. Díky způsobu jejich přípravy jsou pevné, ale poměrně křehké, citlivé na nárazy a ohyb. Jsou odolné vůči většině chemikálií včetně ředidel, slabých kyselin a rozpouštědel. Pracovní teplota těchto magnetů je v rozmezí $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2] [9 s. 32–35]

Tabulka 6: Magnetické charakteristiky feritových materiálů. [12] [18].

typ materiálu	koercitivita H_{CB} [kAm^{-1}]	koercitivita H_{CJ} [kAm^{-1}]	remanence B_r [mT]	hustota energie $(BH)_{\max}$ [kJm^{-3}]	Curieova teplota T_c [$^{\circ}\text{C}$]
F10T (izotrop)	125–160	210–280	200–235	6,5–9,5	450
F20	135–190	140–195	320–380	18,0–22,0	450
F25	135–170	140–200	360–400	22,5–28,0	450
F30	175–210	180–220	370–400	26,0–30,0	450
F30BH	230–275	235–290	380–400	27,0–32,5	450
F35	220–250	225–255	410–430	31,5–35,0	450

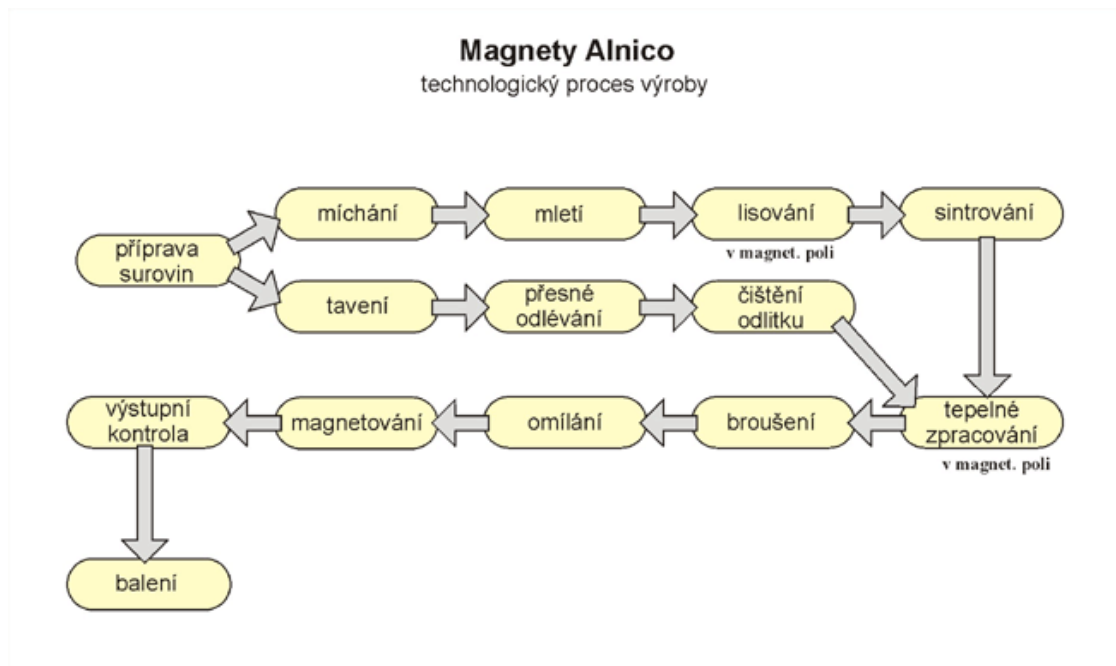
2.3 AlNiCo magnety

AlNiCo magnety se vyrábí ze slitiny železa, kobaltu, niklu a hliníku s malými příměsemi dalších kovů například mědi či titanu. AlNiCo magnety disponují vysokou remanencí a velmi vysokou pracovní teplotou až do 550 °C, jsou odolné vůči korozi, ale mají nízkou hodnotu koerzivní intenzity. AlNiCo materiál je poměrně tvrdý a opracovává se pouze broušením, má vysokou odolnost vůči kyselinám a rozpouštědlům.

Magnetické vlastnosti AlNiCo magnetů jsou dány tvarovou magnetickou anisotropií dlouhých tyčových silně magnetických Fe-Co zrn (α_1), které jsou magneticky uspořádány a zajištěny proti pohybu slabě magnetickou strukturou Al-Ni-Fe (α_2).

Při výrobě lisovaných AlNiCo (např. AlNiCo 5) magnetů se materiál roztaví při teplotě 1500–1650 °C a následně se velmi pomalu ochlazuje na zhruba 900 °C, tato fáze je důležitá, aby nedošlo k nevhodné krystalizaci materiálu. Při dalším ochlazování se vloží materiál do magnetického pole a zchladí se vzduchem na zhruba 600 °C, přičemž se vytvoří dvě požadované fáze α_1 a α_2 . Dále se tepelně zpracuje při teplotách 550–650 °C, aby došlo k prodloužení Fe-Co zrn na rozměry okolo (40 × 8 × 8) nm. Nakonec se materiál opracuje broušením do výsledné podoby a distribuuje. Celý proces výroby je zachycen na obrázku 16.

Spékané AlNiCo magnety (např. AlNiCo 8) se vyrábí podobně jako v případě feritových magnetů práškovou metalurgií. [9 s. 35–38]



Obrázek 16: Technologie výroby AlNiCo magnetů. Převzato z [17]

Použití

- elektromotory
- generátory
- reproduktory a akustické měniče
- elektroměry
- elektrické měřicí přístroje
- přídržné průmyslové systémy
- radary
- magnetické separátory

[9] [17]

Tabulka 7: Magnetické vlastnosti vybraných lisovaných AlNiCo magnetů. [19][20]

typ materiálu	koercitivita H_{CB} [kAm^{-1}]	koercitivita H_{CJ} [kAm^{-1}]	remanence B_r [mT]	hustota energie $(BH)_{max}$ [kJm^{-3}]	Curieova teplota T_c [$^{\circ}C$]
AlNiCo 1 isot.	37	38	720	11,1	740–860
AlNiCo 2 isot.	45	46	750	13,5	740–860
AlNiCo 3 isot.	38	40	700	10,7	740–860
AlNiCo 5 anis.	51	51	1280	43,8	740–860
AlNiCo 6 anis.	62	64	1050	31,0	740–860
AlNiCo 8 anis.	131	148	820	42,2	740–860
AlNiCo 9 anis.	119	119	1060	71,6	740–860

Tabulka 8: Magnetické vlastnosti vybraných sintrovaných AlNiCo magnetů. [19][20]

typ materiálu	koercitivita H_{CB} [kAm^{-1}]	koercitivita H_{CJ} [kAm^{-1}]	remanence B_r [mT]	hustota energie $(BH)_{max}$ [kJm^{-3}]	Curieova teplota T_c [$^{\circ}C$]
AlNiCo 2 isot.	44	45	710	11,9	810–860
AlNiCo 5 anis.	49	50	1090	31,0	810–860
AlNiCo 6 anis.	63	65	940	23,1	810–860
AlNiCo 8 anis.	119	134	740	31,8	810–860

2.4 Magnety ze vzácných zemin

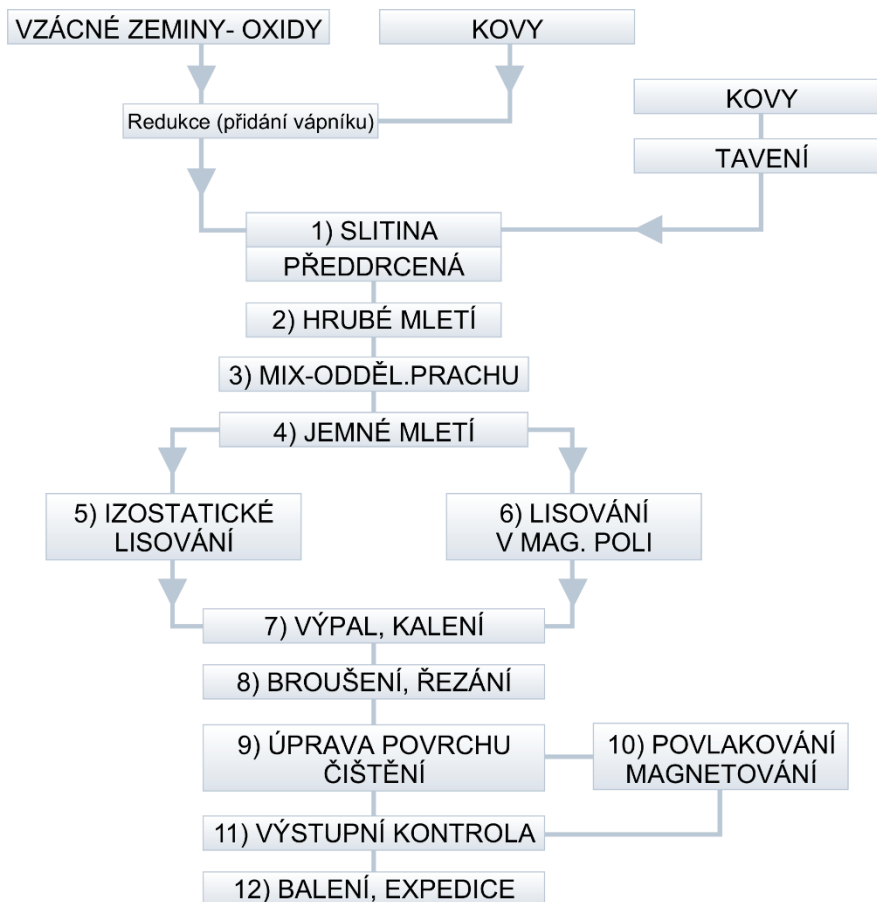
Vzácné zeminy (RE) tvoří celkem 17 prvků (Y, Sc a všechny lanthanoidy) s podobnými chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Jsou to měkké kovy s dobrými magnetickými vlastnostmi. Jako vzácné jsou tyto prvky nazývány kvůli jejich nízké koncentraci a obtížné těžbě, která způsobuje velkou ekologickou zátěž. Získávání

lanthanoidů (včetně samaria a neodymu) z rud minerálů se provádí působením kyselin nebo alkalických látek. Největším producentem vzácných zemin je v současné době Čína.

Velmi výkonné permanentní magnety, někdy označované jako RE/Co se vyrábí ze vzácných zemin (Nd, Sm) a přechodového kovu (Co, Fe), které mají intermetalické fáze SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ a $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Samotné lanthanoidy (Sm, Nd) jsou feromagnetické, ale Curieova teplota je nižší než pokojová teplota. Přidáním některých prvků jako je kobalt či železo s vysokou Curieho teplotou se nedostatek vykompenzuje [2].

Mechanické vlastnosti permanentních magnetů ze vzácných zemin se vyznačují vysokou tvrdostí a křehkostí. Velmi snadno dochází k odštípnutí částí a tak nejsou možné běžné způsoby opracování. Magnety se upravují broušením, elektro-erozí, případně řezáním vodním paprskem. Hustota těchto materiálů je v rozmezí 7500 kgm^{-3} až 8500 kgm^{-3} .

Mezi hlavní negativní chemické vlastnosti těchto magnetů patří poměrně rychlé rozpouštění v kyselinách, ale dobrá rezistence vůči alkalickým látkám. SmCo magnety ve vlhkém prostředí nekorodují, NdFeB magnety oxidují rychle a proto je nutná jejich povrchová úprava, která se nejčastěji provádí poniklováním.



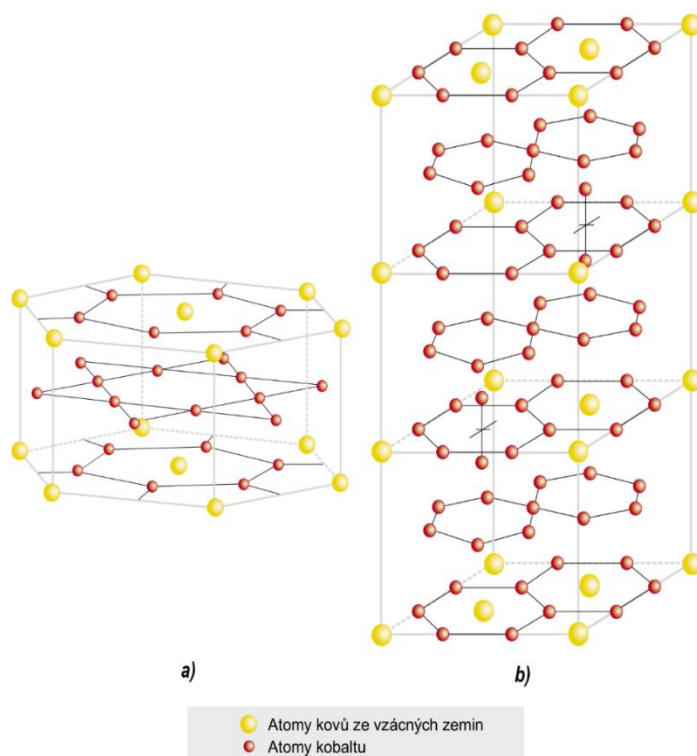
Obrázek 17: Výrobní schéma magnetů ze vzácných zemin. Převzato z [2]

Permanентní magnety ze vzácných zemin jsou oproti feritovým či AlNiCo magnetům výrazně výkonnější. Mají vyšší hodnoty koercitivity H_C a remanence B_r . Jejich velký potenciál využití je v miniaturizaci aplikací PM, protože rozměry magnetů ze vzácných zemin při dosažení stejné hustoty energie $(BH)_{max}$ mohou být podstatně menší oproti magnetům feritovým a AlNiCo. Nevýhodou je jejich vyšší cena, vyšší křehkost a oxidace NdFeB magnetů. [2][9 s. 38–45]

2.4.1 Samarium-kobaltové magnety

Сamarium-kobaltové magnety jsou vyráběny od 70. let 20. století. Na počátku výroby samarium-kobaltových magnetů byly vyráběny magnety ze sloučeniny SmCo_5 . Později byly objeveny jiné fáze intermetalických sloučenin samaria a kobaltu, z nichž se dnes využívá hlavně $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Ty mají větší hodnotu saturační magnetizace, ale nižší hodnotu vnitřní koercitivity H_{cJ} , jež je optimalizována dalšími příměsemi železa a zirkonia. Šířka doménové stěny je zhruba 2 nm, velikost jednotlivých domén je v rozmezí 100–1000 nm.

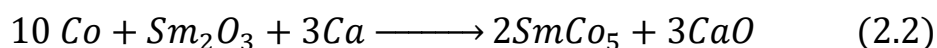
Krystalová struktura buňky SmCo_5 se skládá z atomů samaria a atomů kobaltu. Oba prvky tvoří nezávislou hexagonální podmřížku (viz *Obrázek 18a*). Strukturální parametry (mřížkové konstanty) jsou: $a = 0,5004$ nm, $c = 0,3964$ nm. Přednostní osa magnetizace je kolmo k základní rovině.



Obrázek 18: Buňka krystalu SmCo_5 a $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Převzato z [2]

Strukturní parametry romboedrické mřížky fáze $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (viz *Obrázek 18b*) jsou: $a = 0,8402 \text{ nm}$, $c = 1,2172 \text{ nm}$. Přednostní osa magnetizace je rovněž kolmo k základní rovině. [2]

Výroba samarium-kobaltových magnetů probíhá obdobně jako u feritových magnetů sintrováním. Oxidy samaria se získávají z minerálu *monazit* SmPO_4 , který obsahuje asi 1 % samaria. Existuje několik způsobů přípravy materiálu pro samarium-kobaltové magnety, pro něž je v současné době nejčastějším způsobem *redukčně-difuzní* proces, kdy jsou oxidy samaria redukovány vápníkem za vzniku difundovaných zrn směsi samaria a kobaltu.



Směs vstupních látek je v ochranné atmosféře zahřáta na $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, po difuzi samaria do kobaltových zrn se vzniklý oxid vápenatý smíchá s vodou a separuje. [9 s. 42–45]

Maximální energetický součin samarium-kobaltových magnetů je až pětinašobně vyšší než u feritových nebo AlNiCo magnetů a mají velmi dobrou odolnost vůči demagnetizaci. Jejich největší výhodou je vysoká tepelná stabilita, díky níž je větší rozsah pracovních teplot (až $300 \text{ }^\circ\text{C}$) pro aplikace tohoto magnetu. Další nezanedbatelnou výhodou je odolnost proti korozi, takže není nutná povrchová úprava. [19]

Použití:

- motory, generátory
- dynamy
- magnetické spojky a brzdy
- senzory
- satelitní systémy
- měřicí a kontrolní přístroje

Tabulka 9: Magnetické vlastnosti vybraných materiálů SmCo_5 [19]

typ materiálu	koercitivita $H_{CB} [\text{kAm}^{-1}]$	koercitivita $H_{CJ} [\text{kAm}^{-1}]$	remanence $B_r [\text{mT}]$	hustota energie $(BH)_{\max} [\text{kJm}^{-3}]$	Curieova teplota $T_c [^\circ\text{C}]$
YX16	620–660	1194	810–850	110–127	750
YX18	660–700	1520	850–900	127–143	750
YX20	676–725	1520	900–940	150–167	750
YX22	710–748	1280	920–960	160–175	750
YX24	730–770	1280	960–1000	175–190	750

Tabulka 10: Magnetické vlastnosti vybraných materiálů Sm_2Co_{17} [19]

typ materiálu	koercitivita H_{CB} [kAm^{-1}]	koercitivita H_{CJ} [kAm^{-1}]	remanence B_r [mT]	hustota energie $(BH)_{max}$ [kJm^{-3}]	Curieova teplota T_c [$^{\circ}C$]
YXG22	676–740	2240	930–970	160–183	800
YXG24	692–764	2240	950–1020	175–191	800
YXG26	748–796	1440	1020–1050	191–207	800
YXG28	756–812	2080	1030–1080	207–220	800
YXG30	788–835	1440	1080–1100	220–240	800
YXG32	812–860	1200	1100–1130	230–255	800

2.4.2 Neodymové magnety

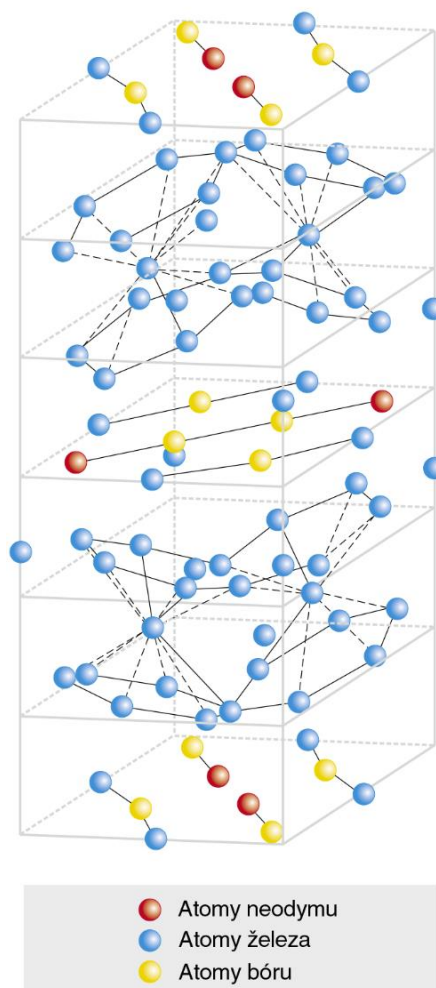
Neodymové magnety ve složení $Nd_2Fe_{14}B$ byly poprvé připraveny v 80. letech 20. století. Vyznačují se tetragonální krystalovou symetrií a silnou jednoosou magnetokrystalickou anisotropií, díky níž má materiál vysokou odolnost vůči demagnetizaci (vysoké hodnoty koercitivity).

Buňku krystalu $Nd_2Fe_{14}B$ se základními konstantami $a = 0,880$ nm a $c = 1,219$ nm tvoří čtyři podjednotky sestávající se celkem z 68 atomů. Atomy železa vytváří v krystalické mřížce hexagonální švy, podobné jako u hexagonálních krystalů Sm_2Co_{17} . Přednostní osa magnetizace je kolmá k základní rovině. (viz Obrázek 19).

Materiál pro výrobu permanentních magnetů $NdFeB$ je legován dalšími prvky pro zlepšení remanence, koercitivity a teplotní stability, zejména pak dysprosiem a dalšími prvky (Dy, Tb, Al, Cu, Co a Nb)

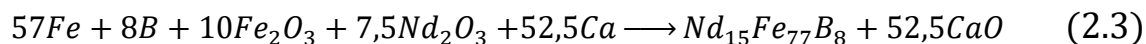
Neodym je získáván z minerálů, jsou jimi například wakefieldit ($NdVO_4$) a churchit $Nd(PO_4) \cdot 2H_2O$, případně z hydroxy karbonátu neodymu $Nd(CO_3)(OH)$.

Podobně jako u samarium-kobaltových magnetů je využívána metoda redukčně-difuzní, kdy jsou oxidy neodymu redukovány vápníkem za



Obrázek 19: Krystalografická buňka $Nd_2Fe_{14}B$. Převzato z [2]

přítomnosti prvků železa a boru. Vznikají pak intermetalické sloučeniny $Nd_{15}Fe_{77}B_8$, které se dále kalením a válcováním zpracovávají do požadované fáze $Nd_2Fe_{14}B$.



Poté proběhne mletí materiálu na velikost zrna 5–10 μm a při teplotě cca 725 °C v magnetickém poli se lisuje do požadovaného tvaru. Stejně jako jiné sintrované magnety má přednostní osu magnetizace. Konečná úprava se standardně realizuje obrušováním diamantovými nástroji a provádí se povrchová úprava poniklováním, pozinkováním či nátěr epoxidovou pryskyřicí. [2][9 s. 45–51]

Neodymové magnety jsou v současné době nejvýkonnější komerčně dostupné magnety. Mají některé nevýhodné vlastnosti, jsou sice tvrdé, ale křehké a snadno se odštěpují. Nemají příliš dobrou chemickou odolnost, rychle oxidují v přítomnosti vody a většinou je nutná jejich povrchová úprava. Oproti samarium-kobaltovým magnetům mají horší tepelné vlastnosti, nejlépe pracují při pokojové teplotě.

Výhodou neodymových magnetů je však jejich vysoká remanence B_r , velká koercitivita, maximální energetický součin, přídržná síla a malé rozměry. (viz *tabulka 11*)

Neodymové magnety se vyrábí v 5 základních specifických teplotních třídách, lišících se maximální provozní teplotou. Třída bez teplotního označení je určena pro provoz do 80 °C, H do 120 °C, SH do 150 °C, UH do 180 °C a EH do 200 °C.

Použití:

- magnetické statory, rotory a servopohony
- polarizátory tekutin
- separátory
- počítače

Tabulka 11: Mag. vlastnosti vybraných $Nd_2Fe_{14}B$ magnetů s pracovní teplotou do 80 °C. Převzato z [19]

typ materiálu	koercitivita H_{CB} [kAm^{-1}]	koercitivita H_{CJ} [kAm^{-1}]	remanence B_r [mT]	hustota energie $(BH)_{max}$ [kJm^{-3}]	Curieova teplota T_c [°C]
N35	868	955	1170–1210	263–287	310
N38	868	955	1210–1250	287–310	310
N40	835	955	1260–1290	318–324	310
N42	835	955	1290–1320	324–342	310
N45	835	955	1330–1370	342–366	310
N50	842	876	1400–1440	324–342	310
N52	842	876	1440–1470	394–414	310

2.5 Kompozitní magnety

Za účelem vytvořit ohebné, snadno obrobitelné a tvarově upravitelné magnety byly vyvinuty kompozitní magnety. Mohou být vytvořeny pomocí lisování vstřikované směsi plastu a magnetického materiálu ve formě malých zrn nebo pomocí procesu kompresního lepení. Kompozitní magnety jsou vyrobeny z magnetického materiálu ze vzácných zemin, případně strontnatého či barnatého feritu.

Magnety, které jsou vytvořeny prostřednictvím injekčního tvarování, se mohou lisovat do složitých tvarů a také přímo na tvarované součásti. Základní plastická matrice se vyrábí ze syntetického materiálu (termo-elastomery, nylon 6 a 12, PPS, polyamid). V zásadě jde o plastickou matici, v níž je rozptýlen magnetický materiál (ferit či RE/Co) ve formě malých zrn. Rozsah pracovní teploty těchto materiálů je $(-40-180)^\circ\text{C}$.

Lepené magnety se vyrábí pomocí procesu kompresního lepení, mají vyšší magnetický výstup, ale jsou omezeny na jednodušší geometrii než vstřikované materiály. Lepení se provádí epoxidovými materiály (termo-plastické syntetické pryskyřice). Rozsah pracovní teploty těchto materiálů je $(-40-165)^\circ\text{C}$ a jsou odolné vůči průmyslovým rozpouštědlům. [21]

Použití:

- rozličné nosiče označení, inzerce
- magnetické těsnění (ve sprchách apod.)
- drobné reproduktory
- mikro motory
- ochrana proti krádeži pro komodity v obchodech

Tabulka 12: Mag. vlastnosti vybraných vstřikovaných kompozitních magnetů. Převzato z [26]

typ materiálu	koercitivita $H_{CB} [\text{kAm}^{-1}]$	koercitivita $H_{CI} [\text{kAm}^{-1}]$	remanence $B_r [\text{mT}]$	hustota energie $(BH)_{\max} [\text{kJm}^{-3}]$
CB1	103–119	143–159	140–160	4,0–5,6
CB2	135–151	199–215	200–220	8,8–10,4
CB3	159–175	207–223	240–260	11,2–12,8
CB4	167–183	215–231	250–270	12,8–14,4
CB5	167–183	215–231	270–290	15,2–16,8
NBM4	296	680	470	28,4–38,2
NBM6	344	800	520	42,3–56,9
NBM8	416	800	620	60,9–69,1

Tabulka 13: Mag. vlastnosti vybraných lepených kompozitních magnetů. Převzato z [26]

typ materiálu	koercitivita H_{CB} [kAm^{-1}]	koercitivita H_{CJ} [kAm^{-1}]	remanence B_r [mT]	hustota energie $(BH)_{max}$ [kJm^{-3}]
SCB4	280	800	400	32
SCB6	320	800	500	48
SCB8	360	800	600	64
SCB10	320	400	700	80
NB4	344	640	450	32,5–40,6
NB8	424	800	630	60,9–69,1
NB10	448	760	690	73,1–81,3
NB12	464	840	780	81,3–97,5

2.6 Tvary magnetů a směr magnetizace

Množství moderních aplikací využití magnetů a výrobků z magnetického materiálu je nepřehledné, kupříkladu lze uvést statory a rotory elektromotorů a generátorů, magnetické separátory, radiovou elektroniku, polarizátory, magnetické spojky, různorodé přídržné systémy. Nelze pominout ani výukové pomůcky pro školy a drobné magnety pro domácnosti a kanceláře. Pro uspokojení potřeb trhu je výrobcům nabízeno několik základních tvarů a směrů magnetizace.

Přednostní osa orientace magnetizace je důležitou charakteristikou anizotropních materiálů, z níž vychází následný směr magnetizace. Rozumí se tím uspořádání magnetických krystalů do určitého směru, ve kterém dosahuje permanentní magnet svých nejlepších magnetických parametrů. Anizotropní materiál je během lisování vystaven silnému vnějšímu magnetickému poli, čímž je přednostní osa magnetizace určena. Magnet pak musí být v této ose i magnetován. Izotropní materiály se mohou magnetovat libovolně. [21] [22]

V zásadě jsou čtyři směry magnetování, které nezávisí na použitém magnetickém materiálu.

1. *Permanentní magnety s axiální přednostní osou orientace.* Axiálně jsou orientovány prstencové a válcové (diskové) magnety a hranoly přes výšku.
2. *Permanentní magnety s diametrální přednostní osou orientace.* Pro zvláštní aplikace, kupříkladu u prstencových či válcových permanentních magnetů

motorů nebo čerpadel, je přednostní osa orientace diametrální (kolmo k ose rotační symetrie).

3. *Permanentní magnety s radiální přednostní osou orientace.* Slouží pro specifické použití, např. magnety pro ložiska a magnetickou spojku, magnety v počítačové technice apod.
4. *Permanentní magnety pólově orientované (multipólové).* Tyto trvalé magnety se používají převážně ve spojení se senzory, v pohonech motorů nebo v generátorech.

Permanentní magnety se vyrábí pro různá užití v různých tvarech, které pak mohou být magnetizovány v různých směrech podle potřeby. Nejčastěji se vyrábí magnety v následujících tvarech a směrech magnetování.

1. Disky a válce – mohou být magnetovány zejména axiálně, diametrálně a multipólově. Příklady směrů magnetování jsou na obrázku 20.



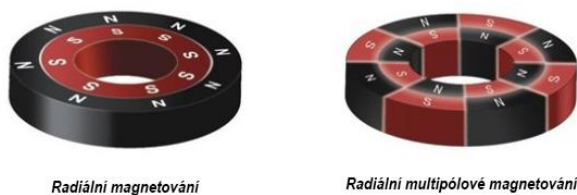
Obrázek 20: Směr magnetizace diskových a válcových magnetů. Převzato z [21]

2. Kvádry – magnetovány jsou ponejvíce axiálně, kolmo na největší plochu a multipólově (viz Obrázek 21).



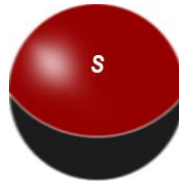
Obrázek 21: Směr magnetizace kvádrových magnetů. Převzato z [21]

3. Prstence a duté válce – magnetovány bývají podobně jako disky a válce axiálně, diametrálně a multipólově. Další využívané směry magnetizace jsou u prstencových magnetů radiální magnetizace a radiální multipólová magnetizace. (viz Obrázek 22).



Obrázek 22: Možnosti magnetování prstencových magnetů. Převzato z [21]

4. Koule – vzhledem ke kulové symetrii je možný jen jeden směr magnetování (viz *Obrázek 23*).



Obrázek 23: Možnosti magnetování magnetů tvaru koule.

5. Segmenty – magnetují se radiálně, diametrálně, někdy kolmo na největší plochu.



Obrázek 24: Možnosti magnetování segmentových magnetů. Převzato z [21]

K namagnetování až do nasycení potřebují permanentní magnety vysokou intenzitu působícího magnetického pole. K tomuto účelu se využívají systémy s magnetovacími cívkami.

Permanentní magnety s axiální nebo diametrální orientací jsou magnetovány v cívkách s pulzním polem. Pro výrobu multipólových, sektorových permanentních magnetů je možné využít pojení jednotlivých magnetů plastem, vložení slabě diamagnetické matrice nebo multipólové namagnetování sintrovaného materiálu. Výhodou je možnost výroby rozličných tvarů magnetických pólů magnetu, kompaktnost nepojeného magnetického materiálu, jeho přesná geometrie, nižší hmotnost a jednoduchá konstrukce. Nevýhodou je pak magnetování ve složitém multipólovém magnetickém poli systému cívek a vysokých magnetizačních energiích díky demagnetizačnímu účinku blízkých pólů. [2] [23]

3 Magnetické pole a síly mezi permanentními magnety

Mezi nejžádanější informace o permanentních magnetech patří silové účinky na jejich okolí. Vzhledem ke svým vlastnostem se používají v přídržných a uchycovacích systémech. Otázka sil působících mezi magnety, případně přídržné síly, kterou je magnet přitahován k určitým podložkám, je poměrně komplikovaná.

Účinky magnetických polí vytvářených permanentními magnety lze popsat jako silové či energetické. Při modelování magnetických interakcí mezi magnety je potřeba vzít v úvahu jejich tvar a jejich vzájemnou polohu a pohyb. Analyticky lze popsat magnetické pole magnetů se základními geometrickými tvary s určitou vzájemnou polohou určenou osou magnetu. Vzájemně se pohybující magnety, rotující apod., se řeší numerickými metodami výpočtu.

3.1 Silové účinky magnetického pole

Silové účinky lze vyjádřit jako záporný gradient energie mezi magnety jako

$$\mathbf{F} = -\text{grad}(E) = (\mathbf{m} \cdot \text{grad})\mathbf{H}, \quad (3.1)$$

kde \mathbf{m} (viz rovnice 1.15) je magnetický elementární dipólový moment a \mathbf{B} je vektor magnetické indukce.

Při předpokladu, že permanentní magnet o materiálovém objemu V s axiální magnetizací \mathbf{M} je vyroben z homogenního magnetického materiálu a orientován shodně s osou z , pak pro sílu působícího magnetického pole s magnetickou indukcí \mathbf{B} v ose z platí:

$$F_z = MV \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (3.2)$$

Složku magnetické indukce B_z lze získat integrací příspěvků magnetických dipólových momentů z celého objemu magnetu, konkrétní vzorce pro výpočet vybraných základních tvarů permanentních magnetů jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14: Vzorce pro výpočet magnetické indukce magnetu v axiální ose. Převzato z [24]

Koule	$B = \frac{2B_r R^3}{3(z + R)^3}$	(3.3)
Válec	$B = \frac{B_r}{2} \left(\frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} - \frac{z - L}{\sqrt{R^2 + (z - L)^2}} \right)$	(3.4)
Prstenec	$B = \frac{B_r}{2} \left\{ \frac{L + z}{\sqrt{R_1^2 + (L + z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_1^2 + z^2}} - \left(\frac{L + z}{\sqrt{R_2^2 + (L + z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_2^2 + z^2}} \right) \right\}$	(3.5)
Kvádr	$B = \frac{B_r}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{ab}{2z\sqrt{4z^2 + a^2 + b^2}} - \operatorname{arctg} \frac{ab}{2(z + c)\sqrt{4(c + z)^2 + a^2 + b^2}} \right)$	(3.6)

B je velikost magnetické indukce v axiální ose (směru magnetizace) v libovolné vzdálenosti z od povrchu magnetu. Další proměnné jsou naznačeny na obrázku 25.

Výpočet magnetické indukce magnetu tvaru koule

- R – poloměr
- z – vzdálenost v ose od povrchu

Výpočet magnetické indukce magnetu tvaru válce

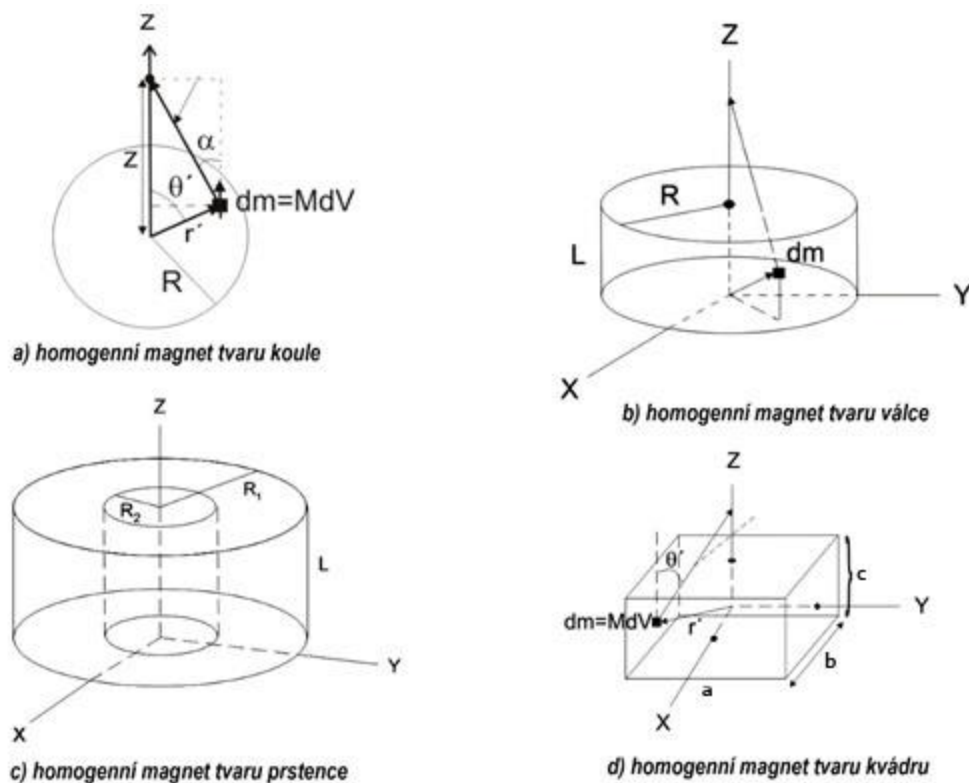
- R – poloměr
- z – vzdálenost v ose od povrchu
- L – výška

Výpočet magnetické indukce magnetu tvaru prstence

- R_1 – vnější poloměr
- R_2 – vnitřní poloměr
- z – vzdálenost v ose od povrchu

Výpočet magnetické indukce magnetu tvaru kvádru magnetovaného kolmo na největší plochu

- a, b, c – délka jednotlivých hran
- z – vzdálenost v ose od povrchu



Obrázek 25: Schéma pro výpočet magnetické indukce různých tvarů magnetů. Převzato z [24]

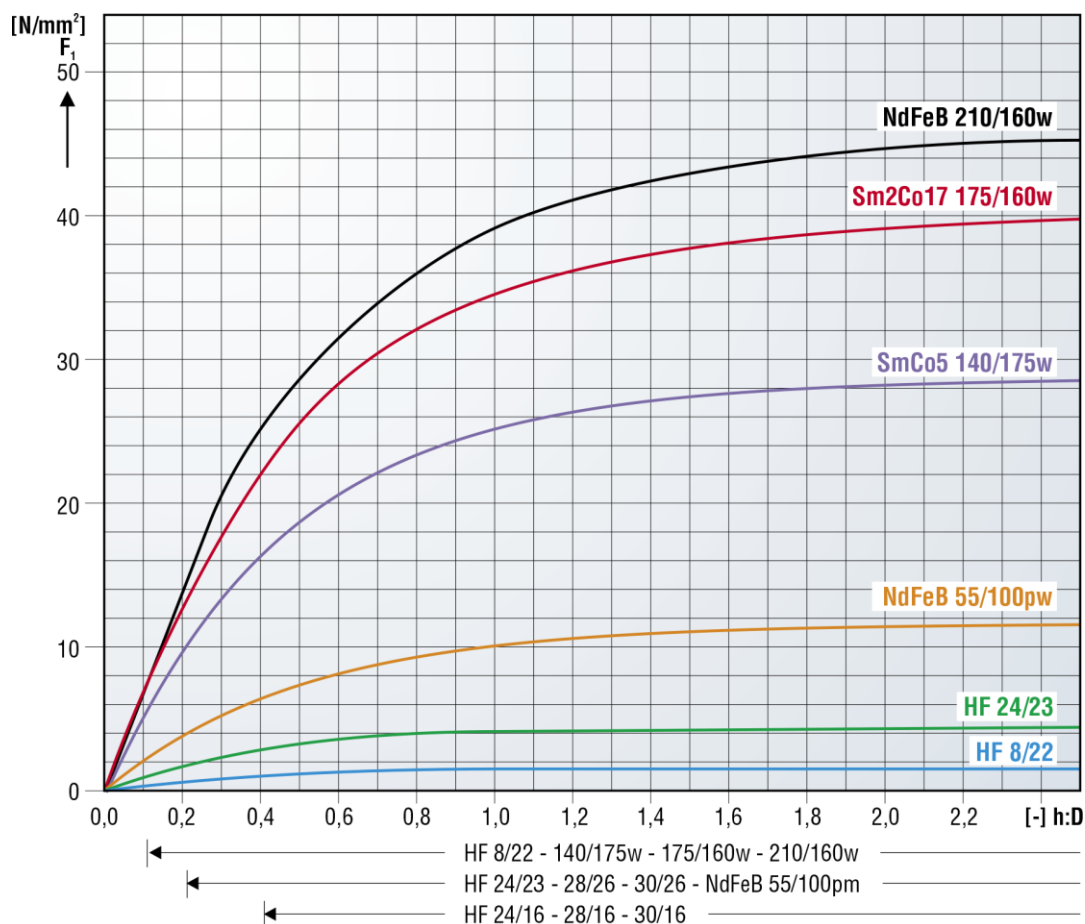
3.2 Přídržná síla magnetu

Přídržná síla magnetu je upínací síla magnetu, kterou je upevněn magnet k podložce, její hodnoty se uvádí v kilogramech (hmotnostní ekvivalent tíhové síly). Velikost přídržné síly závisí na mnoha faktorech. Mezi ty nejdůležitější patří tvar a materiál, ze kterého je vyroben magnet a podložka, ke které je magnet přitahován, na její tloušťce a povrchové úpravě. Velikost síly také závisí na ploše styku a hrubosti povrchu, pokud je magnet v přímém dotyku s podložkou, případně na vzdálenosti od ní.

Přídržná síla kolmého odtrhu F_o pro magnet v přímém styku s podložkou se stanoví ze vztahu

$$F_o = F_1 S, \quad (3.7),$$

kde F_1 je měrná upínací síla daného magnetického materiálu a S je přídržná plocha. Měrnou upínací sílu magnetu lze zjistit ze závislosti na poměru výšky h a průměru D pro daný magnetický materiál z diagramu na obrázku 26.



Obrázek 26: Diagram pro určení měrné přídržné síly. Převzato z [2]

Pro válcové a prstencové magnety průměru D odpovídá vnější průměr magnetu a pro přibližně čtvercový průřez magnetu ve tvaru kvádrů lze odpovídající průměr určit jako:

$$D = \sqrt{\frac{S \cdot 4}{\pi}}, \quad (3.8)$$

kde S je plocha průřezu kolmá na osu magnetizace.

Pro materiál podložky je potřeba dosáhnout co nejvyšší indukce nasycení a nízké hodnoty koercitivity H_c (magneticky měkký materiál). Těmto požadavkům nejlépe vyhovuje nelegovaná nebo nízkolegovaná ocel.

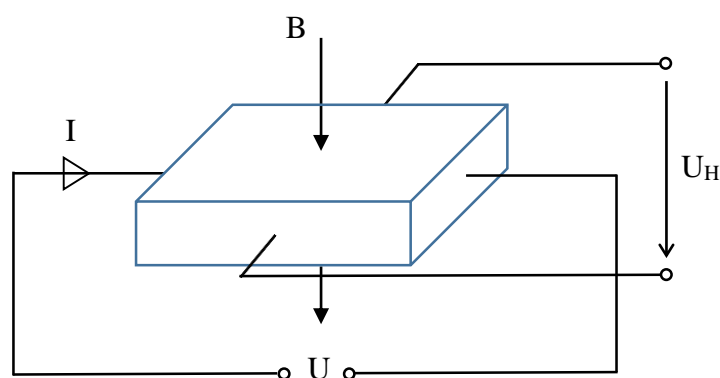
Výše zmíněný výpočet přídržné síly platí pouze pro kolmý odtrh magnetu od podložky. Pro přídržnou sílu rovnoběžně s povrchem (posuv po podložce) platí, že tvoří 25–30 % hodnoty přídržné síly kolmo na plochu a závisí na hrubosti styčných ploch. [2]

4 Měření magnetické indukce permanentního magnetu

4.1 Měření magnetické indukce teslametrem

Jednou z možností, jak měřit magnetickou indukci permanentního magnetu, je využití Hallova jevu v polovodičích (viz *Obrázek 27*). Při průchodu nosičů náboje kovem či polovodičem (o délce l) ve směru kolmém na magnetické pole B dochází k jejich vychýlení a vzniká tak napětí U_H na svorkách o šířce d , které je přímo úměrné velikosti magnetické indukce a platí: [7 s. 70–72]

$$U_H = R_H \frac{BI}{d}. \quad (4.1)$$



Obrázek 27: Schematické znázornění principu Hallova jevu.

Přístroje pracující s využitím Hallova jevu (s tzv. Hallovou sondou) se nazývají *teslametry*. Slouží pro měření stálé či pomalu se měnící hodnoty magnetické indukce ve vzduchu. Z principu Hallova jevu vyplývá, že je měření směrově závislé a správné je jen tehdy, pokud jsou magnetické indukční čáry měřeného magnetického pole kolmé na Hallovu sondu. S jednou Hallovou sondou lze tedy měřit magnetickou indukci v jedné ose. Někdy se využívají také měřicí přístroje s třemi Hallovými sondami pro vykompenzování směrových závislostí.

Vzhledem k drobným výrobním odchylkám se teslametry kalibrují na etalonech dle norem. Přesnost těchto přístrojů se v případě nižší cenové hladiny pohybuje okolo $\pm 5\%$ z rozsahu, v případě dražších přístrojů lze dosahovat přesnosti měření až $\pm 1\%$ z rozsahu. [7] [12]

4.2 Vybrané měřicí přístroje

Pro měření vzorků permanentních magnetů byly k dispozici dva teslametry s Hallovou sondou.

Prvním z nich je PHYWE digital Teslametr pro měření stacionárních i střídavých magnetických polí se třemi rozsahy (20 mT, 200 mT a 2000 mT) s citlivostí 10 μ T kalibrovaný do magnetické indukce 1 T. Přístroj rozlišuje severní a jižní polarizaci dle znaménka před hodnotou (symbol „-“ pro jižní pól). (viz příloha 2 na str. III)

Tabulka 15: Parametry teslametru PHYWE pro měření magnetické indukce stacionárního pole. [25]

rozsah [mT]	rozlišení [mT]	přesnost [%]
20	0,01	2
200	0,1	2
2000	1	2

Druhým užitým teslametrem je rovněž digitální přístroj Akaigu WT10A pro měření stacionárních magnetických polí permanentních magnetů s dvěma rozsahy (200 mT a 2000 mT) s citlivostí 0,1 mT. Přístroj rozlišuje severní a jižní polarizaci symbolem N (severní) a S (jižní). (viz příloha 2 na str. III)

Tabulka 16: Parametry teslametru Akaigu WT10A pro měření magnetické indukce stacionárního pole.

rozsah [mT]	rozlišení [mT]	přesnost [%]
200	0,1	2
2000	1	2 (do 1 T)
2000	1	3 (nad 1 T)

4.3 Výběr vzorků magnetů pro měření magnetické indukce

Pro měření magnetické indukce v ose magnetizace magnetů různých tvarů, srovnání magnetů obdobných rozměrů z různých materiálů a výpočet skutečné hodnoty remanentní indukce byly vybrány vzorky feritových, samarium-kobaltových a neodymových magnetů tvaru koule, disku, prstence a krychle uvedené v tabulce 17.

Tabulka 17: Parametry vzorků uvedených dodavatelem magnetů použitých při měření magnetické indukce.

název	tvar	materiál	magnetizace	koercitivita H_{CB} [kAm^{-1}]	remanence B_r [mT]	prac. teplota T_{max} [°C]
NM-E13N	koule	$Nd_2Fe_{14}B$	N38	876	1220–1300	80
KS-10-N	krychle	$Nd_2Fe_{14}B$	N42	876	1290–1350	80
KR-26-16-05	prstenec	$Nd_2Fe_{14}B$	N42	876	1290–1350	80
KT10-10-N	válec	$Nd_2Fe_{14}B$	N42	876	1290–1350	80
NM-A 20 × 5	válec	$Nd_2Fe_{14}B$	N42	876	1290–1350	80
SM-A 10 × 10	válec	Sm_2Co_{17}	YXG28	756–812	1030–1080	300
SM-A 20 × 5	válec	Sm_2Co_{17}	YXG28	756–812	1030–1080	300
KT-18-06-S	válec	Sm_2Co_{17}	YXG30	788–835	1080–1100	300
FMA-A 10 × 10	válec	$BaFe_{12}O_{19}$	F35	215–239	430–450	200
FMA-A 20 × 5	válec	$BaFe_{12}O_{19}$	F35	215–239	430–450	200
KT-12-10	válec	$BaFe_{12}O_{19}$	F30H	230–275	380–400	250

4.4 Měření magnetické indukce pro různé tvary magnetů

Pro měření magnetické indukce magnetů různých tvarů byly využity vzorky: neodymový magnet NM-E13N tvaru koule, neodymový magnet KS-10N ve tvaru krychle, 2 kusy neodymových magnetů KR-26-16-05 ve tvaru prstence a dva válcové magnety (disky), feritový magnet KT-12-10 a samarium-kobaltový magnet KT-18-06-S.

Pro výpočet teoretických hodnot magnetické indukce v ose magnetizace byly využity vztahy (3.3) až (3.6). Pro výše zmíněné magnety byly vyneseny závislosti naměřené magnetické indukce v závislosti na vzdálenosti od jeho povrchu a stanoveny hodnoty efektivní remanentní indukce B_r pomocí lineární regrese závislosti naměřené indukce v ose magnetu a geometrického faktoru f , který je pro jednotlivé tvary určen:

$$f(\text{koule}) = \frac{2R^3}{3(z+R)^3}. \quad (4.1)$$

$$f(\text{válec}) = \frac{1}{2} \left(\frac{z}{\sqrt{R^2+z^2}} - \frac{z-L}{\sqrt{R^2+(z-L)^2}} \right) \quad (4.2)$$

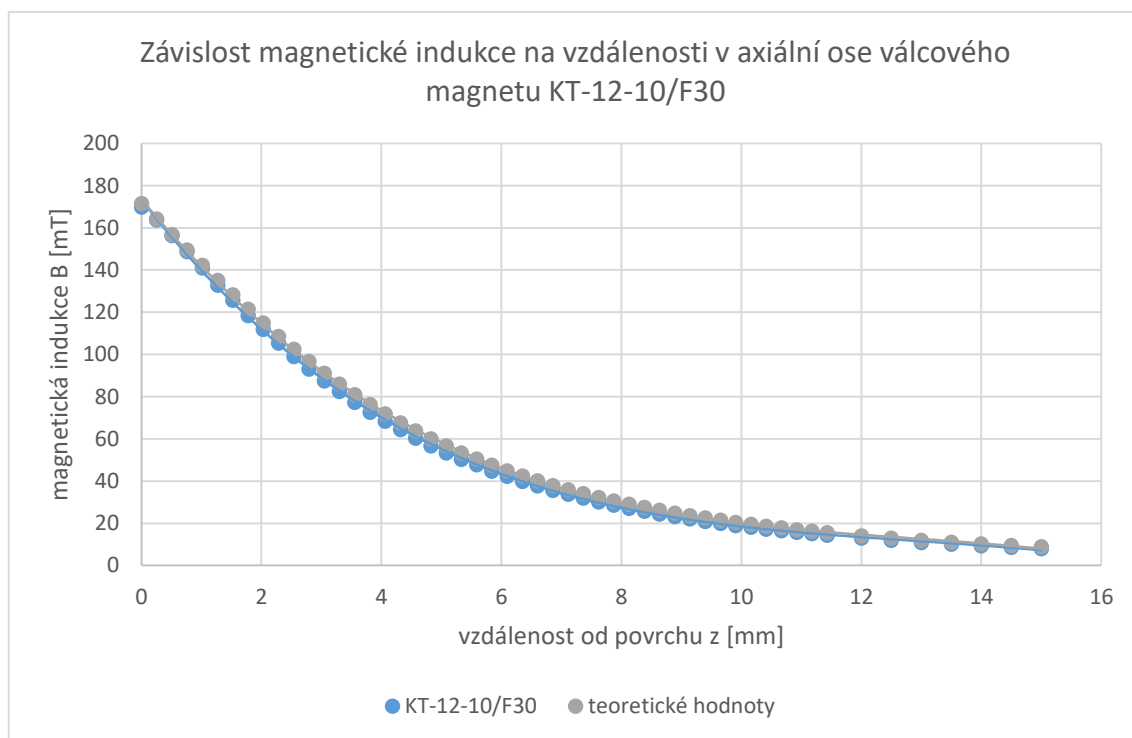
$$f(\text{prstenec}) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{L+z}{\sqrt{R_1^2+(L+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_1^2+z^2}} - \left(\frac{L+z}{\sqrt{R_2^2+(L+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_2^2+z^2}} \right) \right\} \quad (4.3)$$

$$f(\text{kvádr}) = \frac{1}{\pi} \left(\text{arctg} \frac{ab}{2z\sqrt{4z^2+a^2+b^2}} - \text{arctg} \frac{ab}{2(z+c)\sqrt{4(c+z)^2+a^2+b^2}} \right) \quad (4.4)$$

4.4.1 Měření válcového feritového magnetu KT-12-10/F30

Permanentní magnet KT-12-10/F30 je válcový feritový anizotropní magnet s axiální magnetizací s průměrem $(12,0 \pm 0,1)$ mm a délkou $(10,0 \pm 0,1)$ mm.

Měření magnetické indukce magnetu v ose u strany severního pólu proběhlo s přístrojem Akaigu WT10A (bylo provedeno i kontrolní měření přístrojem PHYWE). Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od povrchu magnetu v magnetizační ose byla proměřena od 0 mm až do 15 mm od magnetu, při povrchu magnetu je magnetická indukce $B = (170 \pm 4)$ mT a rychle se vzdáleností klesá. Teoretické hodnoty byly vypočteny ze vztahu (3.4) s předpokládanou remanentní indukcí $B_r = 400$ mT pro magnety s magnetizací F30H. Okolo počátku lze vidět nehomogenní chování pravděpodobně vzhledem ke konečným rozměrům Hallovy sondy. Průběh měření napovídá, že skutečná hodnota remanentní indukce je velice blízká hodnotě uváděné výrobcem. Pomocí lineární regrese závislosti změřené magnetické indukce na rozměrovém faktoru byla vypočtena hodnota efektivní remanentní indukce $B_r = (398 \pm 2)$ mT. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou v příloze 3 str. IV–V.

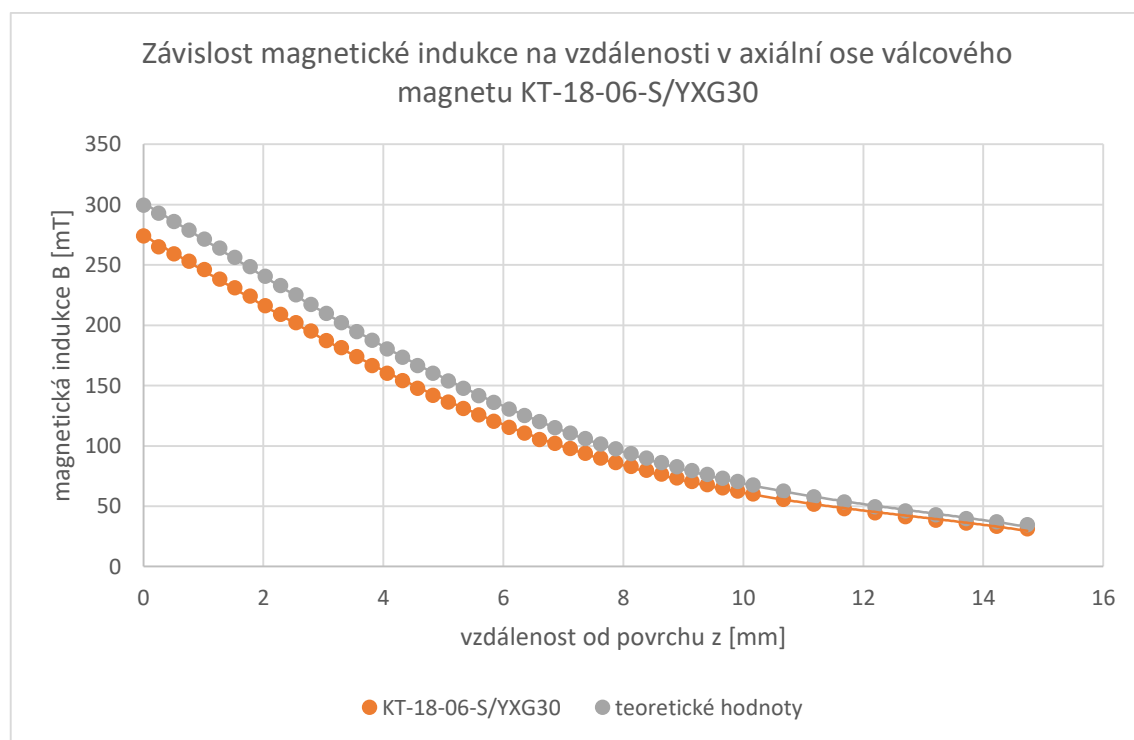


Graf 1: Závislost magnetické indukce na vzdálenosti v axiální ose válcového magnetu KT-12-10/F30

4.4.2 Měření magnetické indukce samariového magnetu KT-18-06-S/YXG30

Permanentní magnet KT-18-06-S/YXG30 je samarium-kobaltový sintrovaný válcový magnet s axiální magnetizací, s průměrem $(18,0 \pm 0,1)$ mm a délkou $(6,0 \pm 0,1)$ mm.

Měření magnetické indukce magnetu v ose u strany severního pólu proběhlo s přístrojem Akaigu WT10A (bylo provedeno i kontrolní měření přístrojem PHYWE). Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od povrchu magnetu v magnetizační ose byla proměřena od 0 mm až do cca 15 mm od magnetu, při povrchu magnetu je magnetická indukce $B = (274 \pm 9)$ mT a až do vzdálenosti 5 mm klesá téměř lineárně. Teoretické hodnoty byly vypočteny ze vztahu (3.4) s předpokládanou remanentní indukci $B_r = 1080$ mT pro magnety s magnetizací YXG30. Průběh měření napovídá, že skutečná magnetizace je oproti hodnotám udávaným výrobcem menší. Hodnota efektivní remanentní indukce byla stanovena lineární regresí na $B_r = (979 \pm 5)$ mT. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou v příloze 4 str. VI–VII.

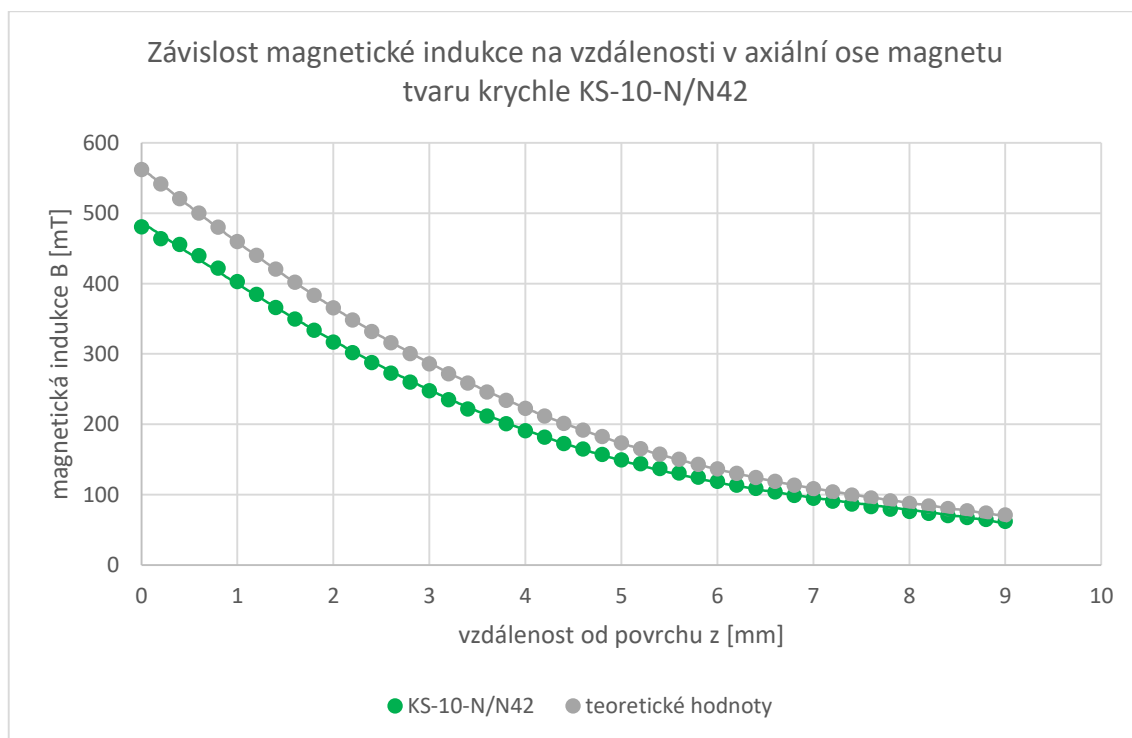


Graf 2: Závislost magnetické indukce na vzdálenosti v axiální ose válcového magnetu KT-18-06-S/YXG30

4.4.3 Měření krychlového magnetu KS-10-N/N42

Permanentní magnet KS-10-N/N42 je sintrovaný neodymový poniklovaný magnet tvaru krychle s axiální magnetizací s hranou $(10,0 \pm 0,1)$ mm.

Měření magnetické indukce magnetu v ose u strany severního pólu proběhlo s přístrojem Akaigu WT10A. Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od povrchu magnetu v magnetizační ose byla proměřena od 0 mm až do 15 mm od magnetu, při povrchu magnetu je magnetická indukce $B = (481 \pm 11)$ mT a opět rychle se vzdáleností klesá. Teoretické hodnoty byly vypočteny ze vztahu (3.6) s předpokládanou remanentní indukcí $B_r = 1290$ mT pro magnety s magnetizací N42. Okolo počátku lze vidět nehomogenní chování pravděpodobně vzhledem ke konečným rozměrům Hallovy sondy. Průběh měření napovídá, že skutečná magnetizace je oproti hodnotám udávaným výrobcem menší, hodnota efektivní remanentní indukce byla opět stanovena lineární regresí na $B_r = (1119 \pm 4)$ mT. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou v příloze 5 str. VIII–IX.

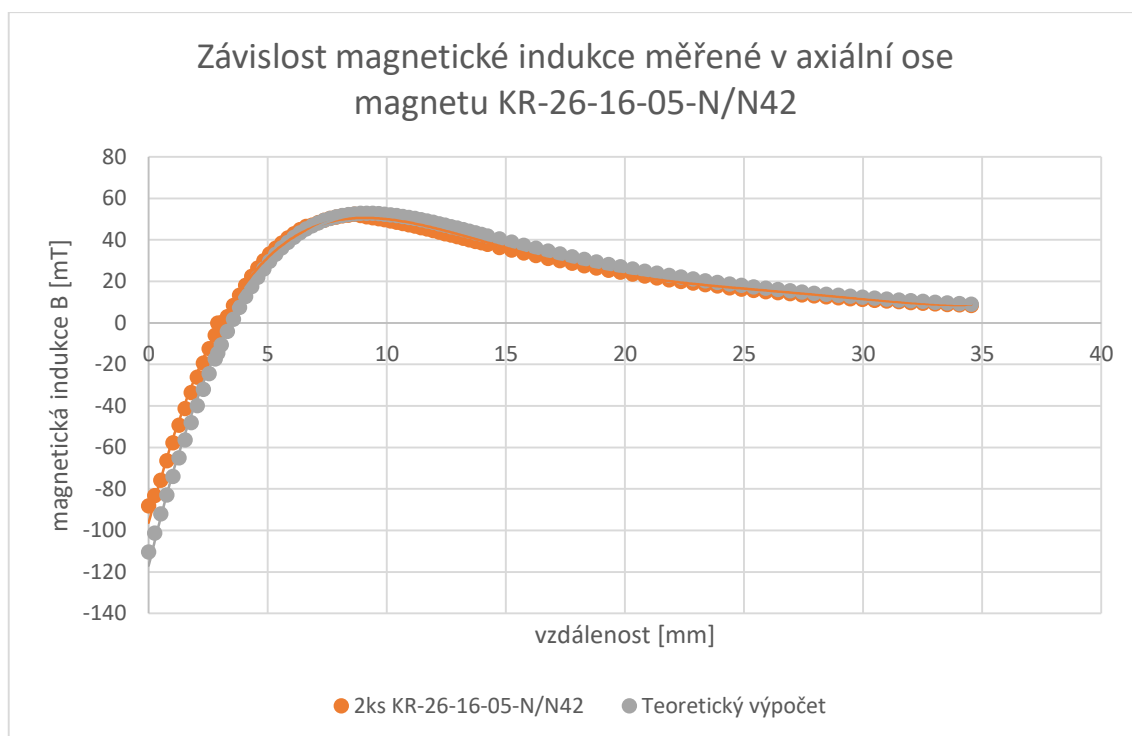


Graf 3: Závislost magnetické indukce na vzdálenosti v axiální ose magnetu tvaru krychle KS-10-N/N42

4.4.4 Měření prstencového magnetu KR-26-16-05-N/N42

Permanentní magnet KR-26-16-05-N/N42 je sintrovaný neodymový poniklovaný magnet tvaru prstence s axiální magnetizací, vnějším průměrem $(26,0 \pm 0,1)$ mm, vnitřním průměrem $(16,0 \pm 0,1)$ mm a výškou $(5,0 \pm 0,1)$ mm.

Měření magnetické indukce dvou kusů magnetů řazených za sebe v ose na straně severního pólu proběhlo s přístrojem PHYWE. Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od povrchu magnetu v magnetizační ose byla proměřena od 0 mm až do cca 35 mm od magnetu. Na ose magnetu v úrovni jeho povrchu je magnetická indukce díky uzavření magnetického pole vnitřním průměrem $B = (-88 \pm 2)$ mT. S rostoucí vzdáleností klesá a ve vzdálenosti 2,9 mm nabývá magnetická indukce nulové hodnoty, v tomto místě se vyrovnává vliv uzavření magnetického pole vnějším prostorem a vnitřním průměrem magnetu. Hodnoty indukce narůstají poté do maxima $B = (52 \pm 1)$ mT ve vzdálenosti cca 8,7 mm a dále pak s rostoucí vzdáleností klesají. Teoretické hodnoty byly vypočteny ze vztahu (3.5) s předpokládanou remanentní indukcí $B_r = 1290$ mT pro magnety s magnetizací N42. Průběh měření napovídá, že skutečná hodnota remanentní indukce je menší, než hodnota udávaná výrobcem. Skutečná hodnota remanentní indukce byla opět stanovena lineární regresí na $B_r = (1160 \pm 10)$ mT. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou v příloze 6 str. X–XII.

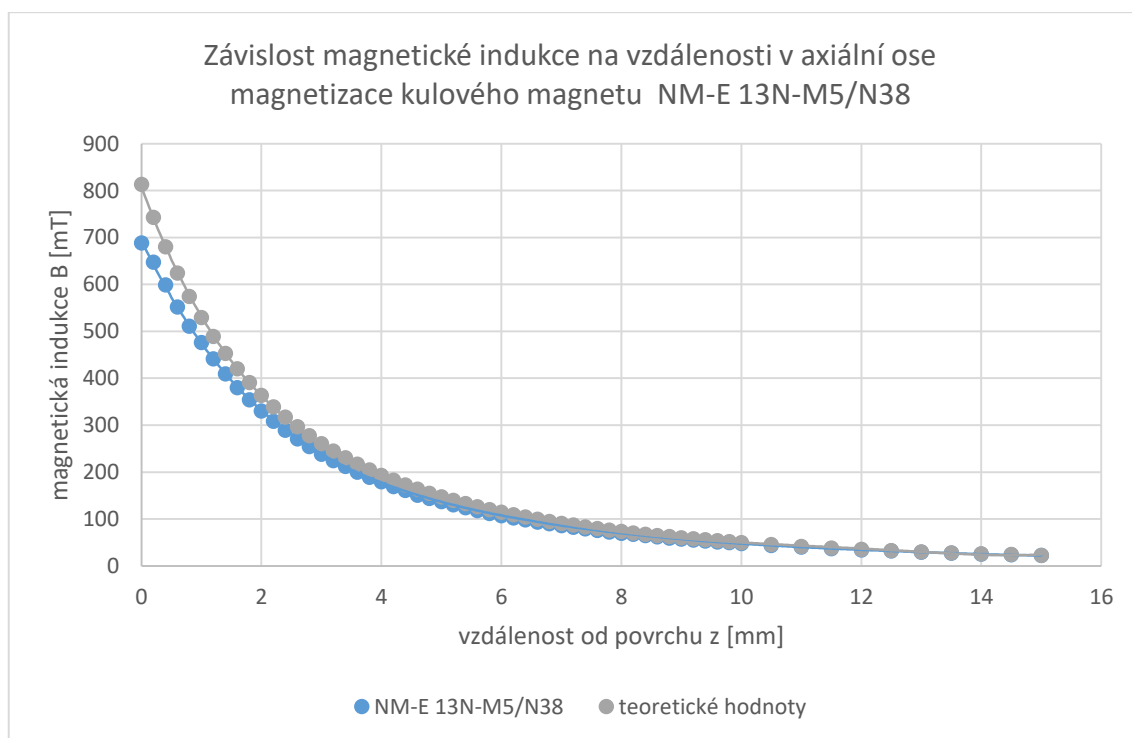


Graf 4: Závislost magnetické indukce měřené v axiální ose prstencového magnetu KR-26-16-05-N/N42

4.4.5 Měření kulového magnetu NM-E 13N-M5/N38

Permanentní magnet NM-E 13N-M5/N38 je sintrovaný neodymový poniklovaný magnet tvaru koule s axiální magnetizací N38 a s průměrem $(12,0 \pm 0,1)$ mm.

Měření magnetické indukce magnetu v ose u strany jižního pólu proběhlo s přístrojem Akaigu WT10A. Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od povrchu magnetu v magnetizační ose byla proměřena od 0 mm až do 15 mm od magnetu, při povrchu magnetu je magnetická indukce $B = (688 \pm 15)$ mT a vzhledem ke geometrii tělesa se vzdáleností velice rychle klesá. Teoretické hodnoty byly vypočteny ze vztahu (3.3) s předpokládanou remanentní indukci $B_r = 1220$ mT pro magnety s magnetizací N38. Průběh měření napovídá, že skutečná magnetizace je oproti hodnotám udávaným výrobcem menší. Skutečná hodnota remanentní indukce byla opět stanovena lineární regresí na $B_r = (1065 \pm 8)$ mT. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou v příloze 7 str. XIII–XIV.



Graf 5: Závislost magnetické indukce na vzdálenosti v axiální ose magnetizace kulového magnetu NM-E 13N-M5/N38

4.5 Porovnání magnetů shodných rozměrů z různých materiálů

Pro porovnání magnetů tvaru válce (disku) byly využity tři sady vzorků.

- Tři válcové magnety s průměrem $(10,0 \pm 0,1)$ mm a délkou $(10,0 \pm 0,1)$ mm. Neodymový KT10-10-N/N42, samarium-kobaltový SM-A $\varnothing 10 \times 10$ mm a feritový FMA-A $\varnothing 10 \times 10$ mm. (viz kapitola 4.5.1)
- Tři válcové magnety s průměrem $(20,0 \pm 0,1)$ mm a délkou $(5,0 \pm 0,1)$ mm. Neodymový magnet NM-A $\varnothing 20 \times 5$ mm, samarium-kobaltový SM-A $\varnothing 20 \times 5$ mm a feritový FMA-A $\varnothing 20 \times 5$ mm. (viz kapitola 4.5.2)
- Pět kusů feritových magnetů FMA-A $\varnothing 20 \times 5$ mm a pět kusů neodymových magnetů NM-A $\varnothing 20 \times 5$ mm s průměrem $(20,0 \pm 0,1)$ mm a délkou $(5,0 \pm 0,1)$ mm řazených za sebe. (viz kapitola 4.5.3)

4.5.1 Měření válcových magnetů o rozměrech $\varnothing 10 \times 10$ mm

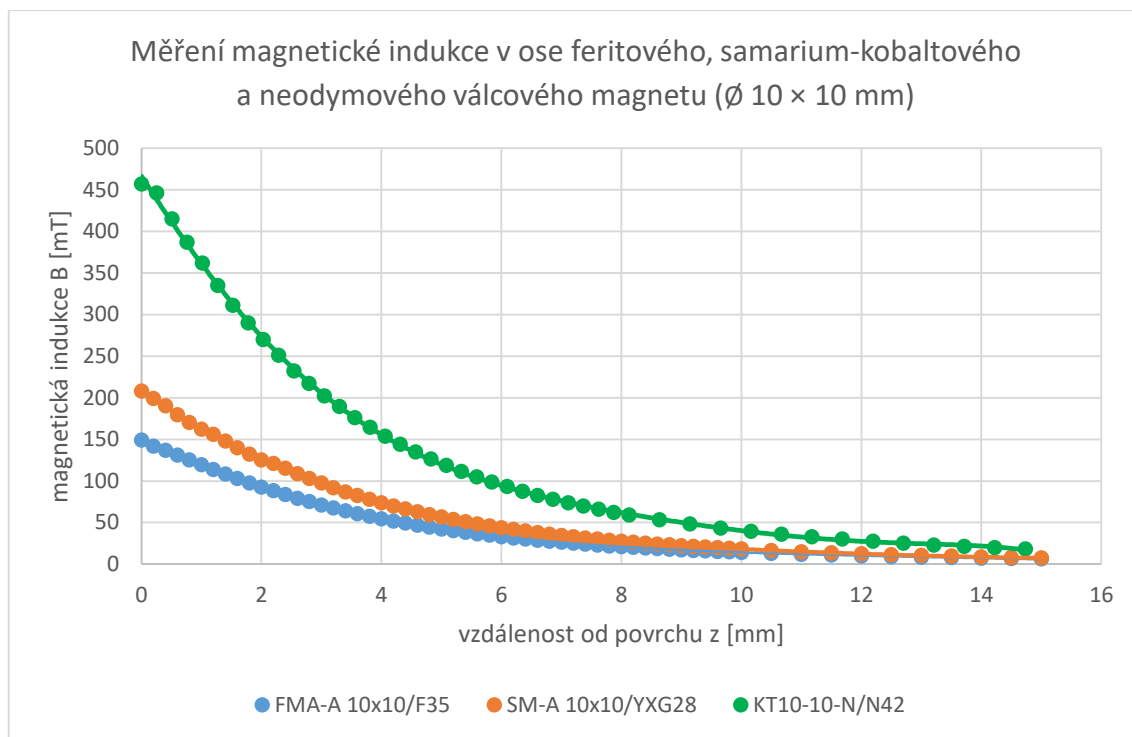
Měření magnetické indukce tří magnetů (neodymový, samarium-kobaltový a feritový) v ose na straně severního pólu proběhlo s přístrojem Akaigu WT10A. Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od povrchu v magnetizační ose byla proměřena u každého z magnetů od 0 mm až do 15 mm od povrchu.

Naměřené hodnoty magnetické indukce u povrchu, hodnoty efektivní remanentní indukce stanovené lineární regresí včetně chyb měření jsou v tabulce 18, veškeré naměřené a vypočtené hodnoty jsou pak v příloze 8, 9 a 10 str. XV–XX.

Z měření vyplývá, že efektivní hodnota remanentní indukce všech tří druhů magnetů je menší než hodnota udávaná výrobcem. Neodymový magnet má nejvyšší hodnoty indukce a feritový nejmenší. U samarium-kobaltového magnetu SM-A $\varnothing 10 \times 10$ mm je efektivní remanentní indukce pouze 42 % hodnoty udávané výrobcem. Tento rozdíl může být dán poškozením magnetu ještě před dodáním (nevhodným skladováním v silném magnetickém poli, dosažení Curieovy teploty), chybným označením magnetu dodavatelem či špatným výrobním procesem. Aby byla vyloučena chyba měření, bylo provedeno kontrolní měření na straně jižního pólu magnetu.

Tabulka 18: Naměřené a vypočtené hodnoty měření magnetů s rozměry $\varnothing 10 \times 10$ mm

magnet	efektivní remanence B_r [mT]	indukce u povrchu B [mT]
KT10-10-N/N42	1010 ± 10	460 ± 10
SM-A $\varnothing 10 \times 10$ mm	458 ± 2	208 ± 5
FMA-A $\varnothing 10 \times 10$ mm	330 ± 1	149 ± 4



Graf 6: Měření magnetické indukce v ose feritového, samarium-kobaltového a neodymového válcového magnetu s rozměry $\varnothing 10 \times 10$ mm.

4.5.2 Měření válcových magnetů o rozměrech $\varnothing 20 \times 5$ mm

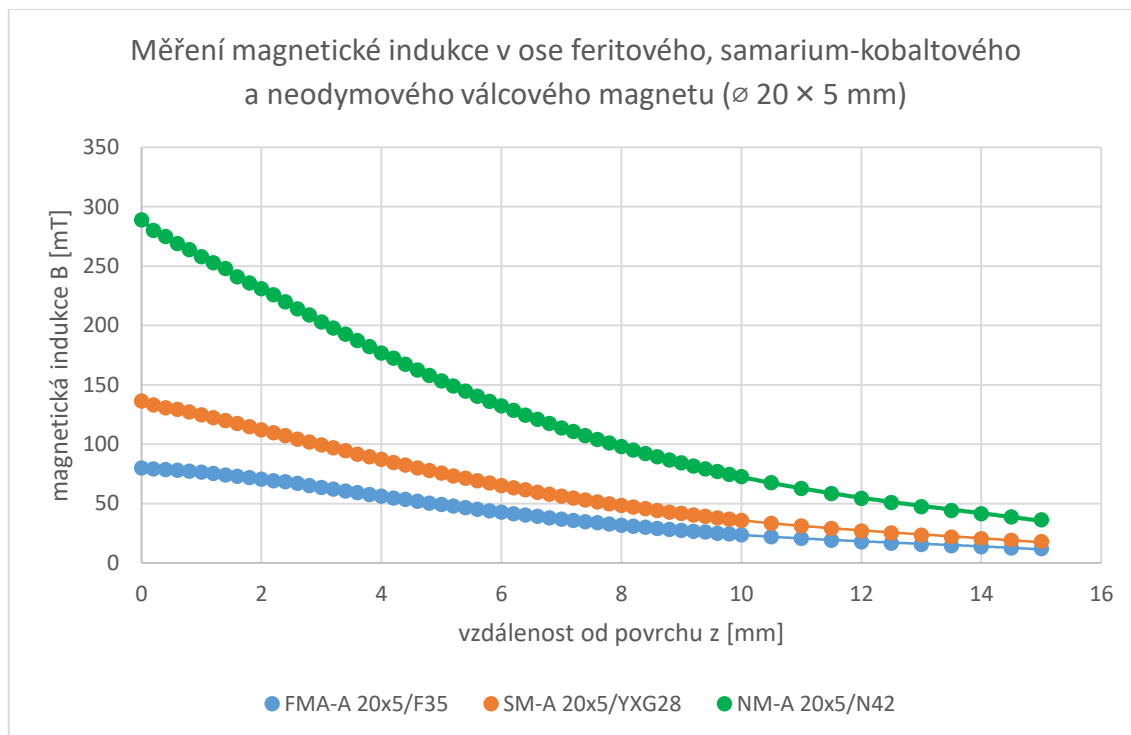
Měření magnetické indukce tří magnetů (neodymový, samarium-kobaltový a feritový) v ose na straně severního pólu proběhlo s přístrojem Akaigu WT10A. Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od povrchu v magnetizační ose byla proměřena u každého z magnetů od 0 mm až do 15 mm od povrchu.

Naměřené hodnoty magnetické indukce u povrchu, hodnoty efektivní remanentní indukce stanovené lineární regresí včetně chyb měření jsou v tabulce 19, veškeré naměřené a vypočtené hodnoty jsou pak v příloze 11–15 str. XV–XXIX.

Dle očekávání má neodymový magnet nejvyšší hodnoty magnetické indukce a feritový nejmenší. Z měření vyplývá, že hodnota efektivní remanentní indukce měřeného neodymového magnetu je velmi blízká hodnotě udávané výrobcem, u měřeného feritového magnetu je asi o 15 % menší než hodnota uvedená výrobcem pro magnetizaci F35. U samarium-kobaltového magnetu SM-A $\varnothing 20 \times 5$ mm je efektivní remanentní indukce jako u měření magnetu s rozměry 10×10 mm podstatně menší, tvoří pouze 56 % hodnoty udávané výrobcem. Aby byla vyloučena chyba měření, bylo provedeno kontrolní měření na straně jižního pólu magnetu.

magnet	efektivní remanence B_r [mT]	indukce u povrchu B [mT]
NM-A $\varnothing 20 \times 5$ mm /N42	1270 \pm 20	289 \pm 7
SM-A $\varnothing 20 \times 5$ mm /YXG28	607 \pm 4	136 \pm 4
FMA-A $\varnothing 20 \times 5$ mm /F35	365 \pm 4	80 \pm 3

Tabulka 19: Naměřené a vypočtené hodnoty měření magnetů s rozměry $\varnothing 20 \times 5$ mm.

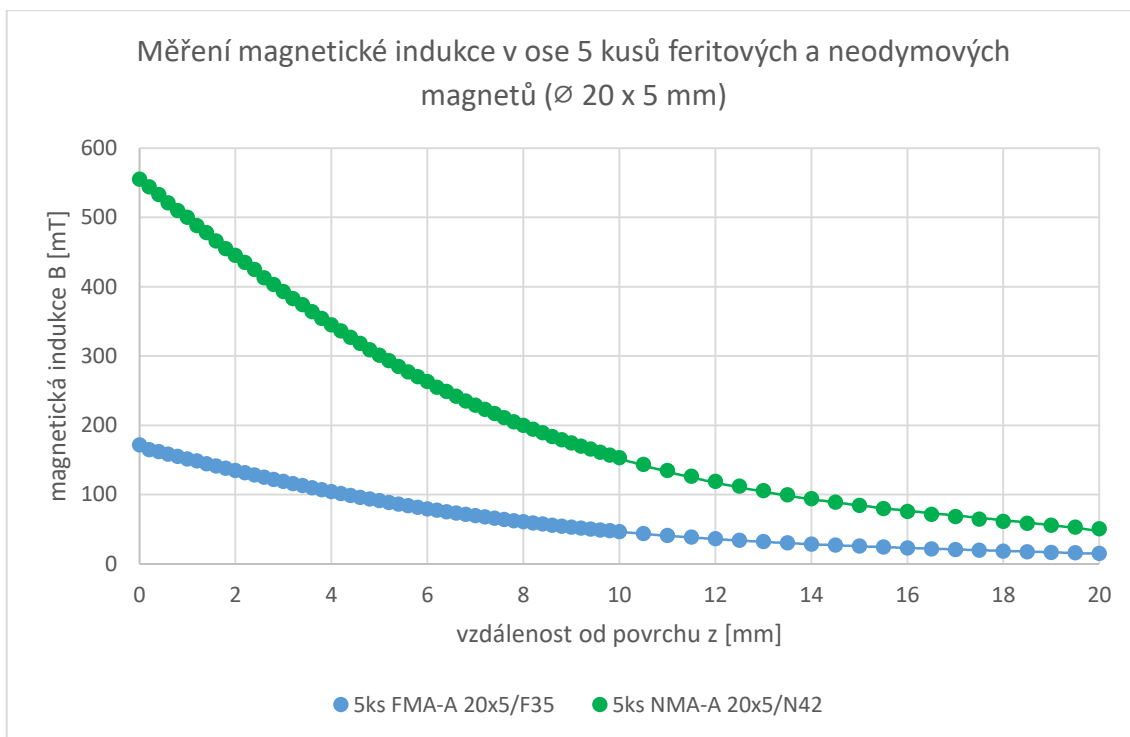


Graf 7: Měření magnetické indukce v ose feritového, samarium-kobaltového a neodymového válcového magnetu s rozměry $\varnothing 20 \times 5$ mm.

4.5.3 Měření pěti kusů magnetů o rozměrech $\varnothing 20 \times 5$ mm

Měření magnetické indukce pěti kusů magnetů řazených za sebe (neodymové a feritové) v ose magnetizace na straně severního pólu proběhlo s přístrojem PHYWE (kontrolní měření přístrojem Akaigu WT10A). Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od povrchu v magnetizační ose byla proměřena od 0 mm až do 20 mm od povrchu. V případě homogenního magnetického materiálu a nulové vzduchové mezery mezi řazenými magnety by se i magnety řazené za sebe měly projevit homogenním chováním. Menší odchylky mohou vzniknout případnými nečistotami mezi magnety a u neodymových magnetů je potřeba přihlídnout k poniklování o neznámé tloušťce.

Naměřené hodnoty magnetické indukce u povrchu, hodnoty efektivní remanentní indukce stanovené lineární regresí včetně chyb měření jsou v tabulce 20, veškeré naměřené a vypočtené hodnoty jsou pak v příloze 11–15 str. XV–XXIX.



Graf 8: Měření magnetické indukce v ose 5 kusů feritových a neodymových magnetů (∅ 20 × 5 mm)

Z měření vyplývá, že hodnota efektivní remanentní indukce měřených neodymových magnetů i feritových magnetů řádově odpovídající hodnotě udávané výrobcem.

Tabulka 20: Naměřené a vypočtené hodnoty měření 5 kusů magnetů s rozměry ∅ 20 × 5 mm

5ks magnetů	efektivní remanence B_r [mT]	indukce u povrchu B [mT]
NM-A ∅ 20 × 5 mm /N42	1195 ± 1	555 ± 12
FMA-A ∅ 20 × 5 mm /F35	363 ± 1	172 ± 4

5 Měření magnetické polarizace kompenzací tíhovou silou

Síla působící mezi dvěma permanentními magnety popsaná v kapitole 3 může mít charakter přitažlivý a odpuzivý, v obou případech má však stejnou absolutní velikost. Je možné využít odpuzivých účinků síly působící mezi dvěma stejnými magnety a její velikost měřit kompenzací tíhovou silou zatěžováním jednoho z nich nemagnetickým závažím.

Magnetickou sílu válcového magnetu můžeme určit ze vztahů (3.2) a (3.4). Derivací (3.4) získáme:

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} = \frac{B_r}{2} R^2 \left\{ \frac{1}{(R^2+z^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{(R^2+(z-L)^2)^{\frac{3}{2}}} \right\}. \quad (5.1)$$

Pro další užití výraz ve složené závorce označíme f . Dosazením do (3.2) při objemu válce $V = \pi R^2 L$, pro $M = \frac{B}{\mu_0}$ a $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ platí pro homogenní válcový magnet s magnetizací M :

$$F_z = \frac{\pi M^2 R^4 L}{2\mu_0} f \quad (5.2)$$

5.1 Měření magnetické polarizace magnetu KT-20-5N/N42

Samotné měření proběhlo na přípravku pro udržení osové polohy, kde je v dolní části upevněný magnet. (viz *Obrázek příloha 1*) Na horním jezdcí je upevněný stejný magnet otočený stejným pólem ke spodnímu magnetu tak, aby se osově odpuzovaly. Na horní jezdec lze umisťovat nemagnetická závaží, rovněž celý přípravek je zkonstruován z takových látek, aby neovlivňoval měření. Hmotnost jezdce m_j není třeba znát, magnetickou polarizaci lze získat pomocí lineární regrese ze vztahu:

$$m_z g = \frac{\pi M^2 R^4 L}{2\mu_0} f - m_j g \quad (5.3)$$

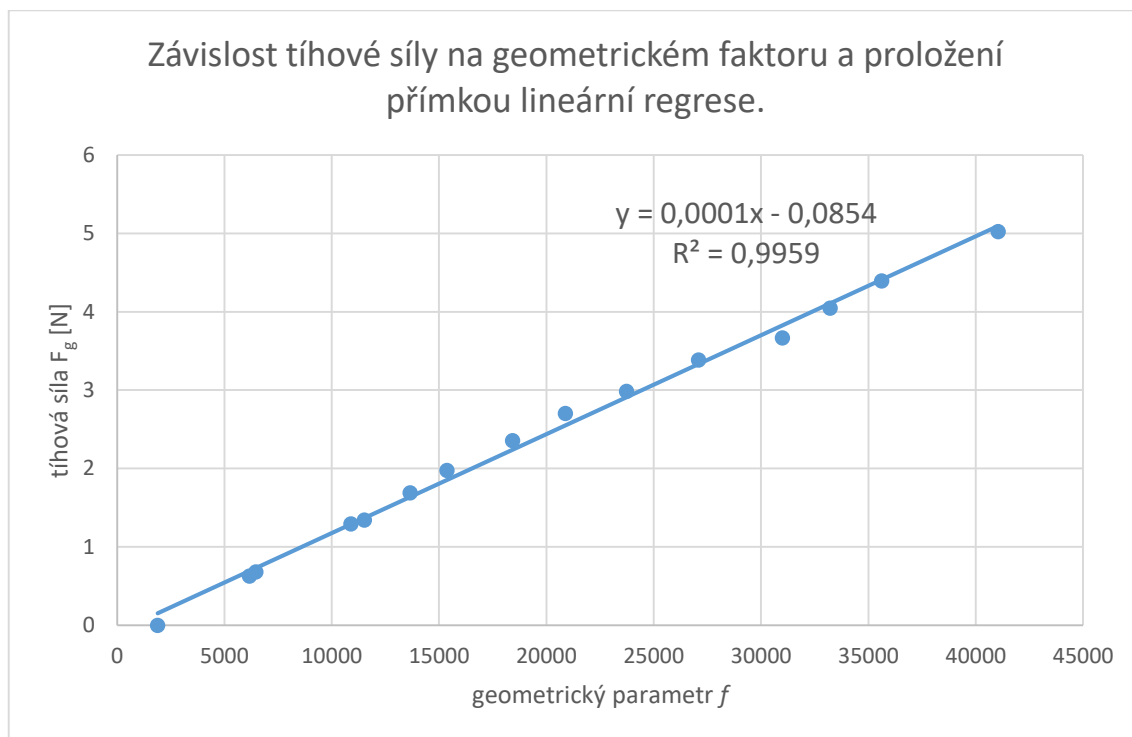
pro parametry $x = f$ a $y = m_z \cdot g$. Magnetizaci pak určíme jako:

$$M = \sqrt{\frac{2\mu_0 k}{\pi R^4 L}} \quad (5.4)$$

Tabulka 21: Měření magnetické polarizace kompenzací tíhovou silou.

m_z [g]	z [mm]	geometrický faktor f [m^{-3}]	F_g [N]
0,00	52,0	1886,5	0,00
64,19	38,0	6158,2	0,63
69,39	37,5	6466,8	0,68
131,89	32,5	10889,1	1,29
137,09	32,0	11511,3	1,34
172,46	30,5	13656,2	1,69
201,28	29,5	15358,6	1,97
240,16	28,0	18421,8	2,35
275,58	27,0	20877,7	2,70
304,35	26,0	23737,9	2,98
344,97	25,0	27080,3	3,38
373,74	24,0	30999,3	3,66
412,67	23,5	33209,9	4,05
448,04	23,0	35609,6	4,39
512,23	22,0	41050,0	5,02

Výsledkem lineární regrese je přímka $y = 0,000126166 \cdot k - 0,08539$, porovnáním s rovnicí (5.3) a dosazením do (5.4) získáme výslednou magnetizaci $M = (1,4 \pm 0,2) T$. Údaj odpovídá hodnotě remanentní indukce stanovené výrobcem 1220 mT pro výrobní magnetizaci N42.



Graf 9: Závislost tíhové síly na geometrickém faktoru a proložení přímkou lineární regrese.

6 Zobrazování magnetického pole

Magnetické pole je lidskému oku neviditelné a pro jeho znázornění je potřeba využít účinků na feromagnetické látky v jeho okolí. Kolem magnetu lze rozmístit magnetky (např. knoflíkové kompas), které se v něm natočí podél magnetických indukčních čar.

Velice rozšířeným způsobem je použití železných pilin, kterými se posype podložka umístěná v magnetickém poli (příp. položená na magnetu). Piliny vytvářejí řetězce a uspořádají se do obrazce, který znázorňuje magnetické indukční čáry v okolí magnetu. Nejvíce pilin se pak nashromáždí v okolí pólů magnetu díky největší magnetické indukci v jejich blízkosti. [27]

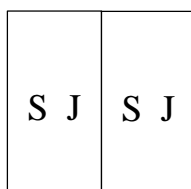
Dalším způsobem, jak zkoumat magnetické pole magnetů, je použití speciální FLUX sensorové fólie, což je speciální velmi tenká vrstva s malými částicemi feromagnetického materiálu (zpravidla niklu) v rosolovité suspenzi, takže celá struktura připomíná tekuté krystaly. Natočení částic niklu v magnetickém poli způsobí ztmavnutí v místech, kde jsou magnetické indukční čáry kolmé k fólii a zesvětlení, pokud probíhají rovnoběžně k fólii. Po oddálení fólie z magnetického pole trvá její zmagnetovaný stav a vzniklý obrazec zcela nezmizí. Posunutím přes zdroj magnetického pole s dostatečně dlouhou homogenní částí lze tyto obrazce vymazat a nastavit všechny niklové částice jedním směrem. [28]

Poslední možností je tekutá látka zvaná ferrofluid, což je stabilní koloidální suspenze magnetických nanočástic o velikosti cca 10 nm vázaná v tekutém rozpouštědle. Nanočástice jsou většinou z magnetitu nebo hematitu. Aby se nanočástice neshlukovaly, jsou obaleny povrchově aktivní látkou, která kolem částic vytváří kladný elektrický náboj a částice se vzájemně odpuzují. Volný pohyb nanočástic je zajištěn rozpouštědlem, ve kterém zůstává celý ferrofluid homogenní. Částice mají náhodný magnetický moment, který se bez přítomnosti vnějšího magnetického pole vzájemně vykompenzuje a ferrofluid se chová jako běžná kapalina. V přítomnosti magnetického pole se částice uspořádají podél magnetických indukčních čar podle svých magnetických momentů. Na výsledný tvar ferrofluidu má vliv ještě povrchové napětí kapaliny a tíhová síla. [29]

6.1 Zobrazení magnetického pole válcových magnetů NM-A $\varnothing 20 \times 5$ mm /N42

Neodymový magnet NM-A $\varnothing 20 \times 5$ mm /N42 (viz *Obrázek 29*) byl využit pro měření magnetické indukce (viz *kapitola 4.5.2*), jeho parametry nalezneme v tabulce 17.

Pro experimentální zobrazení byly zvoleny 2 kusy řazené za sebe (viz *Obrázek 28*). Dále poté 5 kusů řazených za sebou a oddělených plastovou podložkou.

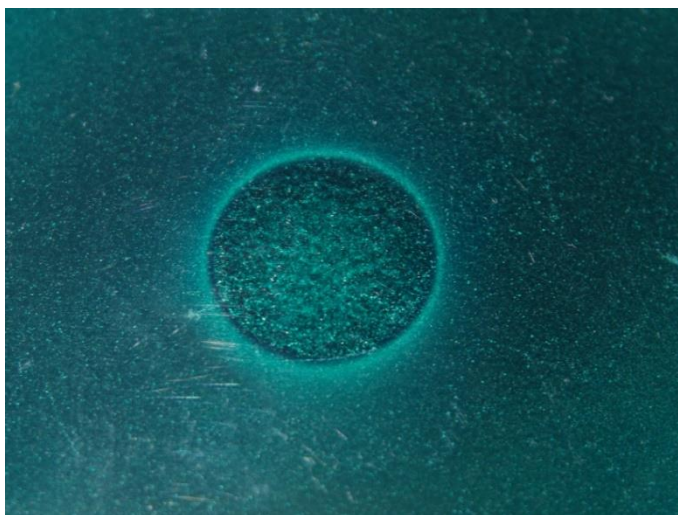


Obrázek 28: Polarizace dvou magnetů řazených za sebou

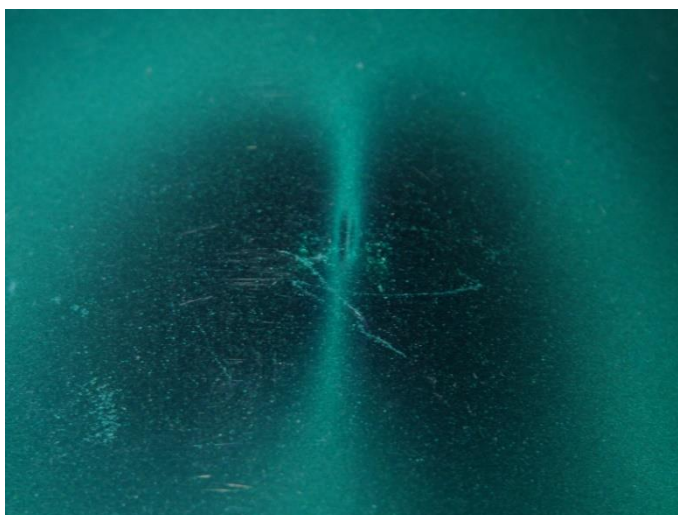
Na obrázku 30 je zobrazeno magnetické pole magnetů položením flux detektorové fólie na povrch magnetů kolmo k ose magnetizace, je vidět prostup magnetických indukčních čar fólií (ztmavnutí) uvnitř magnetu a zesvětlení na jeho okrajích, kde je velká změna směru indukčních čar. Podélné uložení fólie je pak zobrazeno na obrázku 31 (pro pět kusů oddělených plastovou podložkou na obrázku 32). Mezi magnety se magnetické indukční čáry uzavírají podél osy magnetizace.



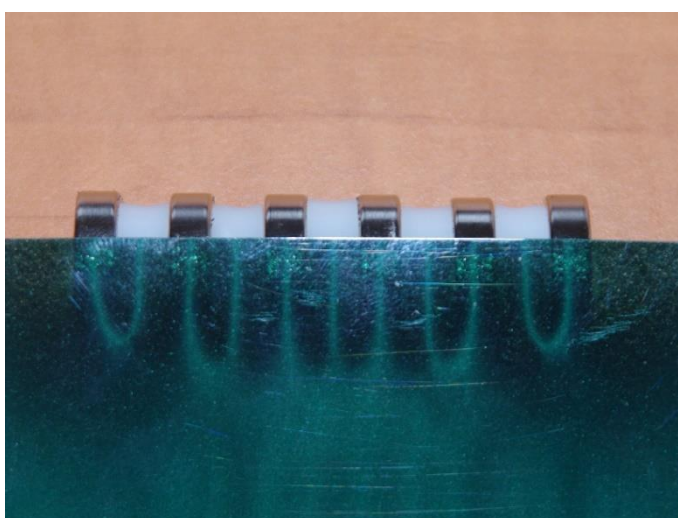
Obrázek 29: Dva kusy neodymových magnetů NM-A $\varnothing 20 \times 5$ mm /N42.



Obrázek 30: Flux detektorová fólie na dvou válcových magnetech kolmo k ose magnetizace.

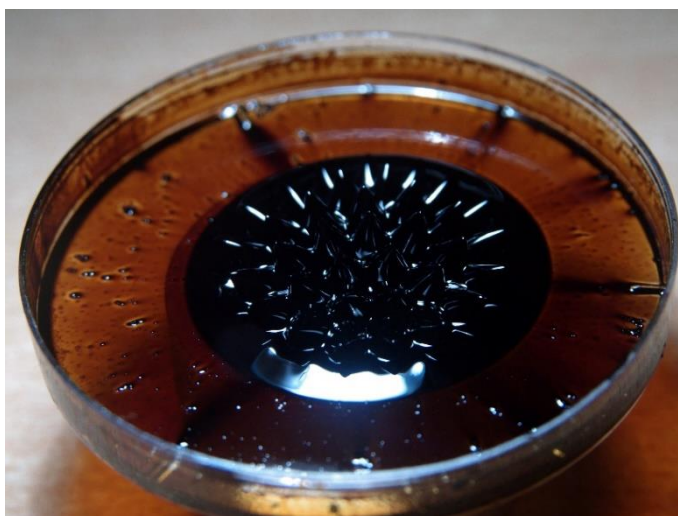


Obrázek 31: Flux detektorová fólie na dvou válcových magnetech podél osy magnetizace.

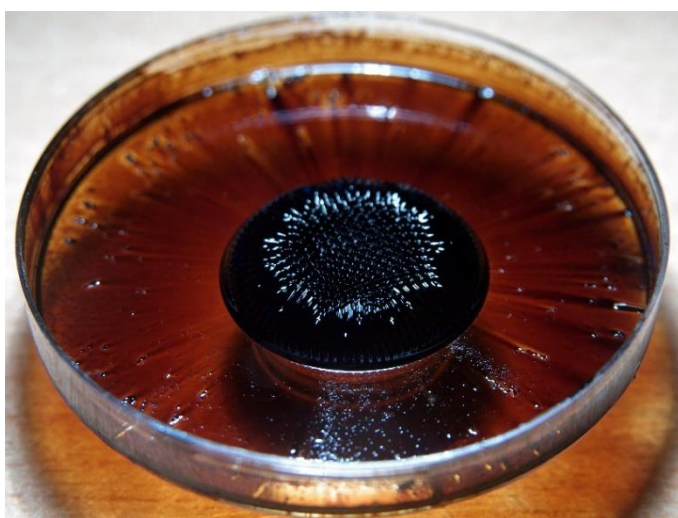


Obrázek 32: Flux detektorová fólie umístěná podél osy magnetizace na pěti válcových magnetech.

Zobrazení magnetického pole působením na kapalinu ferrofluid je pak na obrázcích 33 až 35. Kapalina ferrofluid je kapátkem umístěna do plastové Petriho misky a magnet opatrně přiblížen ke spodní části misky. Na obrázku 33 jsou dva kusy magnetu umístěny ve vzdálenosti zhruba 2 cm od misky, na obrázku 34 jsou přiloženy přímo ke spodní části. Kapalina vytvoří jakési hroty, jejichž nasměrování odpovídá směru magnetických indukčních čar. Ve větší vzdálenosti jsou tyto hroty větší a méně hustě rozložené. Na fotografii 35 je patrné, že je kapalina přitahována velmi silně, přitažlivá síla magnetického pole jí nedovolí uniknout.



Obrázek 33: Kapalina ferrofluid ve vzdálenosti 2 cm od válcových magnetů.



Obrázek 34: Kapalina ferrofluid v těsné blízkosti od válcových magnetů.



Obrázek 35: Magnetické pole nedovolí kapalině ferrofluid uniknout z misky.

6.2 Zobrazení magnetického pole magnetu tvaru koule

Neodymový magnet tvaru koule NM-E 13N-M5/N38 (viz *Obrázek 36*) byl využit pro měření magnetické indukce (viz *kapitola 4.4.5*), jeho parametry nalezneme v tabulce 17.



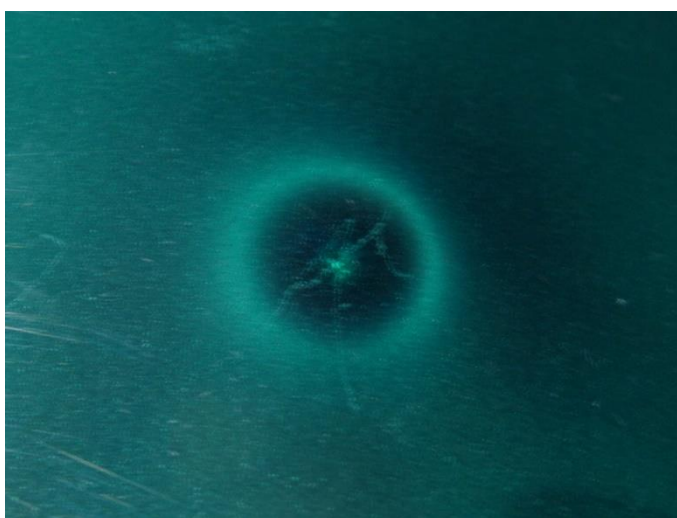
Obrázek 36: Neodymový magnet tvaru koule NM-E 13N-M5/N38.

Pro experimentální zobrazení byla také zvolena sada deseti neodymových magnetů ve tvaru koule s neznámou magnetizací oddělených od sebe plastovou podložkou a sestavených to tvaru kruhu (viz *Obrázek 37*).

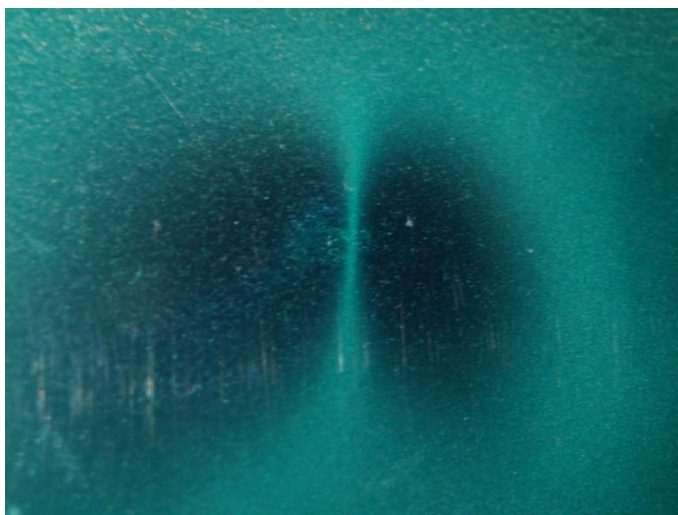


Obrázek 37: Kroužek z deseti neodymových magnetů tvaru koule.

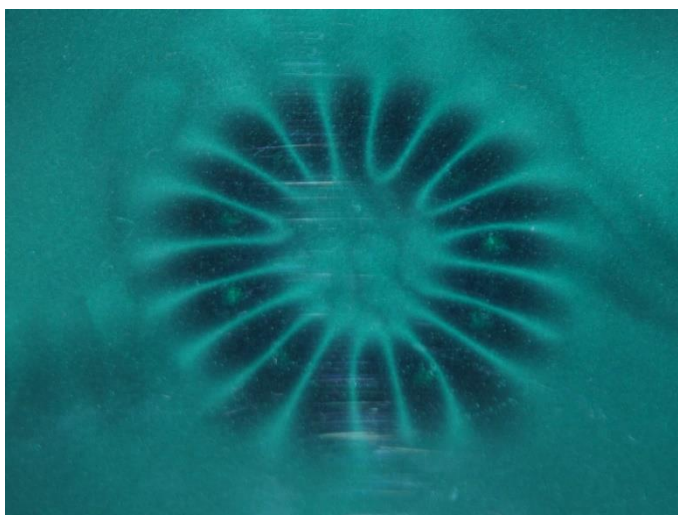
Zobrazení magnetického pole těchto dvou magnetů proběhlo pomocí flux detektorové fólie. Na obrázku 38 je zobrazeno magnetické pole magnetu položením detektorové fólie na povrch magnetu kolmo k ose magnetizace, je vidět prostup magnetických indukčních čar fólií (ztmavnutí) uvnitř magnetu a zesvětlení na jeho okrajích tělesa. Uložení fólie podél osy magnetizace je pak zobrazeno na obrázku 39 a pro kroužek utvořený z deseti kulových magnetů na obrázku 40. Magnetické indukční čáry se mezi jednotlivými magnety a uvnitř tělesa magnetu uzavírají podél osy magnetizace, na těchto místech dochází k zesvětlení fólie.



Obrázek 38: Flux detektorová fólie na kulovém magnetu kolmo k ose magnetizace.



Obrázek 39: Flux detektorová fólie na kulovém magnetu podél osy magnetizace.

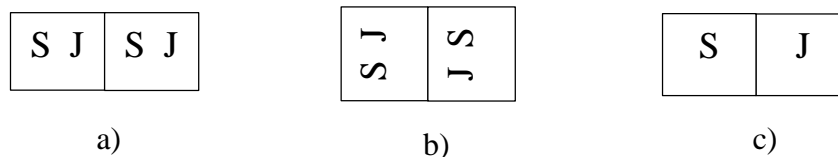


Obrázek 40: Flux detektorová fólie umístěná podél osy magnetizace na deseti kulových magnetech oddělených plastovou podložkou.

6.3 Zobrazení magnetického pole krychlových magnetů KS-10N/N42

Neodymový magnet KS-10N/N42 byl využit pro měření magnetické indukce (viz kapitola 4.4.3), jeho parametry nalezneme v tabulce 17.

Pro experimentální zobrazení pomocí kapaliny ferrofluid byly zvoleny 2 kusy řazené za sebe v konfiguraci polarizací SJ-SJ (viz Obrázek 41a) a dva kusy v opozici opačných pólů zobrazených ze dvou stran (viz Obrázek 42b a 42c).



Obrázek 41: Polarizace dvou krychlových magnetů pro zobrazení kapalinou ferrofluid.

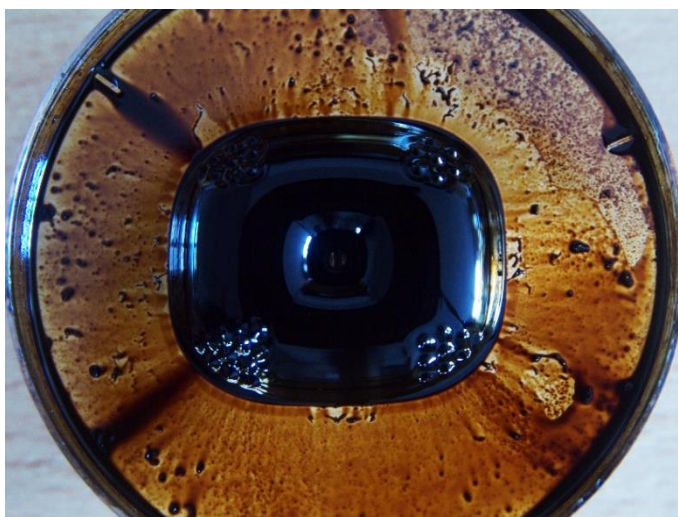


Obrázek 42: Dva kusy neodymových krychlových magnetů.

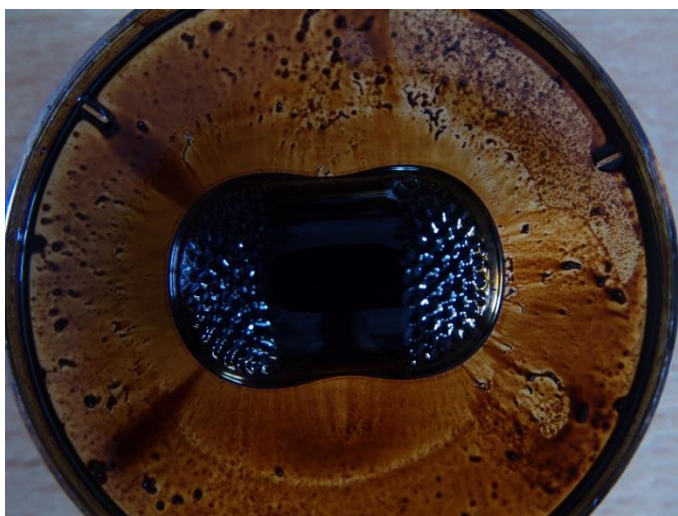
Zobrazení magnetického pole působením na kapalinu ferrofluid je pro jednotlivé uspořádání magnetů na obrázcích 43 až 45. Konfigurace dle obrázku 42a se po přiblížení ke kapalině ferrofluid v Petriho misce zobrazí jako dva téměř oddělené shluky kapaliny (viz *Obrázek 43*). Konfigurace s opozicí pólů dle obrázku 42b způsobí vznik odpovídajících čtyř „pólů“ na kapalině (viz *Obrázek 44*). Pootočením o 90 stupňů na stranu tvořenou dvěma póly (viz *Obrázek 42c*) se ferrofluid shlukne do útvaru vyobrazeného na obrázku 45.



Obrázek 43: Ferrofluid zobrazující magnetické pole krychlových magnetů v uspořádání SJ-SJ.



Obrázek 44: Ferrofluid zobrazující magnetické pole krychlových magnetů v uspořádání v opozici opačných pólů.

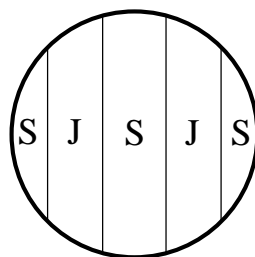


Obrázek 45: Ferrofluid zobrazující magnetické pole krychlových neodymových magnetů v uspořádání v opozici opačných pólů z boční pohledové strany.

6.4 Magnetické pole multipólově magnetovaného feritu FMI-A $\varnothing 22 \times 8$ mm

Magnet FMI-A $\varnothing 22 \times 8$ mm (viz *Obrázek 47*) je izotropní feritový magnet tvaru válce s průměrem $(22,0 \pm 0,1)$ mm a výškou $(8,0 \pm 0,1)$ mm s jednostrannou multipólovou magnetizací MF8T (viz *Obrázek 46*). Remanentní indukce magnetu je dle údajů dodavatele $B_r = (200\text{--}235)$ mT, koercitivita $H_{cB} = (125\text{--}160)$ kAm⁻¹ a maximální energetický součin $(BH)_{max} = (6,5\text{--}9,5)$ kJm⁻³.

Pro experiment zobrazení magnetického pole byla použita flux detektorová fólie (viz *Obrázek 48*), zobrazení železnými pilinami (viz *Obrázek 49*) i kapalina ferrofluid u které je horší viditelnost díky malé hodnotě magnetické indukce (viz *Obrázek 50*). Orientačním měřením pomocí teslametru bylo zjištěno, že na magnetované straně jsou tři póly severní a dva jižní, S-J-S-J-S.



Obrázek 46: Polarizace multipólově magnetovaného feritového magnetu FMI-A $\varnothing 22 \times 8$ mm



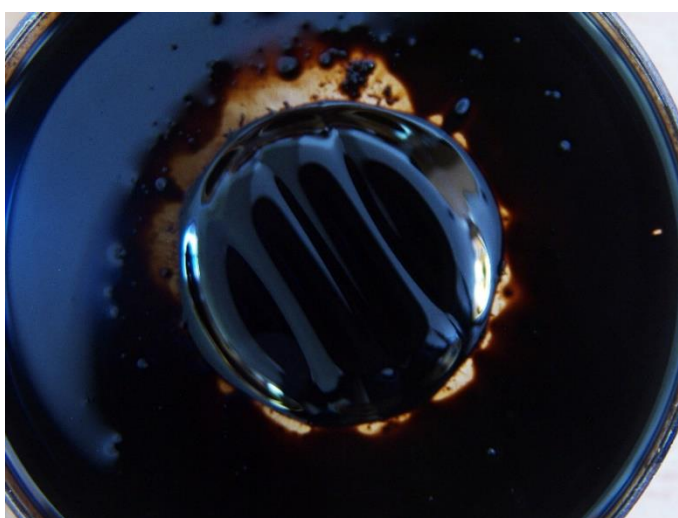
Obrázek 47: Feritový magnet FMI-A $\varnothing 22 \times 8$ mm



Obrázek 48: Zobrazení magnetického pole multipólově magnetovaného magnetu flux detektorem



Obrázek 49: Zobrazení magnetického pole multipólově magnetovaného magnetu železnými pilinami.

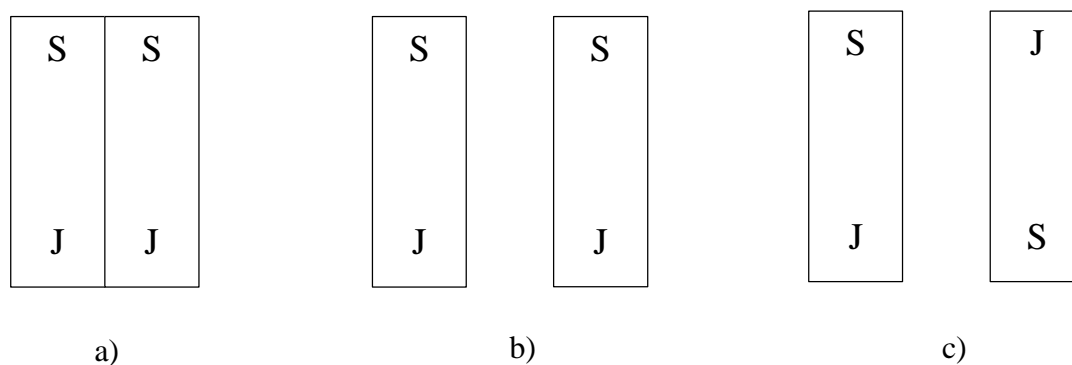


Obrázek 50: Zobrazení magnetického pole multipólově magnetovaného magnetu kapalinou ferrofluid.

6.5 Zobrazení magnetického pole tyčových magnetů T-10-40-N/N42

Permanentní magnet T-10-40-N/N42 (viz *Obrázek 52*) je sintrovaný poniklovaný magnet tvaru válce (tyče) s axiální magnetizací, vnějším průměrem $(10,0 \pm 0,1)$ mm a výškou $(40,0 \pm 0,1)$ mm s axiální magnetizací N42 (viz *Tabulka 11*).

Tyčové magnety bývají součástí běžné školní výbavy a na nich jsou zpravidla pomocí železných pilin demonstrovány účinky magnetických polí, a proto byly pro tento zobrazovací experiment zvoleny také. Pro zobrazení magnetických indukčních čar dvou tyčových magnetů byly vybrány 3 prostorové konfigurace (viz *Obrázek 51*), vždy byly k podložce upevněné lepicí páskou proti zamezení pohybu.

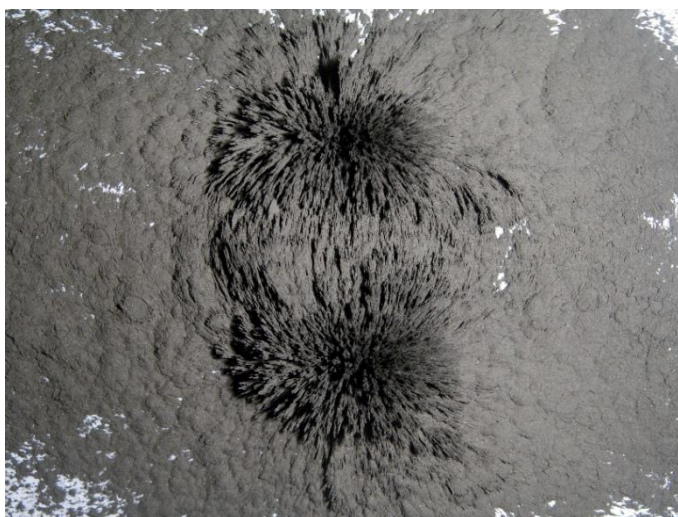


Obrázek 51: Uspořádání a polarizace tyčových neodymových magnetů.

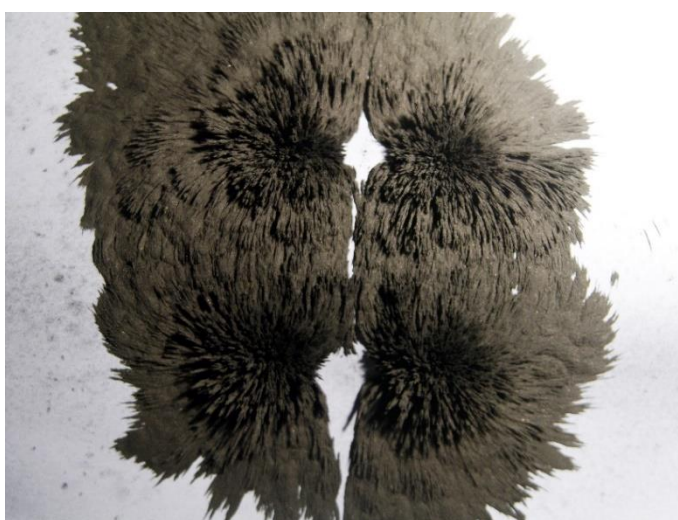
V konfiguraci SS-JJ podle obrázku 51a byly překonány odpudivé síly magnetu a upevněny přímo vedle sebe. Na obrázku 53 je vidět, že navenek toto uspořádání polarizací se projevuje téměř jako jeden kus tyčového magnetu. Ve druhé části experimentu byly magnety ponechány od sebe zhruba 3 cm (viz *Obrázek 51b*), aby se na železných pilinách mohly projevit odpudivé účinky souhlasných magnetických polarizací, které jsou patrné na obrázku 54, kdy se v ose mezi magnety neusadily žádné železné piliny. Při užití pilin na třetí konfiguraci dle obrázku 51c, kde vzdálenost mezi magnety byla asi 4 cm je zřetelně vidět, že se magnetické pole uzavírá vždy mezi severními a jižními póly obou těles (viz *Obrázek 55*).



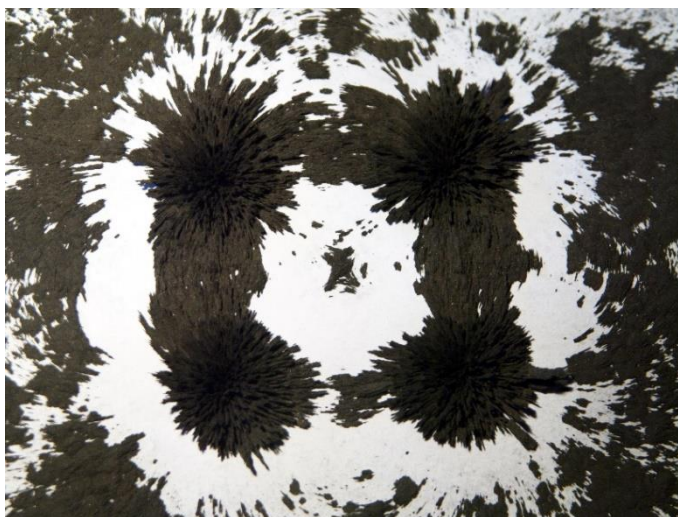
Obrázek 52: Dva neodymové tyčové magnety T-10-40-N/N42.



Obrázek 53: Zobrazení magnetického pole dvou tyčových magnetů souhlasnými póly u sebe.



Obrázek 54: Zobrazení magnetického pole dvou magnetů umístěných souhlasnými póly cca 3 cm od sebe.



Obrázek 55: Zobrazení magnetického pole dvou neodymových tyčových magnetů železnými pilinami umístěných opačnými póly cca 4 cm od sebe.

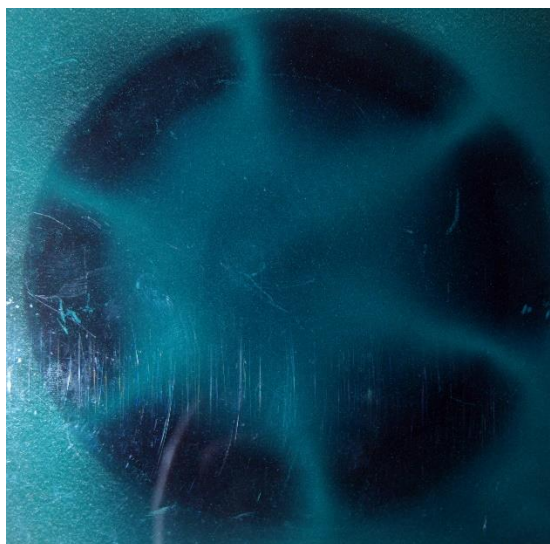
6.6 Zobrazení magnetického pole zapalovacího rotoru

Pro tento experiment byl použit rotor zapalování z výroby České zbrojovky (motocykl ČZ 125/150) (viz *Obrázek 56*). V rotoru je umístěno 6 segmentů magnetů upevněných v hliníkovém výlisku.

Zobrazení magnetického pole kolem rotoru zapalování pomocí flux detektorové fólie je na obrázku 57, ze kterého je vidět uzavírání magnetických indukčních čar mezi sousedními magnety a totéž uspořádání zviditelněné pomocí železných pilin na obrázku 58.



Obrázek 56: Rotor zapalování ČZ 125/150



Obrázek 57: Magnetické pole rotoru zapalování ČZ 125/150 zobrazené flux detektorovou fólií.



Obrázek 58: Magnetické pole rotoru zapalování ČZ 125/150 zobrazené železnými pilinami.

6.7 Zobrazení magnetického pole elektromotorku

Pro demonstraci dalších magnetických polí permanentních magnetů byl rozebrán malý elektromotor z mechaniky CD-ROM který slouží pro otáčení vloženým diskem. V elektromotorku je část rotoru (viz *Obrázek 59*), který má jeden magnet tvaru tenkého prstence s vnějším průměrem 22 mm a tloušťkou stěny 1 mm, jenž je radiálně multipólově namagnetovaný (obdobně jako na obrázku 24). Zobrazení proběhlo pomocí flux detektorové fólie (viz *Obrázek 61*). Stator motorku obsahuje jeden diametrálně magnetovaný neodymový magnet tvaru prstence s průměrem 10 mm a výškou 3 mm (viz *Obrázek 60*), zobrazení jeho magnetického pole je na obrázku 62.



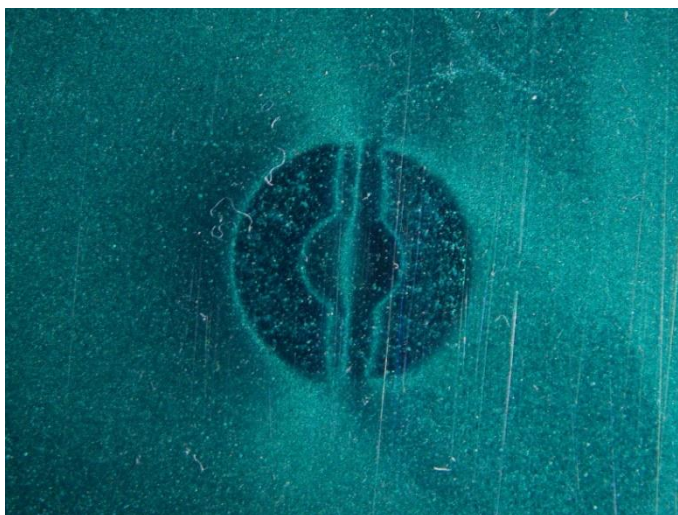
Obrázek 59: Část rotoru elektromotorku CD-ROM.



Obrázek 60: Neodymový prstencový magnet ze statoru elektromotorku CD-ROM.



Obrázek 61: Magnetické pole rotoru elektromotorku CD-ROM zobrazené flux detektorovou fólií.

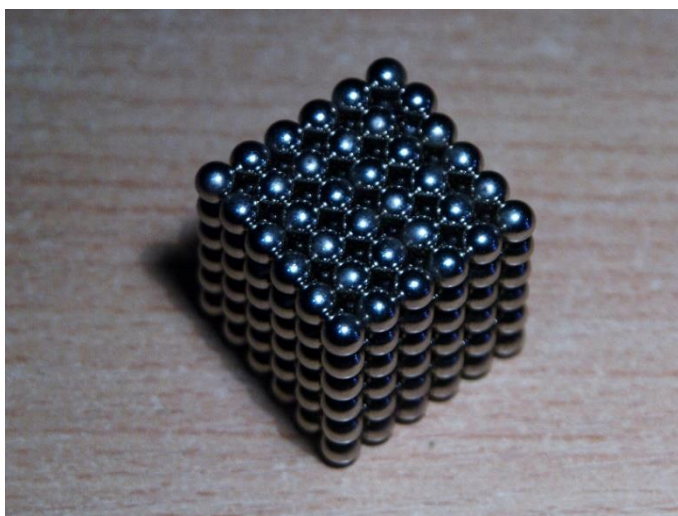


Obrázek 62: Magnetické pole prstencového magnetu statoru elektromotorku CD-ROM.

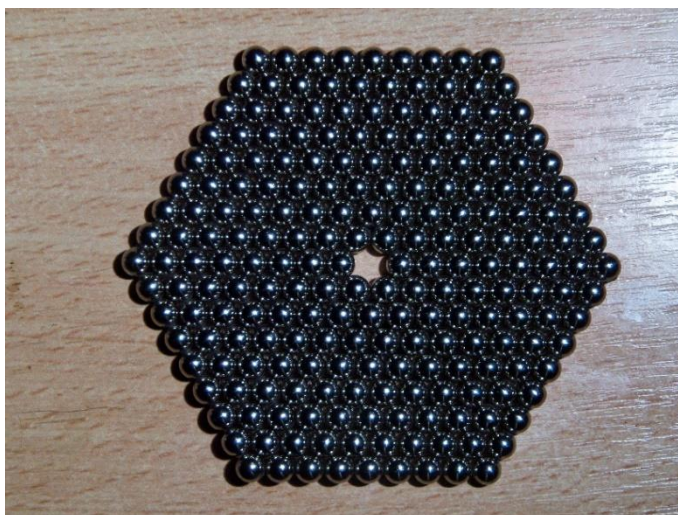
6.8 Zobrazení magnetického pole magnetické hračky NeoCube

Magnetická hračka NeoCube obsahuje celkem 216 neodymových kuliček s magnetizací N38 (viz *tabulka 11*) o průměru 5 mm a v základním tvaru tvoří krychli s hranou tvořenou 6 kuličkami. Magnety umožňují nepřeberné množství variací pro skládání do různých tvarů (např. šestiúhelník na obrázku 64) a je to vynikající doplněk pro poznávání magnetických polí permanentních magnetů.

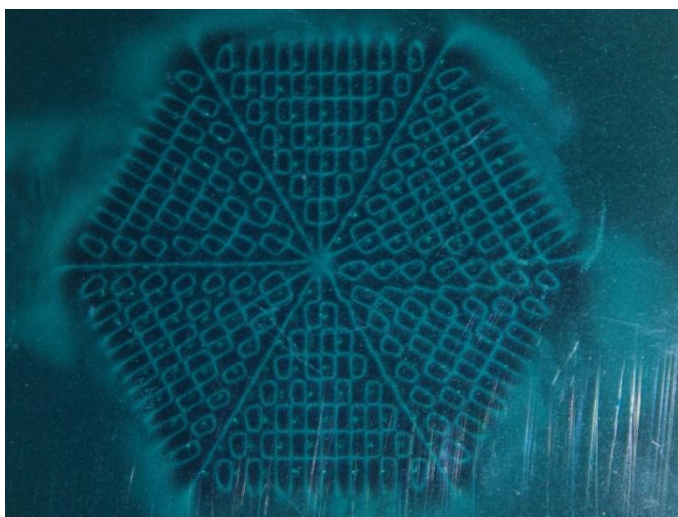
Magnetické pole hračky NeoCube v základním tvaru kostky (viz *Obrázek 63*) není ze všech stran stejné vzhledem k tvaru polarizace jednotlivých kuliček. Na obrázku 66 jsou pomocí flux detektorové fólie vyobrazeny tři různé stěny. Na obrázku 65 je efektní obrazec vytvořený magnetickým polem šestiúhelníku z kuliček NeoCube na flux detektorové fólii.



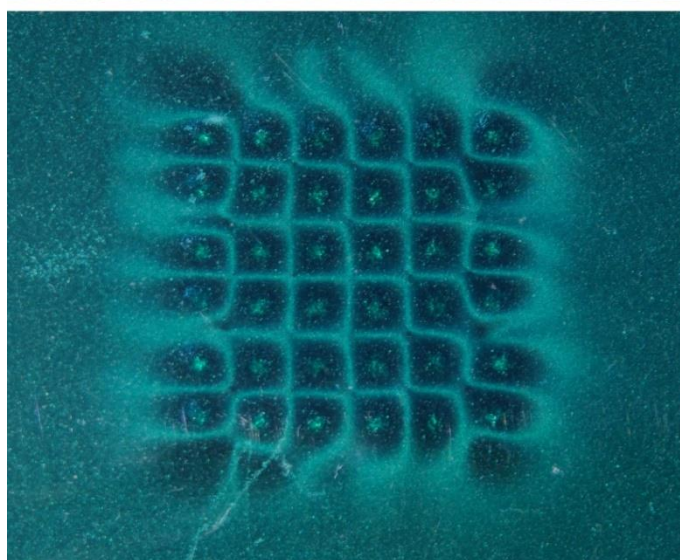
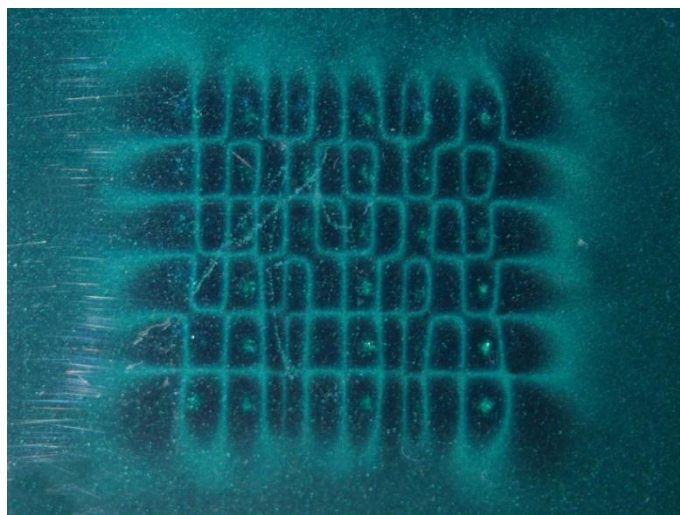
Obrázek 63: Magnetická hračka NeoCube.



Obrázek 64: NeoCube sestavená do tvaru šestiúhelníku.



Obrázek 65: Šestiúhelník z kuliček NeoCube zobrazený flux detektorovou fólií.



Obrázek 66: Stěny NeoCube zobrazené flux detektorovou fólií.

6.9 Demonstrace efektních obrazců

Magnety skýtají nesčetné možnosti uspořádání do různých seskupení a útvarů a tak žáci škol mohou rozvíjet svou fantazii a zobrazovat magnetická pole. Jedním z možných příkladů je „sněhová vločka“, jejíž obrazec byl vytvořen na flux detektorové fólii (viz *Obrázek 68*) nad pěti diametrálně magnetovanými neodymovými magnety tvaru válečků s průměrem 5 mm a pěti kuliček z NeoCube (viz *Obrázek 67*).



Obrázek 67: Uspořádání magnetek pro "sněhovou vločku".

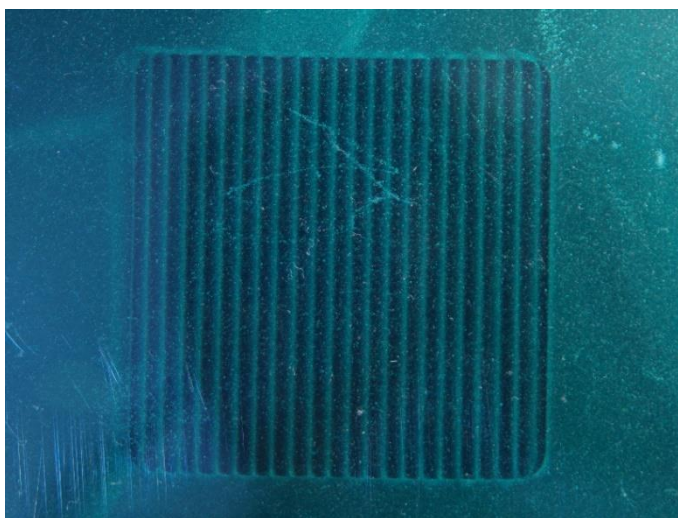


Obrázek 68: "Sněhová vločka" zobrazená flux detektorovou fólií.

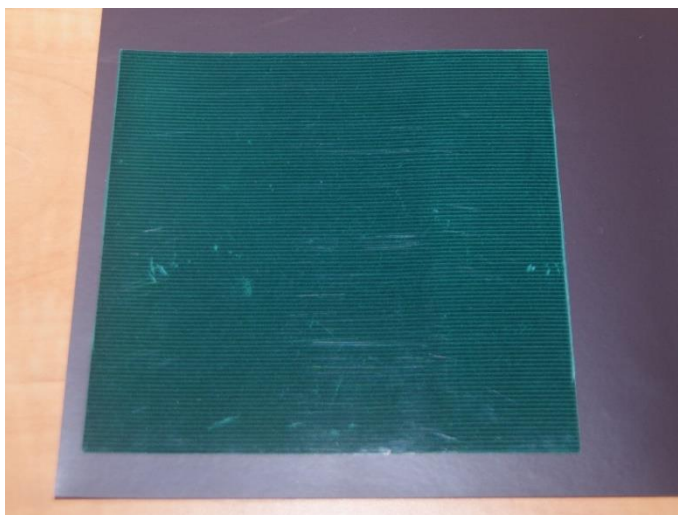
6.10 Zobrazení magnetického pole plastických magnetů

Plastické magnety byly popsány v kapitole 2.5. Jejich využití je různorodé, velice často se s nimi setkávají děti jako s „magnetkami na lednici“ (viz *Obrázek 69*). Existují různé druhy magnetických pásek (viz *Obrázek 71*) a fólií, z jedné strany multipólově magnetované (viz *Obrázek 70*) a z druhé strany popisovatelé, případně i magnetický papír, na který lze z nemagnetické strany tisknout. Všechny tyto běžné plastické magnety jsou vyrobené jako izotropní s velice nízkou koercitivitou $H_{cB} < 150 \text{ kAm}^{-1}$, jsou tedy náchylné k přemagnetování silnějšími magnety ze vzácných zemin. Byl proveden malý experiment a k části magnetické pásky byl přiložen neodymový magnet a v tomto místě byla páska přemagnetována. (viz *Obrázek 72*).

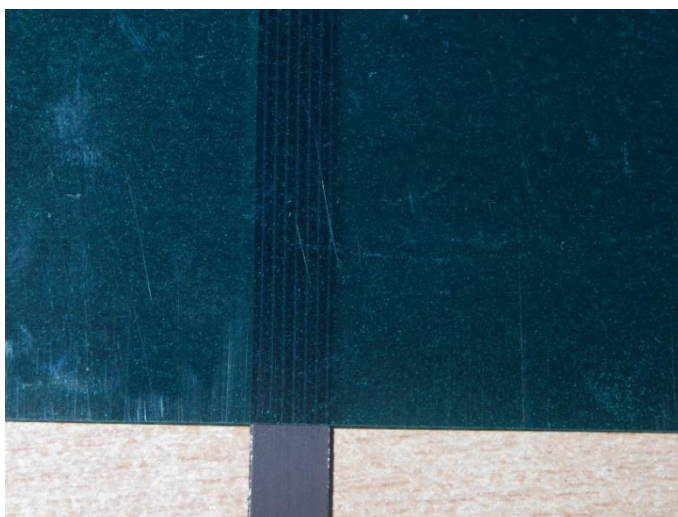
Na lednici lze nalézt kromě dětských magnetek další plastický magnet a to po obvodu dveří lednice, který slouží pro správné dovření. S plastickým magnetem z dvířek lednice a malým feritovým magnetem tvaru disku o průměru 20 mm a výškou 5 mm byl proveden experiment, kdy se feritová magnetka usadí ve stabilní poloze mezi póly plastického magnetu. Experiment je přiložený na DVD.



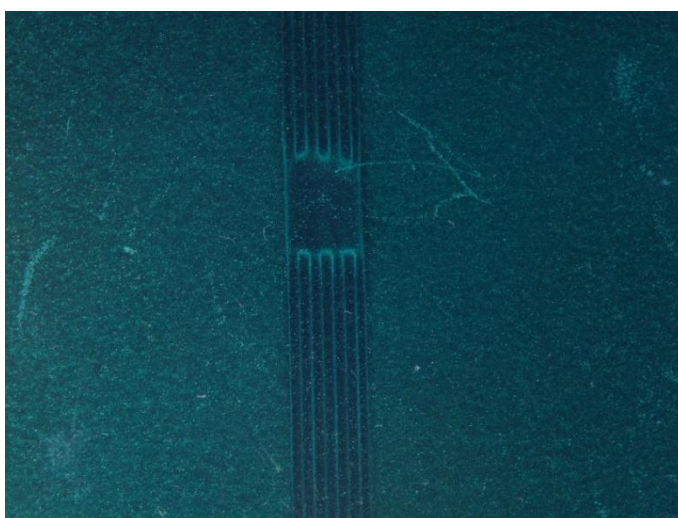
Obrázek 69: Jednostranná multipólová magnetizace dětské magnetky na lednici zobrazená flux detektorovou fólií.



Obrázek 70: Jednostranná multipólová magnetizace magnetické fólie zobrazená flux detektorovou fólií.



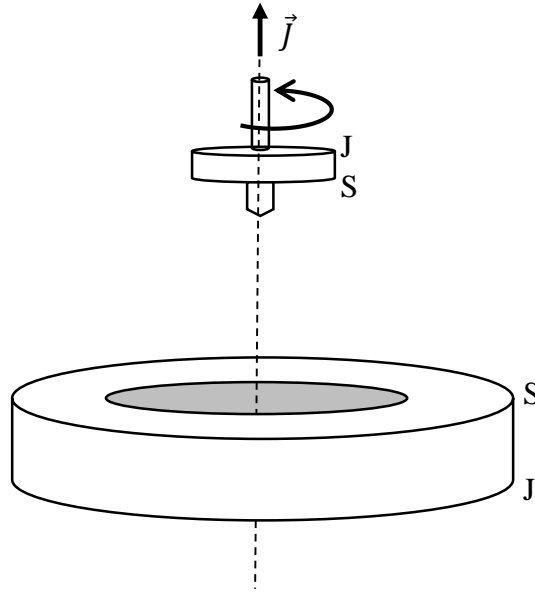
Obrázek 71: Jednostranná multipólová magnetizace magnetické pásky zobrazená flux detektorovou fólií.



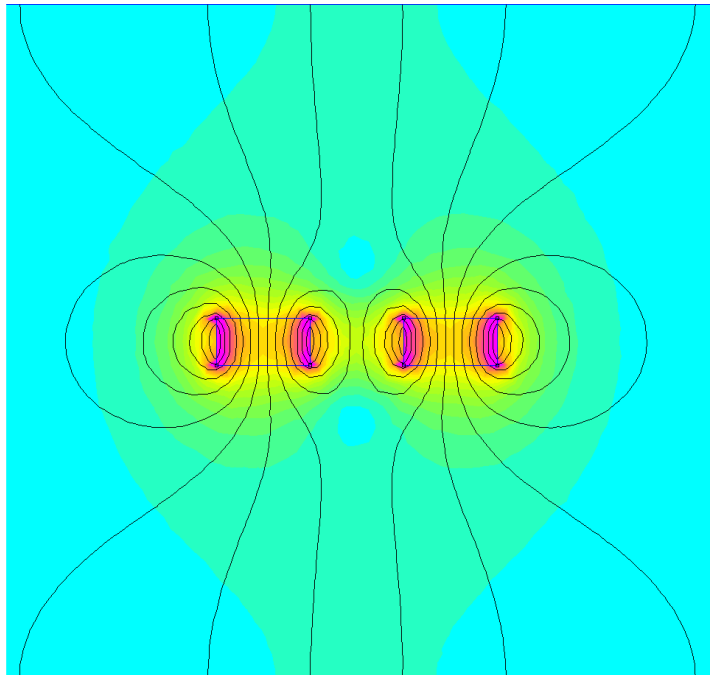
Obrázek 72: Přemagnetovaná oblast plastické magnetické pásky po přiložení silného neodymového magnetu.

7 Rotací stabilizovaná magnetická levitace (Levitron)

Levitron se skládá ze dvou základních těles. Ze základny tvořené axiálně magnetovaným prstencovým magnetem a rotující káčky, rovněž tvaru axiálně magnetovaného prstence s nemagnetickou osou (viz *Obrázek 73*). Magnetické indukční čáry prstencového magnetu se uzavírají nejen vnějším prostorem kolem magnetu, ale také skrze jeho vnitřní průměr (viz *Obrázek 74*).



Obrázek 73: Schematické znázornění rotací stabilizovaného Levitronu.



Obrázek 74: Tvar magnetických indukčních čar prstencového magnetu. Modelováno v programu FEMM.

Magnetická indukce v axiální ose magnetizace prstencového magnetu byla proměřena v kapitole 4.4.4. Z modelového vyobrazení magnetického pole prstencového magnetu na obrázku 74 a z výše uvedeného měření vyplývá, že v okolí osy rotační symetrie magnetu tvaru prstence v úrovni jeho povrchu nabývá magnetická indukce díky uzavření magnetického pole vnitřním průměrem opačné polarity, než odpovídá polarizaci na dané straně axiální magnetizace. Magnetické pole s rostoucí vzdáleností slábne a v určité vzdálenosti nabývá magnetická indukce nulové hodnoty, v tomto místě se vyrovnává vliv uzavření magnetického pole vnějším prostorem a skrze vnitřní průměr magnetu. Při dalším zvětšování vzdálenosti na ose rotační symetrie magnetické pole má již polarizaci shodnou s polarizací odpovídající axiální magnetizaci. Hodnoty indukce narůstají poté v určité vzdálenosti do maxima a poté limitně klesají.

Toto chování magnetického pole na ose prstencového magnetu způsobuje, že magnetická káča otočená shodnou polarizací k základně je v malých výškách přitahována, ve velkých odpuzována a v určité výšce jsou silové účinky magnetického pole vyrovnány.

Na káču má však vliv i tíhová síla Země, která je vykompenzována určitým zvětšením vzdálenosti od základního magnetu do místa, kde je dostatečně odpuzována. Tyto podmínky ovšem nestačí. Poloha tělesa je velice nestabilní, protože magnetické pole základního tělesa vyvolává určitý moment k přetočení osy tělesa káčky, která se nakloní na stranu a okamžitě je některou ze sil stržena. Pro vykompenzování tohoto momentu vyvolaného magnetickým polem základního tělesa, který působí ve směru od rotační osy symetrie, je potřeba, aby těleso káčky rotovalo, což vyvolá moment setrvačnosti J působící směrem do osy rotační symetrie základního tělesa (shodnou s axiální osou magnetizace). Složení vektorů těchto momentů vyvolává precesní pohyb při rotaci káčky, avšak při dostatečně rychlé rotaci zůstává v relativně stabilní poloze nad základním tělesem.

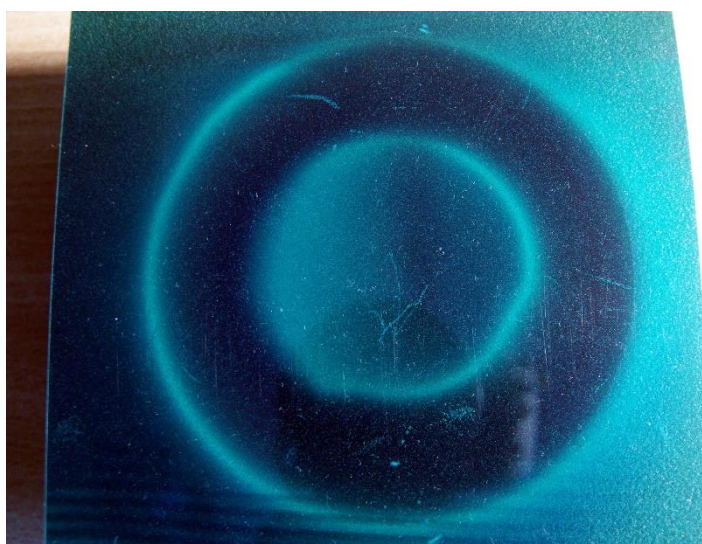
Úhlová frekvence rotace vlivem tření vzduchu a vyvolávání turbulentních proudění kolem tělesa káčky postupně klesá a při poklesu pod kritickou mez těleso spadne.

Analytické řešení tohoto problému je dosti rozsáhlé a pro jeho řešení lze nahlédnout do vědeckých článků. [30]

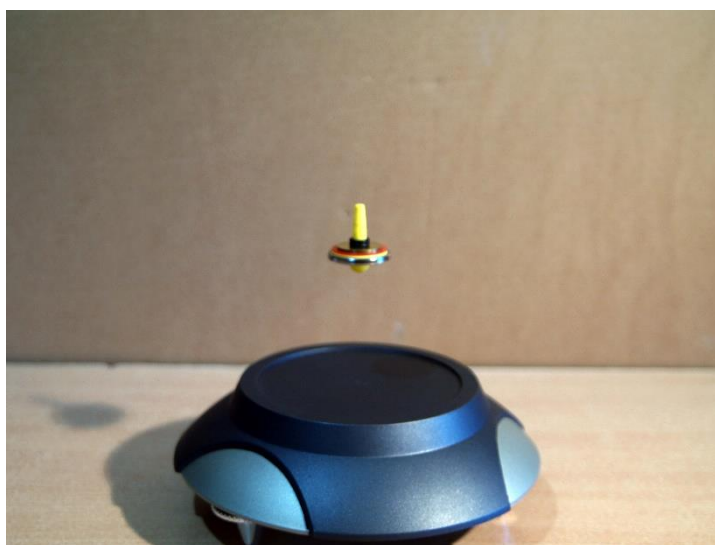
Pro experiment byl pořízen komerční Levitron (viz *Obrázek 75*). Magnetické pole tělesa podstavy Levitronu je zobrazeno pomocí flux detektoru na obrázku 76. Demonstrace tohoto pokusu je zachycena na obrázku 77 a bylo pořízeno video na příloženém DVD. Doba, po kterou rotující káča levituje, dosahuje maximálně několik minut.



Obrázek 75: Komerční Levitron s káčou.



Obrázek 76: Magnetické pole základního tělesa Levitronu zachycené flux detektorovou fólií.

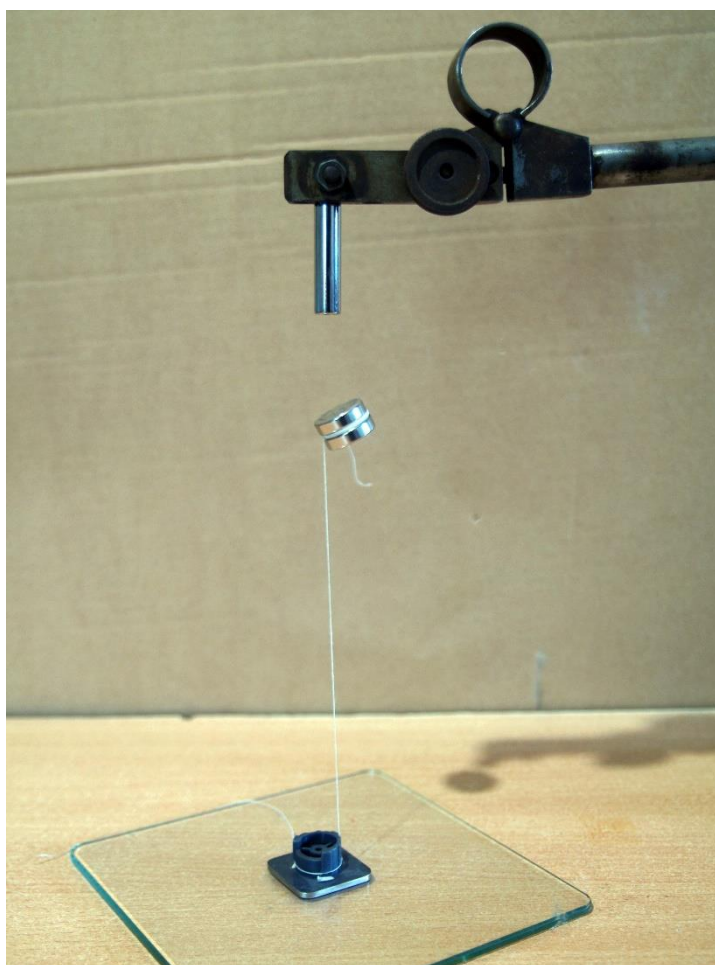


Obrázek 77: Levitron a rotující káča nad základním tělesem.

8 Demonstrace účinků magnetických polí PM

8.1 Magnety překonávající tíhovou sílu

Tyčový magnet umístěný ve stojánku v určité výšce nad podložkou přitahuje druhý magnet připevněný pomocí vlasce či nitě k podložce. Magnety musí být ve správné vzdálenosti tak, aby byla jejich vzájemná přitažlivá síla větší, než tíhová síla působící na spodní magnet, který se natočí opačnou polarizací k hornímu upevněnému magnetu. Tento experiment je znázorněn na obrázku 78 a krátká videoukázka na přiloženém DVD.

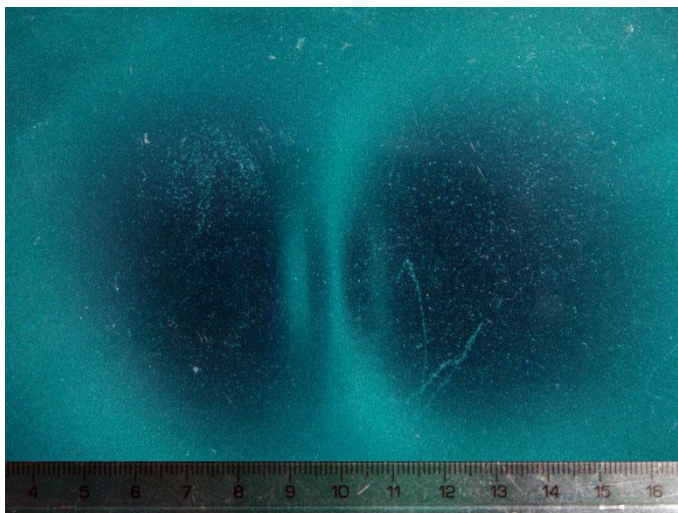


Obrázek 78: Vzájemné silové účinky magnetických polí permanentního magnetu a překonání tíhové síly.

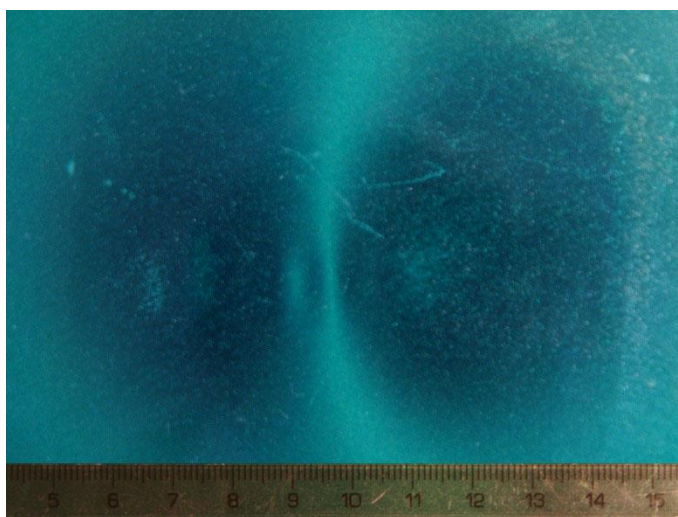
8.2 Prostup magnetického pole látkou

Látky podle chování v magnetickém poli rozdělujeme na diamagnetické a paramagnetické jak bylo popsáno v kapitole 1.8 Skupinou látek s významnými magnetickými vlastnostmi, zejména pak relativní permeabilitou či susceptibilitou jsou feromagnetika (viz kapitola 1.9). Permeabilita prostředí pak určuje, jakým způsobem je vnější magnetické pole prostupné skrze daný materiál.

Z následujícího experimentu je zřejmé, že magnetické pole prostupuje materiálem a závisí na magnetických vlastnostech materiálu (susceptibilitě χ). Na obrázku 79 je vidět prostup magnetického pole zobrazený flux detektorovou fólií hliníkovou krabičkou ($\chi \approx 2 \cdot 10^{-5}$) s tloušťkou stěny 0,5 mm a krabičkou z pozinkovaného ocelového plechu ($\chi \approx 8000$) o stejné tloušťce (viz *Obrázek 80*). Z porovnání zobrazených magnetických polí je vidět, že feromagnetický materiál (ocel) magnetické pole zesílí a viditelně zvětší jeho dosah (větší ztmavená plocha fólie), na rozdíl od paramagnetického hliníku.



Obrázek 79: Prostup magnetického pole 4 magnetů tvaru válce skrze ocelový plech.



Obrázek 80: Prostup magnetického pole 4 magnetů tvaru válce skrze hliníkový plech.

Závěr

Pro uvedení do problematiky permanentních magnetů bylo nejprve potřeba se seznámit s teorií vzniku magnetického pole, pochopit princip, jakým způsobem mikrostrukturní chování elektronů a atomů ovlivňuje magnetický projev celého tělesa a seznámit se s některými magneticky uspořádanými látkami, z nichž se permanentní magnety vyrábí. Vybráno bylo pět základních skupin materiálů a to ferity, slitiny AlNiCo, sloučeniny na bázi vzácných zemin samarium-kobalt a neodym-železo-bor a kompozitní plastické magnety. Dále byly popsány magnetizace jednotlivých tvarů magnetů a vzorce pro výpočet závislosti magnetické indukce v ose magnetizace, popsány byly také silové účinky, které úzce souvisí s velikostí magnetické indukce.

V praktické části byla proměřena magnetická indukce v ose magnetizace celkem jedenácti vzorků permanentních magnetů, mezi nimiž byly neodymové magnety tvaru koule, krychle a axiálně magnetované disky a prstence. Tímto měřením byly stanoveny závislosti magnetické indukce v závislosti na vzdálenosti od povrchu v ose magnetizace magnetů a ověřeny vzorce pro jejich výpočet, na jejichž základě lze odvodit i hodnoty efektivní remanentní indukce a porovnat je s hodnotami uváděnými dodavatelem, resp. výrobcem. Z měřených dat vyplývá, že efektivní remanentní indukce neodymových magnetů je sice menší, než hodnota udaná výrobcem, ale je řádově srovnatelná. Rozdíl může být dán nehomogenitou materiálu (poniklování o neznámé tloušťce), zabroušenými hranami magnetu, tedy zmenšením jeho objemu a tím částečnou změnou tvaru.

Dále pak byly srovnány vlastnosti magnetů tvaru disku o shodných rozměrech, byly jimi barnaté ferity, samarium-kobaltové a neodymové magnety. Z měření vyplývá, že efektivní remanentní indukce barnatých feritů i neodymových magnetů řádově odpovídá hodnotám udávaným dodavatelem, ovšem samarium-kobaltové magnety jeví zřetelné rozdíly. Lze jen spekulovat o důvodech, chybu měření lze vyloučit, neboť měření proběhlo za stejných podmínek jako měření feritových a neodymových magnetů a indukce u povrchu je jen o málo větší, než u feritových magnetů. Samarium-kobaltové magnety mají ovšem výhodu vysokých pracovních teplot (až 300 °C), ale podstatně vyšší cenu (asi deseti až dvacetinásobek ceny neodymového magnetu). Pokud je chyba v nesprávném skladování samarium-kobaltových magnetů, či v samotné výrobě, může to být spolu s nepříznivou cenou těchto magnetů důvod pro výběr jiného materiálu, např. AlNiCo.

Dále byla změřena magnetická polarizace neodymového magnetu tvaru disku kompenzací tíhovou silou na přípravku, kde zatěžováním nemagnetickými závažími byla zmenšována vzdálenost mezi magnety a zvětšovány tak jejich odpudivé účinky. Pomocí lineární regrese závislosti tíhové síly působící na závaží na geometrickém faktoru tvaru tělesa bylo ověřeno, že hodnota magnetizace odpovídá hodnotám běžných magnetizací (N42) neodymových magnetů.

Dalším bodem této bakalářské práce bylo zobrazování magnetického pole pomocí indukčních čar a magnetické fólie, k čemuž bylo pro doplnění zařazeno i zobrazování pomocí kapaliny ferrofluid. Obrázky slouží jako demonstrace účinků na železné piliny v okolí magnetů, niklové částice ve flux-detektorové fólii či na nanočástice magnetitu v oleji, jež se vždy natačejí ve směru magnetických indukčních čar a vytvářejí zajímavé obrazce v závislosti na tvarech magnetů, typu jejich magnetizace či různých uspořádání více kusů. Na závěr byly provedeny pokusy s magnetickými hračkami NeoCube a zejména Levitron.

Pro doplnění demonstrací účinků magnetických polí byly natočeny čtyři krátké videoukázky pokusů s kapalinou ferrofluid, levitující káčou Levitron, interakce mezi plastickým magnetem a feritovou magnetkou a překonání účinků tíhové síly přitažlivou silou magnetů.

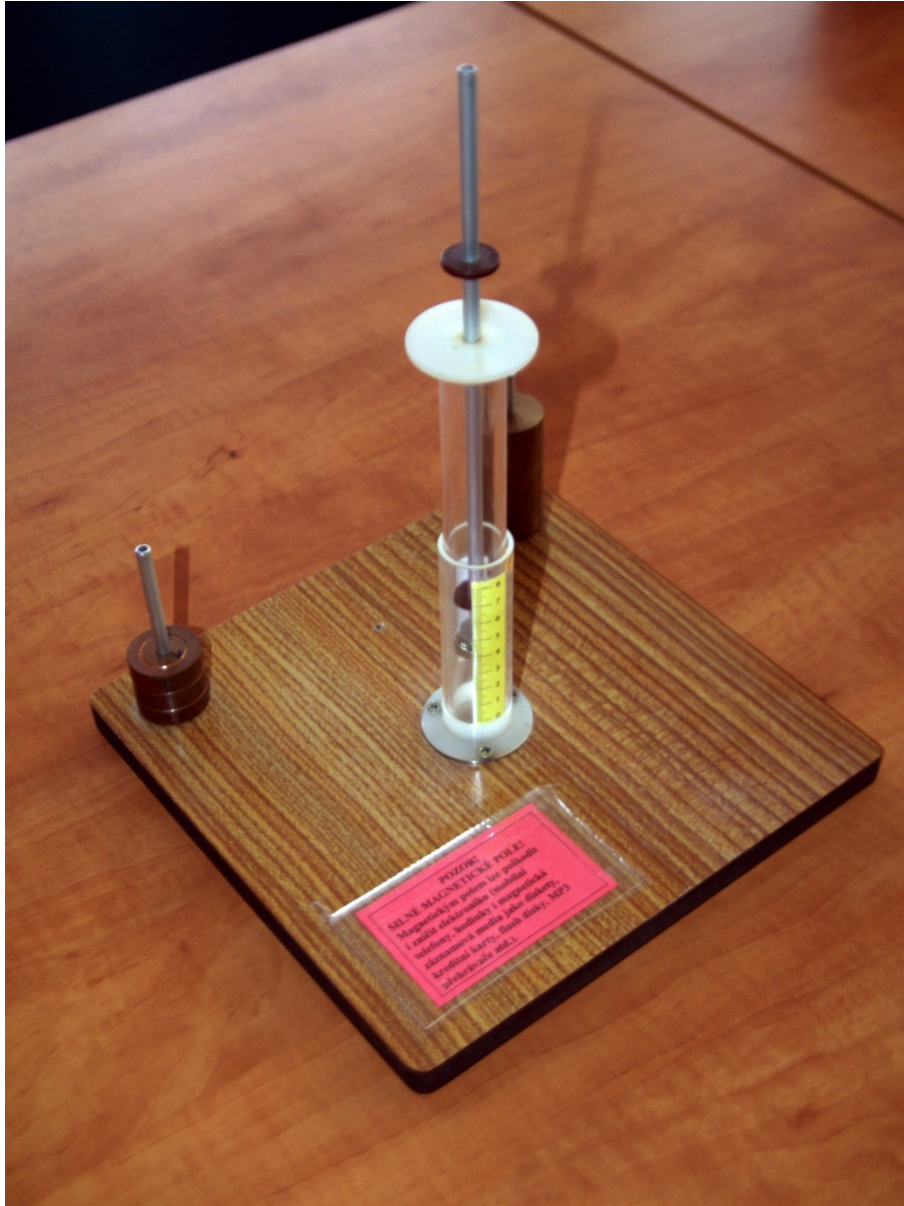
- [1] KRUPIČKA, S. Magnetismus: Historie a Současnost, vyd. Fyzikální ústav AV ČR 2007 [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: https://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka_0207.pdf
- [2] FEROMAGNET, s. r. o., Permanentní magnety - Co je třeba vědět o magnetech: firemní text Feromagnet, s.r.o., Světlá Hora <http://www.feromagnet.cz/o-magnetech>
- [3] ZAJÍC, J. Fyzika II (elektřina a magnetismus), 2. opravené vyd., Pardubice: Univerzita Pardubice 2004. ISBN 80-7194-641-9
- [4] LEPIL, Oldřich a Přemysl ŠEDIVÝ. Fyzika pro gymnázia: elektřina a magnetismus. 5., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2000. ISBN 80-7196-202-3.
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [6] JILES, D. Introduction to magnetism and magnetic materials, 3rd.edition, Iowa state university, CRC Press Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 978-1-4822-3887-7
- [7] HOFMANN, Jaroslav a Marie URBANOVÁ. Fyzika I. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2011. ISBN 978-80-7080-777-4
- [8] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Elektřina a magnetismus. Vyd. 3., V nakl. Karolinum 2. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2198-2
- [9] CAMPBELL, Peter. Permanent magnet materials and their application. New York: Cambridge University Press, 1994. ISBN 0-521-24996-1.
- [10] KITTEL, Charles. Úvod do fyziky pevných látek. Vyd. 5., Praha: Academia, 1985.
- [11] MALÝ, M. Magnetické vlastnosti látky, výukový text KFY, UJEP, Ústí nad Labem [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~mmaly/vyuka/ruzne/ISING/Ising.pdf>
- [12] Magnetismus: Základní pojmy. ELIDIS s.r.o. [online]. 2012 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.elidis.cz/33-trvale-magnety.html>
- [13] VYBÍRAL, Bohumil. Magnetické pole v látce. [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/magvll.pdf>
- [14] Rare Earth Magnet Basics. Shin-Etsu Rare Earth Magnets [online]. 2007 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.shinetsu-rare-earth-magnet.jp/e/index.html>
- [15] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Magnetické vlastnosti látek. Encyklopedie fyziky [online]. 2006 - 2013 [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>
- [16] ED.: K.H.J. BUSCHOW. Concise encyclopedia of magnetic & superconducting materials. 2nd ed. Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 2005. ISBN 0-08-044586-1.
- [17] Pojmy v magnetismu: Technologie výroby. ABC Magnet [online]. 2012 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.abcmagnet.cz>

- [18] Feritové magnety: Tabulka vlastností magnetů. Neomag [online]. 2017 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.neomag.cz/cz/katalog/feritove-magnety/>
- [19] Standard specifications for permanent magnet materials. In: MMPA STANDARD No. 0100-00 [online]. Chicago: Magnetic materials producers association [cit. 2017-19-03]. Dostupné z: <http://www.duramag.com>
- [20] Permanent Magnet Products. Stanford Magnets [online]. 1980-2012 [cit. 2017-19-03]. Dostupné z: <http://www.stanfordmagnets.com/magnet.html>
- [21] Magnetization methods. AIC Magnetic, Ltd. [online]. 2013 [cit. 2017-26-03]. Dostupné z: <http://www.aicmag.com/engineering/magnetization-methods/>
- [22] Magnetization direction for neodymium magnets. K&J Magnetics, Inc. [online]. 2013 [cit. 2017-26-03]. Dostupné z: <https://www.kjmagnetics.com/magdir.asp>
- [23] Způsoby realizace rotoru s permanentními magnety. ABC Magnet [online]. 2017 [cit. 2017-26-03]. Dostupné z: <http://www.magneticportal.cz/motory-s-permanentnimi-magnety/prstence-fendb-s-radialni-orientaci>
- [24] CAMACHO J. M., SOSA V. Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. Universidad Autonoma de Yucatán [online]. 2012 [cit. 2017-28-03]. Dostupné z: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmfe/v59n1/v59n1a2.pdf>
- [25] Operating instructions. PHYWE Systeme GmbH und Co. KG [online]. 2012 [cit. 2017-01-04]. <http://repository.phywe.de/files/bedanl.pdf/13610.93/e/1361093e.pdf>
- [26] Bonded magnets. Magnetic materials & components [online]. 2014 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: http://www.mmcmagnetics.com/ourproducts/main_Bonded.htm
- [27] JÁCHIM, František a Jiří TESAŘ. Fyzika pro 8. ročník základní školy. Ilustroval Karel BENETKA. Praha: SPN, 2000. ISBN 80-7235-125-7.
- [28] Jak zviditelnit magnetické pole fólií FLUX. FYZMATIK.pise.cz [online]. 2016 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/1776-jak-zviditelnit-magneticke-pole-folii-flux.html>
- [29] BOUŘ, P. a kolektiv. Ferrofluid, magnetická kapalina. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská [online]. 2011 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2011-2012/Zima11/proc/ferrofluid.pdf>
- [30] SIMON, M. D., HEFLINGER, L. O., RIDGWAY, S. L. Spin stabilized magnetic levitation. Department of Physics, University of California at Los Angeles, [online]. 1996 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.physics.ucla.edu/marty/Levitron/spinstab.pdf>

Seznam příloh

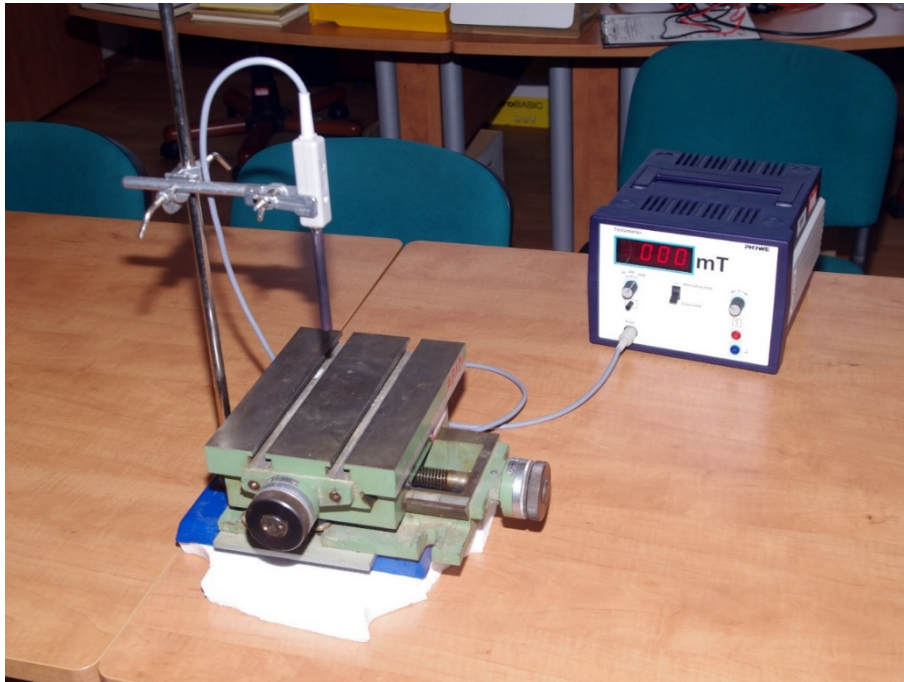
1	MĚŘICÍ PŘÍPRAVEK PRO MĚŘENÍ MAGNETICKÉ POLARIZACE KOMPENZAČÍ TÍHOVOU SILOU	II
2	MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE TESLAMETREM	III
3	NAMĚŘENÉ HODNOTY VÁLCOVÉHO FERITOVÉHO MAGNETU KT-12-10/F30	IV
4	NAMĚŘENÉ HODNOTY SAMARIUM-KOBALTOVÉHO VÁLCOVÉHO MAGNETU KT-18-06-S/YXG30	VI
5	NAMĚŘENÉ HODNOTY NEODYMOVÉHO KRYCHLOVÉHO MAGNETU KS-10-N/N42	VIII
6	NAMĚŘENÉ HODNOTY DVOU KUSŮ NEODYMOVÝCH PRSTENCOVÝCH MAGNETŮ KR-26-16-05-N/N42... X	
7	NAMĚŘENÉ HODNOTY NEODYMOVÉHO MAGNETU TVARU KOULE NM-E-13N/N38	XIII
8	NAMĚŘENÉ HODNOTY FERITOVÉHO MAGNETU TVARU VÁLCE FMA-A \varnothing 10 \times 10/F35	XV
9	NAMĚŘENÉ HODNOTY NEODYMOVÉHO MAGNETU TVARU VÁLCE KT-10-10-N/N42	XVII
10	NAMĚŘENÉ HODNOTY SAMARIUM-KOBALTOVÉHO MAGNETU TVARU VÁLCE SM-A \varnothing 10 \times 10 MM/YXG28.	XIX
11	NAMĚŘENÉ HODNOTY FERITOVÉHO MAGNETU TVARU VÁLCE FMA-A \varnothing 20 \times 5 MM /F35.....	XXI
12	NAMĚŘENÉ HODNOTY 5 KUSŮ FERITOVÝCH MAGNETŮ TVARU VÁLCE FMA-A \varnothing 20 \times 5 MM /F35.	XXII
13	NAMĚŘENÉ HODNOTY NEODYMOVÉHO MAGNETU TVARU VÁLCE NM-A \varnothing 20 \times 5 MM /N42.	XXIV
14	NAMĚŘENÉ HODNOTY 5 KUSŮ NEODYMOVÝCH MAGNETŮ TVARU VÁLCE NM-A \varnothing 20 \times 5 MM /N42 .XXV	
15	NAMĚŘENÉ HODNOTY SAMARIUM KOBALTOVÉHO MAGNETU TVARU VÁLCE SM-A \varnothing 20 \times 5 MM /YXG28.....	XXVIII

1 Měřicí přípravek pro měření magnetické polarizace kompenzací tíhovou silou



Obrázek 1: Měřicí přípravek pro měření magnetické polarizace kompenzací tíhovou silou.

2 Měření magnetické indukce teslametrem



Obrázek 2: Měření magnetické indukce teslametrem PHYWE.

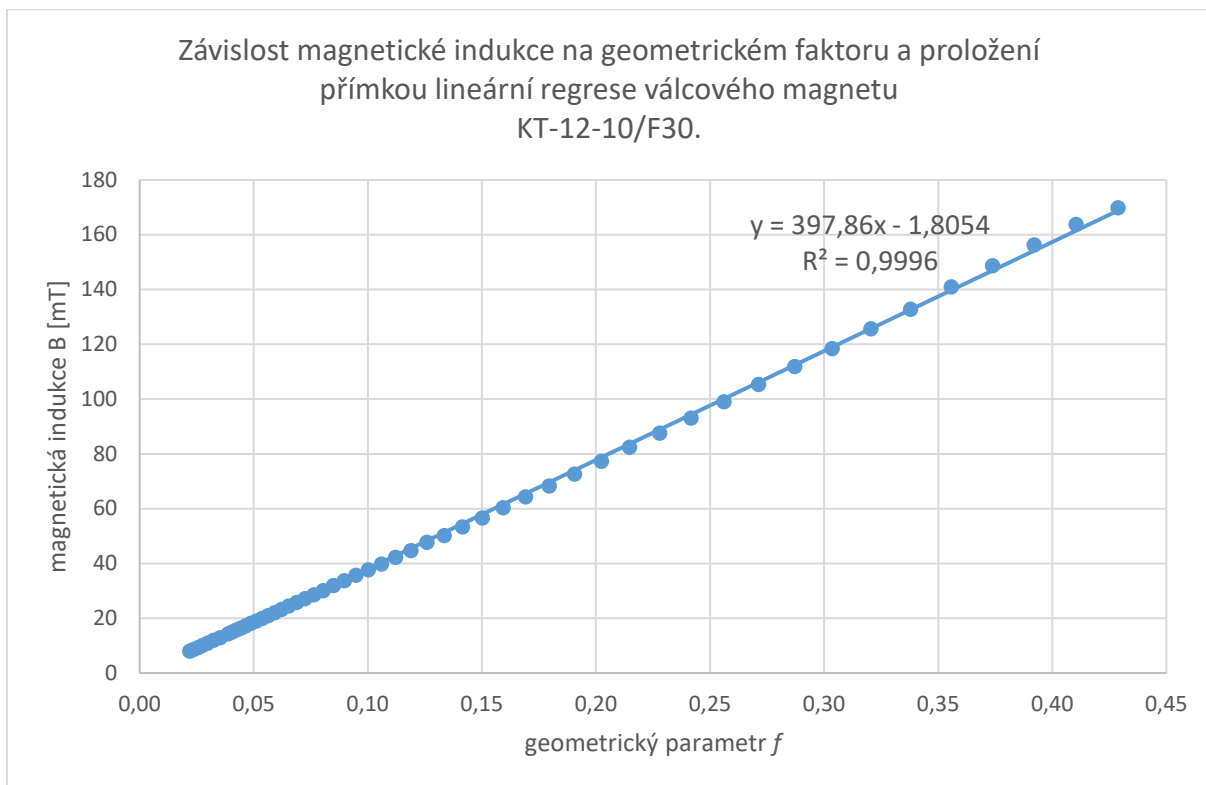


Obrázek 3: Měření magnetické indukce teslametrem Akaigu WT10A

3 Naměřené hodnoty válcového feritového magnetu KT-12-10/F30

Válec KT-12-10/F30				Teoretický výpočet		Lin. Regrese	
				Délka D [mm]	10		
				Poloměr R [mm]	6		
				Br [mT]	400		
z [in]	z [mm]	B [mT]	σ_B [mT]	B [mT]	Geom. Faktor		
0,00	0,00	169,80	4,40	171,4986	0,4287	397,8589532	-1,805360214
0,01	0,25	163,70	4,27	164,1610	0,4104	1,125452923	0,209144773
0,02	0,51	156,30	4,13	156,8082	0,3920	0,999592066	0,952993952
0,03	0,76	148,70	3,97	149,4882	0,3737	Stanovení chyby měření	
0,04	1,02	140,90	3,82	142,2463	0,3556		
0,05	1,27	132,80	3,66	135,1242	0,3378	pravděpodobnost	0,95
0,06	1,52	125,60	3,51	128,1594	0,3204	Student. souč.	2,008559112
0,07	1,78	118,40	3,37	121,3844	0,3035	s_k	2,260538724
0,08	2,03	111,80	3,24	114,8264	0,2871	s_q	0,42007964
0,09	2,29	105,30	3,11	108,5075	0,2713	r_{xy}	0,999796012
0,10	2,54	99,00	2,98	102,4442	0,2561		
0,11	2,79	93,00	2,86	96,6483	0,2416		
0,12	3,05	87,50	2,75	91,1270	0,2278		
0,13	3,30	82,40	1,75	85,8833	0,2147		
0,14	3,56	77,30	1,65	80,9168	0,2023		
0,15	3,81	72,60	1,55	76,2239	0,1906		
0,16	4,06	68,30	1,47	71,7988	0,1795		
0,17	4,32	64,30	1,39	67,6334	0,1691		
0,18	4,57	60,30	1,31	63,7184	0,1593		
0,19	4,83	56,60	1,23	60,0434	0,1501		
0,20	5,08	53,30	1,17	56,5969	0,1415		
0,21	5,33	50,20	1,10	53,3676	0,1334		
0,22	5,59	47,70	1,05	50,3435	0,1259		
0,23	5,84	44,70	0,99	47,5128	0,1188		
0,24	6,10	42,20	0,94	44,8640	0,1122		
0,25	6,35	39,80	0,90	42,3858	0,1060		
0,26	6,60	37,70	0,85	40,0673	0,1002		
0,27	6,86	35,60	0,81	37,8981	0,0947		
0,28	7,11	33,70	0,77	35,8683	0,0897		
0,29	7,37	31,90	0,74	33,9684	0,0849		
0,30	7,62	30,10	0,70	32,1896	0,0805		
0,31	7,87	28,50	0,67	30,5237	0,0763		
0,32	8,13	27,10	0,64	28,9627	0,0724		
0,33	8,38	25,70	0,61	27,4994	0,0687		
0,34	8,64	24,40	0,59	26,1271	0,0653		
0,35	8,89	23,10	0,56	24,8394	0,0621		
0,36	9,14	22,00	0,54	23,6304	0,0591		
0,37	9,40	20,90	0,52	22,4946	0,0562		
0,38	9,65	19,90	0,50	21,4271	0,0536		
0,39	9,91	18,90	0,48	20,4230	0,0511		
0,40	10,16	18,10	0,46	19,4781	0,0487		
0,41	10,41	17,20	0,44	18,5883	0,0465		
0,42	10,67	16,40	0,43	17,7499	0,0444		
0,43	10,92	15,70	0,41	16,9593	0,0424		
0,44	11,18	15,00	0,40	16,2135	0,0405		
0,45	11,43	14,30	0,39	15,5094	0,0388		
0,47	12,00	12,90	0,36	14,0673	0,0352		
0,49	12,50	11,90	0,34	12,9424	0,0324		
0,51	13,00	10,90	0,32	11,9316	0,0298		

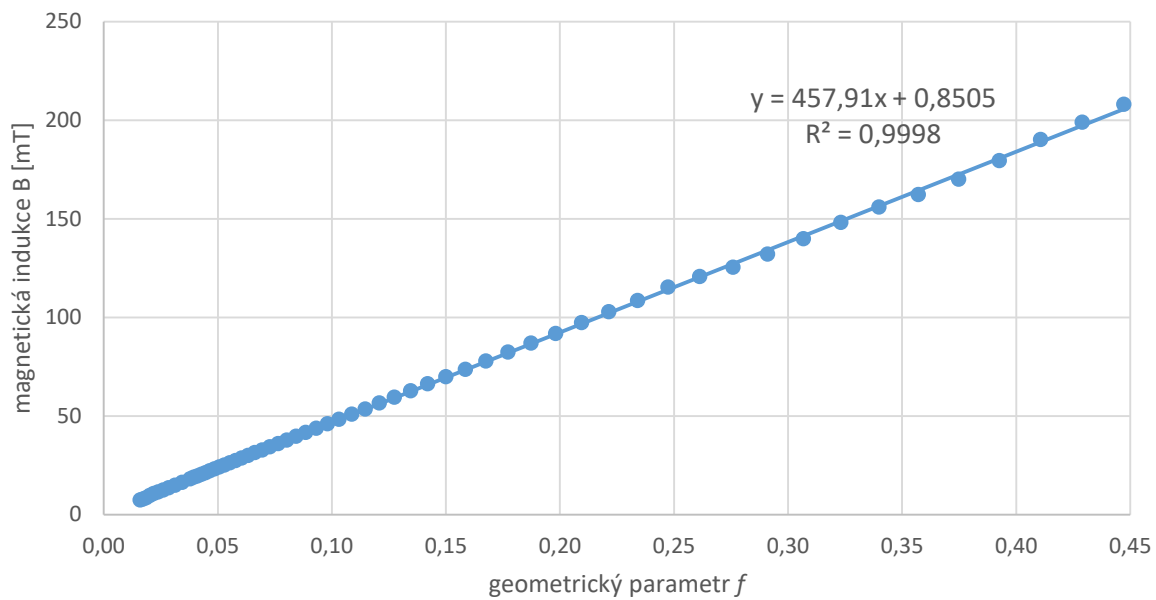
0,53	13,50	10,10	0,30	11,0212	0,0276
0,55	14,00	9,30	0,29	10,1995	0,0255
0,57	14,50	8,60	0,27	9,4561	0,0236
0,59	15,00	8,00	0,26	8,7821	0,0220



4 Naměřené hodnoty samarium-kobaltového válcového magnetu KT-18-06-S/YXG30

Válec KT-18-06-S/YXG30				Teoretický výpočet		Lin. Regrese	
				Délka D [mm]	6		
				Poloměr R	9		
				Br [mT]	1080		
z [inch]	z [mm]	B [mT]	σ_B [mT]	B [mT]	Geom. Faktor		
0,00	0,00	274,00	9,22	299,5381	0,2774	979,1426233	-1,683447153
0,01	0,25	265,00	8,95	292,9128	0,2712	2,33405559	0,352476673
0,02	0,51	259,00	8,77	285,9889	0,2648	0,999721641	1,235497459
0,03	0,76	253,00	8,59	278,8113	0,2582		
0,04	1,02	246,00	8,38	271,4242	0,2513	Stanovení chyby	
0,05	1,27	238,00	8,14	263,8713	0,2443	počet měření	50
0,06	1,52	231,00	7,93	256,1946	0,2372	pravděpodobnost	0,95
0,07	1,78	224,00	7,72	248,4346	0,2300	Student. souč.	2,010634758
0,08	2,03	216,00	7,48	240,6295	0,2228	s_k	4,692933295
0,09	2,29	209,00	7,27	232,8153	0,2156	s_q	0,70870185
0,10	2,54	202,00	7,06	225,0251	0,2084	r_{xy}	0,999860811
0,11	2,79	195,10	4,90	217,2894	0,2012		
0,12	3,05	187,20	4,74	209,6358	0,1941		
0,13	3,30	181,30	3,73	202,0887	0,1871		
0,14	3,56	173,80	3,58	194,6698	0,1802		
0,15	3,81	166,60	3,43	187,3979	0,1735		
0,16	4,06	160,10	3,30	180,2890	0,1669		
0,17	4,32	154,00	3,18	173,3562	0,1605		
0,18	4,57	147,60	3,05	166,6106	0,1543		
0,19	4,83	141,80	2,94	160,0606	0,1482		
0,20	5,08	136,10	2,82	153,7124	0,1423		
0,21	5,33	130,80	2,72	147,5707	0,1366		
0,22	5,59	125,60	2,61	141,6381	0,1311		
0,23	5,84	120,20	2,50	135,9156	0,1258		
0,24	6,10	115,20	2,40	130,4030	0,1207		
0,25	6,35	110,60	2,31	125,0990	0,1158		
0,26	6,60	105,30	2,21	120,0010	0,1111		
0,27	6,86	101,90	2,14	115,1057	0,1066		
0,28	7,11	97,70	2,05	110,4091	0,1022		
0,29	7,37	93,70	1,97	105,9065	0,0981		
0,30	7,62	89,90	1,90	101,5928	0,0941		
0,31	7,87	86,10	1,82	97,4625	0,0902		
0,32	8,13	82,80	1,76	93,5098	0,0866		
0,33	8,38	79,60	1,69	89,7288	0,0831		
0,34	8,64	76,40	1,63	86,1134	0,0797		
0,35	8,89	73,30	1,57	82,6573	0,0765		
0,36	9,14	70,40	1,51	79,3545	0,0735		
0,38	9,40	67,70	1,45	76,1988	0,0706		
0,40	9,65	65,00	1,40	73,1841	0,0678		
0,42	9,91	62,50	1,35	70,3046	0,0651		
0,44	10,16	60,10	1,30	67,5542	0,0626		
0,46	10,67	55,60	1,21	62,4186	0,0578		
0,48	11,18	51,50	1,13	57,7339	0,0535		
0,50	11,68	47,80	1,06	53,4594	0,0495		
0,52	12,19	44,30	0,99	49,5575	0,0459		
0,54	12,70	41,20	0,92	45,9935	0,0426		
0,56	13,21	38,30	0,87	42,7360	0,0396		
0,58	13,72	35,80	0,82	39,7560	0,0368		
0,60	14,22	33,30	0,77	37,0276	0,0343		
0,62	14,73	31,10	0,72	34,5269	0,0320		
0,64	14,99	30,10	0,70	33,3553	0,0309		

Závislost magnetické indukce na geometrickém faktoru a proložení
přímku lineární regrese válcového magnetu
KT-18-06-S/YXG30.

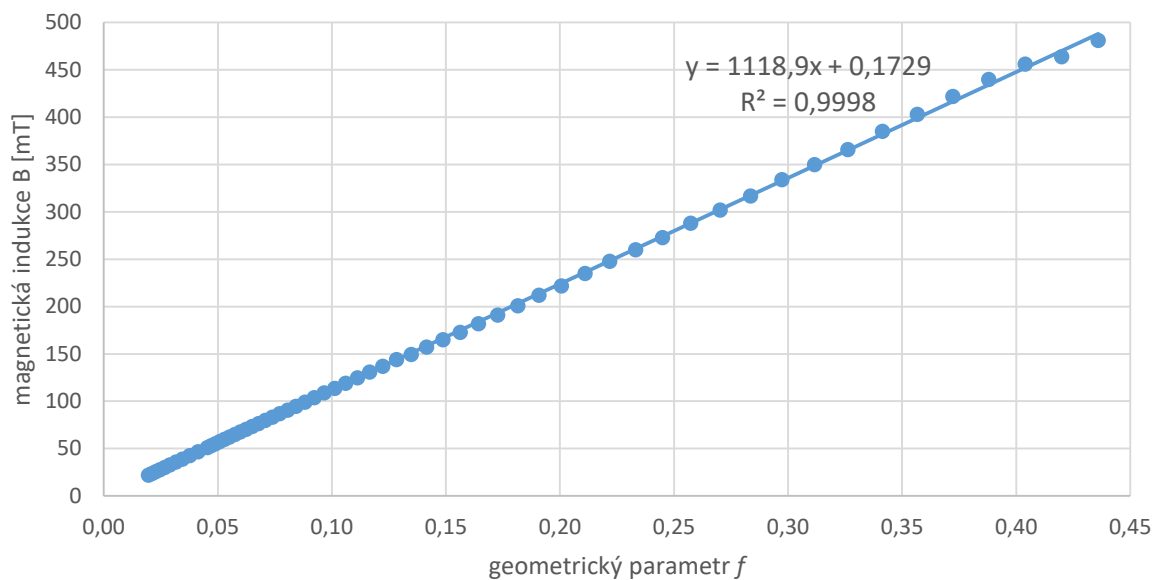


5 Naměřené hodnoty neodymového krychlového magnetu KS-10-N/N42

Krychle KS-10N/N42			Teoretický výpočet		Lineární regrese	
			délka a [mm]	10		
			výška b [mm]	10		
			šířka c [mm]	10		
			B_r [mT]	1290		
z [mm]	B [mT]	σ_B	B [mT]	Geom. Faktor		
0,00	481,00	10,62	562,3185	0,4359	1118,8683	0,172908105
0,20	464,00	10,28	541,7282	0,4199	2,151124121	0,409585007
0,40	456,00	10,12	521,1154	0,4040	0,999781963	1,981332061
0,60	440,00	9,80	500,5767	0,3880	Stanovení chyb	
0,80	422,00	9,44	480,2047	0,3723		
1,00	403,00	9,06	460,0865	0,3567	počet měření	60
1,20	385,00	8,70	440,3022	0,3413	pravděpodob.	0,95
1,40	366,00	8,32	420,9235	0,3263	Student.	2,001717484
1,60	350,00	8,00	402,0136	0,3116	s_k	4,305942764
1,80	334,00	7,68	383,6265	0,2974	s_q	0,81987347
2,00	317,00	7,34	365,8064	0,2836	R_{xy}	0,999890976
2,20	302,00	7,04	348,5888	0,2702		
2,40	288,00	6,76	332,0000	0,2574		
2,60	273,00	5,56	316,0582	0,2450		
2,80	260,00	5,30	300,7738	0,2332		
3,00	248,00	5,06	286,1507	0,2218		
3,20	235,00	4,80	272,1867	0,2110		
3,40	222,00	4,54	258,8745	0,2007		
3,60	212,00	4,34	246,2024	0,1909		
3,80	201,00	4,12	234,1553	0,1815		
4,00	191,10	3,92	222,7152	0,1726		
4,20	181,80	3,74	211,8620	0,1642		
4,40	172,70	3,55	201,5740	0,1563		
4,60	164,90	3,40	191,8282	0,1487		
4,80	157,20	3,24	182,6012	0,1416		
5,00	149,50	3,09	173,8693	0,1348		
5,20	144,00	2,98	165,6085	0,1284		
5,40	137,10	2,84	157,7954	0,1223		
5,60	130,80	2,72	150,4068	0,1166		
5,80	124,80	2,60	143,4202	0,1112		
6,00	119,10	2,48	136,8138	0,1061		
6,20	113,70	2,37	130,5666	0,1012		
6,40	109,10	2,28	124,6584	0,0966		
6,60	103,90	2,18	119,0700	0,0923		
6,80	99,10	2,08	113,7830	0,0882		
7,00	94,90	2,00	108,7800	0,0843		
7,20	90,80	1,92	104,0444	0,0807		
7,40	86,90	1,84	99,5606	0,0772		
7,60	83,30	1,77	95,3139	0,0739		
7,80	79,70	1,69	91,2903	0,0708		
8,00	76,50	1,63	87,4768	0,0678		
8,20	73,50	1,57	83,8609	0,0650		
8,40	70,50	1,51	80,4310	0,0623		
8,60	67,70	1,45	77,1763	0,0598		
8,80	64,90	1,40	74,0866	0,0574		
9,00	62,30	1,35	71,1522	0,0552		
9,20	59,90	1,30	68,3641	0,0530		
9,40	57,50	1,25	65,7138	0,0509		
9,60	55,30	1,21	63,1935	0,0490		

9,80	53,20	1,16	60,7957	0,0471
10,00	51,20	1,12	58,5135	0,0454
10,50	46,80	1,04	53,2714	0,0413
11,00	42,60	0,95	48,6203	0,0377
11,50	39,00	0,88	44,4821	0,0345
12,00	35,80	0,82	40,7902	0,0316
12,50	32,90	0,76	37,4879	0,0291
13,00	30,30	0,71	34,5264	0,0268
13,50	27,90	0,66	31,8638	0,0247
14,00	25,90	0,62	29,4642	0,0228
14,50	23,90	0,58	27,2965	0,0212
15,00	22,20	0,54	25,3338	0,0196

Závislost magnetické indukce na geometrickém faktoru a proložení přímkou lineární regrese magnetu tvaru krychle KS-10-N/N42.

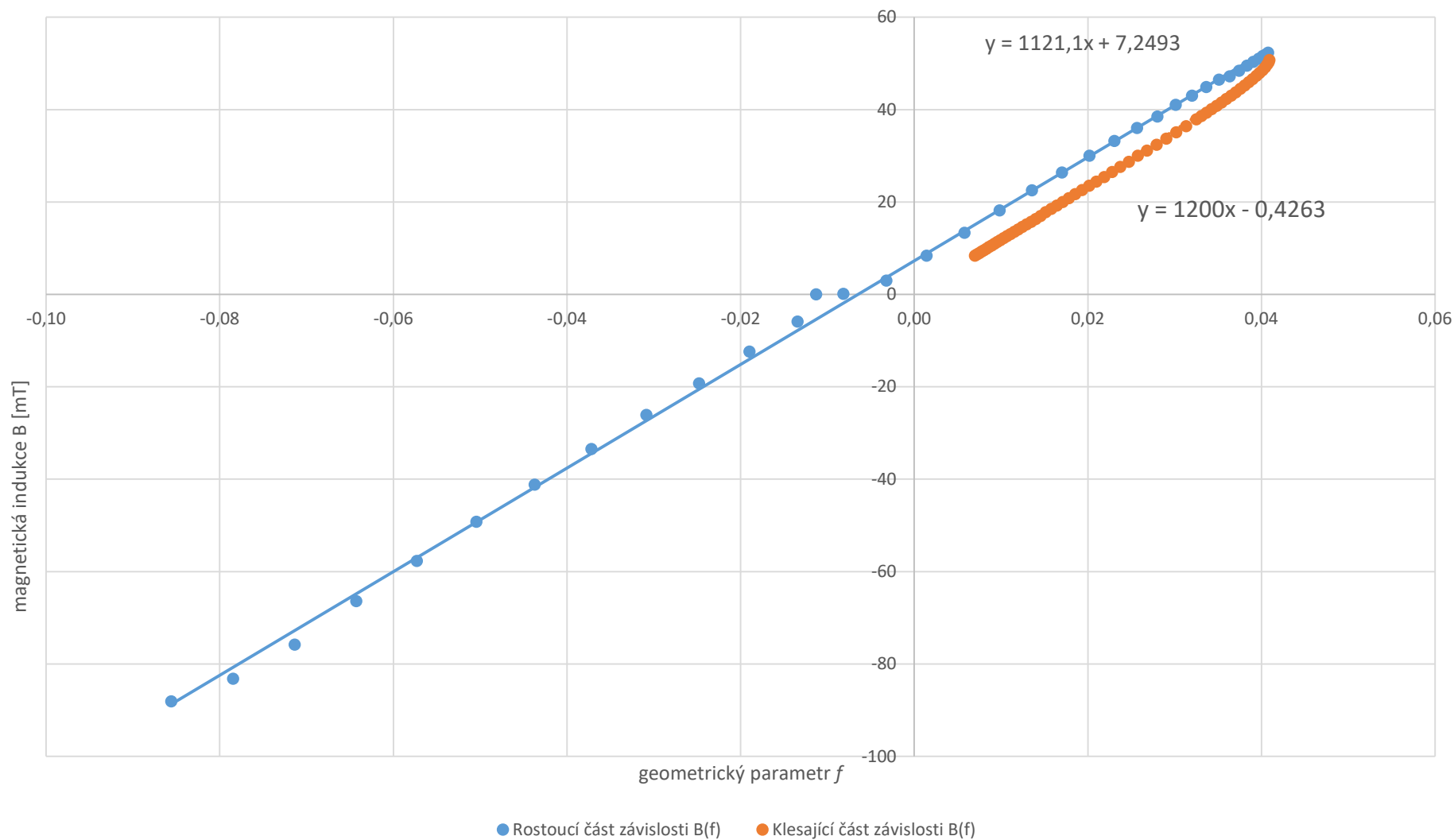


6 Naměřené hodnoty dvou kusů neodymových prstencových magnetů KR-26-16-05-N/N42

2x prsteneček KR-26-16-05-N/N42				Teoretický výpočet		Lin. Regrese	
				Délka D [mm]	10		
				Poloměr vnější R ₁ [mm]	13		
				Poloměr vnitřní R ₂ [mm]	8		
				B _r [mT]	1290		
z [inch]	z [mm]	B [mT]	σ _B [mT]	B [mT]	Geom. Faktor		
0,00	0,00	-88,10	-1,66	-110,3969	-0,0856	1090,341034	4,094170581
0,01	0,25	-83,20	-1,56	-101,2195	-0,0785	10,78218614	0,340017613
0,02	0,51	-75,80	-1,42	-92,0429	-0,0714	0,990699589	2,966669452
0,03	0,76	-66,40	-1,23	-82,9210	-0,0643		
0,04	1,02	-57,70	-1,05	-73,9050	-0,0573	Stanovení chyby	
0,05	1,27	-49,20	-0,88	-65,0435	-0,0504	počet měření	97
0,06	1,52	-41,20	-0,72	-56,3813	-0,0437	pravděpodobnost	0,95
0,07	1,78	-33,50	-0,57	-47,9592	-0,0372	Student. souč.	1,985251004
0,08	2,03	-26,10	-0,42	-39,8133	-0,0309	s _k	21,40534585
0,09	2,29	-19,30	-0,29	-31,9749	-0,0248	s _q	0,675020308
0,10	2,54	-12,40	-0,15	-24,4704	-0,0190	R _{xy}	0,995338932
0,11	2,79	-5,90	-0,11	-17,3212	-0,0134		
0,11	2,90	0,00	0,01	-14,5649	-0,0113		
0,12	3,05	0,10	0,01	-10,5438	-0,0082		
0,13	3,30	2,96	0,07	-4,1498	-0,0032		
0,14	3,56	8,37	0,18	1,8535	0,0014		
0,15	3,81	13,35	0,28	7,4632	0,0058		
0,16	4,06	18,16	0,37	12,6800	0,0098		
0,17	4,32	22,50	0,55	17,5078	0,0136		
0,18	4,57	26,40	0,63	21,9539	0,0170		
0,19	4,83	30,00	0,70	26,0278	0,0202		
0,20	5,08	33,20	0,76	29,7410	0,0231		
0,21	5,33	36,00	0,82	33,1072	0,0257		
0,22	5,59	38,50	0,87	36,1409	0,0280		
0,23	5,84	41,00	0,92	38,8579	0,0301		
0,24	6,10	43,00	0,96	41,2746	0,0320		
0,25	6,35	44,90	1,00	43,4079	0,0336		
0,26	6,60	46,50	1,03	45,2748	0,0351		
0,27	6,86	47,20	1,04	46,8921	0,0364		
0,28	7,11	48,40	1,07	48,2768	0,0374		
0,29	7,37	49,50	1,09	49,4451	0,0383		
0,30	7,62	50,30	1,11	50,4132	0,0391		
0,31	7,87	51,00	1,12	51,1963	0,0397		
0,32	8,13	51,60	1,13	51,8092	0,0402		
0,33	8,38	51,90	1,14	52,2661	0,0405		
0,34	8,64	52,30	1,15	52,5803	0,0408		
0,35	8,89	51,80	1,14	52,7645	0,0409		
0,36	9,14	51,20	1,12	52,8306	0,0410		
0,37	9,40	50,70	1,11	52,7898	0,0409		
0,38	9,65	50,20	1,10	52,6525	0,0408		
0,39	9,91	49,70	1,09	52,4286	0,0406		
0,40	10,16	49,10	1,08	52,1271	0,0404		
0,41	10,41	48,50	1,07	51,7563	0,0401		
0,42	10,67	47,90	1,06	51,3241	0,0398		
0,43	10,92	47,30	1,05	50,8377	0,0394		
0,44	11,18	46,60	1,03	50,3036	0,0390		
0,45	11,43	45,90	1,02	49,7279	0,0385		
0,46	11,68	45,20	1,00	49,1163	0,0381		
0,47	11,94	44,50	0,99	48,4736	0,0376		
0,48	12,19	43,70	0,97	47,8047	0,0371		
0,49	12,45	43,00	0,96	47,1138	0,0365		

0,50	12,70	42,30	0,95	46,4046	0,0360
0,51	12,95	41,50	0,93	45,6808	0,0354
0,52	13,21	40,80	0,92	44,9453	0,0348
0,53	13,46	40,10	0,90	44,2012	0,0343
0,54	13,72	39,30	0,89	43,4509	0,0337
0,55	13,97	38,60	0,87	42,6968	0,0331
0,56	14,22	37,90	0,86	41,9410	0,0325
0,58	14,73	36,40	0,83	40,4314	0,0313
0,60	15,24	35,10	0,80	38,9346	0,0302
0,62	15,75	33,70	0,77	37,4605	0,0290
0,64	16,26	32,40	0,75	36,0167	0,0279
0,66	16,76	31,10	0,72	34,6090	0,0268
0,68	17,27	30,00	0,70	33,2417	0,0258
0,70	17,78	28,70	0,67	31,9176	0,0247
0,72	18,29	27,60	0,65	30,6389	0,0238
0,74	18,80	26,50	0,63	29,4066	0,0228
0,76	19,30	25,40	0,61	28,2212	0,0219
0,78	19,81	24,40	0,59	27,0827	0,0210
0,80	20,32	23,50	0,57	25,9906	0,0201
0,82	20,83	22,60	0,55	24,9442	0,0193
0,84	21,34	21,70	0,53	23,9424	0,0186
0,86	21,84	20,80	0,52	22,9840	0,0178
0,88	22,35	20,00	0,50	22,0676	0,0171
0,90	22,86	19,24	0,48	21,1919	0,0164
0,92	23,37	18,51	0,47	20,3553	0,0158
0,94	23,88	17,81	0,46	19,5563	0,0152
0,96	24,38	16,97	0,44	18,7933	0,0146
0,98	24,89	16,32	0,43	18,0649	0,0140
1,00	25,40	15,70	0,41	17,3694	0,0135
1,02	25,91	15,12	0,40	16,7055	0,0130
1,04	26,42	14,59	0,39	16,0717	0,0125
1,06	26,92	14,06	0,38	15,4665	0,0120
1,08	27,43	13,56	0,37	14,8887	0,0115
1,10	27,94	13,07	0,36	14,3368	0,0111
1,12	28,45	12,62	0,35	13,8098	0,0107
1,14	28,96	12,16	0,34	13,3063	0,0103
1,16	29,46	11,73	0,33	12,8251	0,0099
1,18	29,97	11,35	0,33	12,3653	0,0096
1,20	30,48	10,95	0,32	11,9258	0,0092
1,22	30,99	10,57	0,31	11,5055	0,0089
1,24	31,50	10,22	0,30	11,1036	0,0086
1,26	32,00	9,87	0,30	10,7190	0,0083
1,28	32,51	9,55	0,29	10,3511	0,0080
1,30	33,02	9,24	0,28	9,9988	0,0078
1,32	33,53	8,93	0,28	9,6616	0,0075
1,34	34,04	8,65	0,27	9,3385	0,0072
1,36	34,54	8,35	0,27	9,0291	0,0070

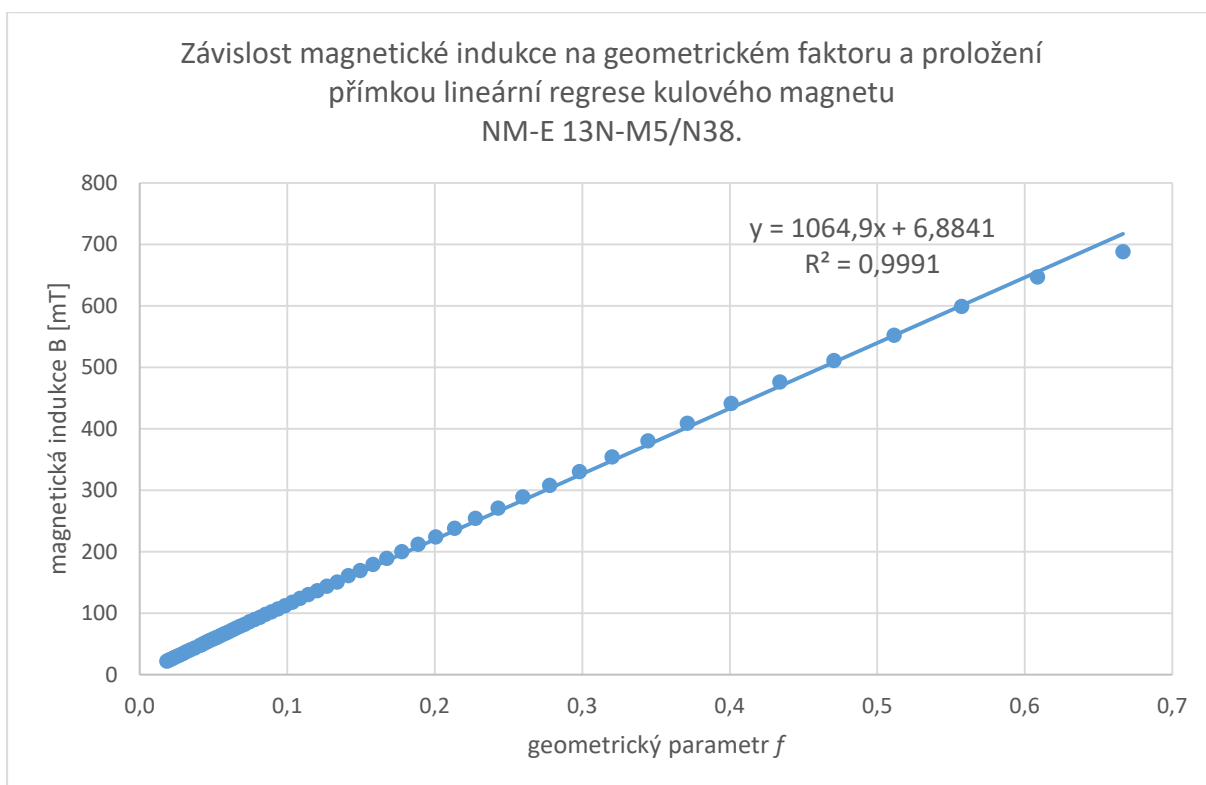
Závislost magnetické indukce na geometrickém faktoru a proložení přímkou lineární regrese magnetu tvaru prstence KR-26-16-05-N/N42.



7 Naměřené hodnoty neodymového magnetu tvaru koule NM-E-13N/N38

Koule NM-E 13N-M5/N38			Teoretický výpočet		Lineární regrese	
			Poloměr R [mm]	6,5		
			Br [mT]	1220		
z [mm]	B [mT]	σ_B [mT]	B [mT]	Geom. Faktor		
0,00	688,00	14,76	813,3333	0,6667	1064,920422	6,884106457
0,20	647,00	13,94	742,6501	0,6087	4,188988141	0,944143906
0,40	599,00	12,98	679,9256	0,5573	0,999087906	5,184781896
0,60	552,00	12,04	624,0704	0,5115		
0,80	511,00	11,22	574,1694	0,4706		
1,00	476,00	10,52	529,4499	0,4340	Stanovení chyby	
1,20	441,00	9,82	489,2563	0,4010	počet měření	60
1,40	409,00	9,18	453,0304	0,3713	pravděpodob.	0,95
1,60	380,00	8,60	420,2944	0,3445	Student. souč.	2,001717484
1,80	354,00	8,08	390,6379	0,3202	s_k	8,385170802
2,00	330,00	7,60	363,7072	0,2981	s_q	1,889909365
2,20	308,00	7,16	339,1961	0,2780	R_{xy}	0,999543849
2,40	289,00	6,78	316,8390	0,2597		
2,60	271,00	5,52	296,4043	0,2430		
2,80	254,00	5,18	277,6897	0,2276		
3,00	238,00	4,86	260,5181	0,2135		
3,20	224,00	4,58	244,7335	0,2006		
3,40	212,00	4,34	230,1988	0,1887		
3,60	200,00	4,10	216,7926	0,1777		
3,80	189,00	3,88	204,4076	0,1675		
4,00	179,20	3,68	192,9482	0,1582		
4,20	169,10	3,48	182,3297	0,1495		
4,40	160,80	3,32	172,4762	0,1414		
4,60	150,60	3,11	163,3201	0,1339		
4,80	144,00	2,98	154,8008	0,1269		
5,00	136,80	2,84	146,8639	0,1204		
5,20	130,20	2,70	139,4604	0,1143		
5,40	124,10	2,58	132,5463	0,1086		
5,60	118,00	2,46	126,0818	0,1033		
5,80	111,90	2,34	120,0310	0,0984		
6,00	107,00	2,24	114,3612	0,0937		
6,20	102,40	2,15	109,0429	0,0894		
6,40	98,00	2,06	104,0494	0,0853		
6,60	93,40	1,97	99,3562	0,0814		
6,80	89,80	1,90	94,9410	0,0778		
7,00	85,80	1,82	90,7836	0,0744		
7,20	82,10	1,74	86,8654	0,0712		
7,40	78,80	1,68	83,1695	0,0682		
7,60	75,40	1,61	79,6804	0,0653		
7,80	72,40	1,55	76,3837	0,0626		
8,00	69,60	1,49	73,2664	0,0601		
8,20	67,00	1,44	70,3164	0,0576		
8,40	64,30	1,39	67,5227	0,0553		
8,60	61,80	1,34	64,8751	0,0532		
8,80	59,30	1,29	62,3641	0,0511		
9,00	57,20	1,24	59,9810	0,0492		
9,20	55,10	1,20	57,7178	0,0473		
9,40	53,20	1,16	55,5670	0,0455		
9,60	51,20	1,12	53,5218	0,0439		
9,80	49,30	1,09	51,5758	0,0423		
10,00	47,70	1,05	49,7229	0,0408		

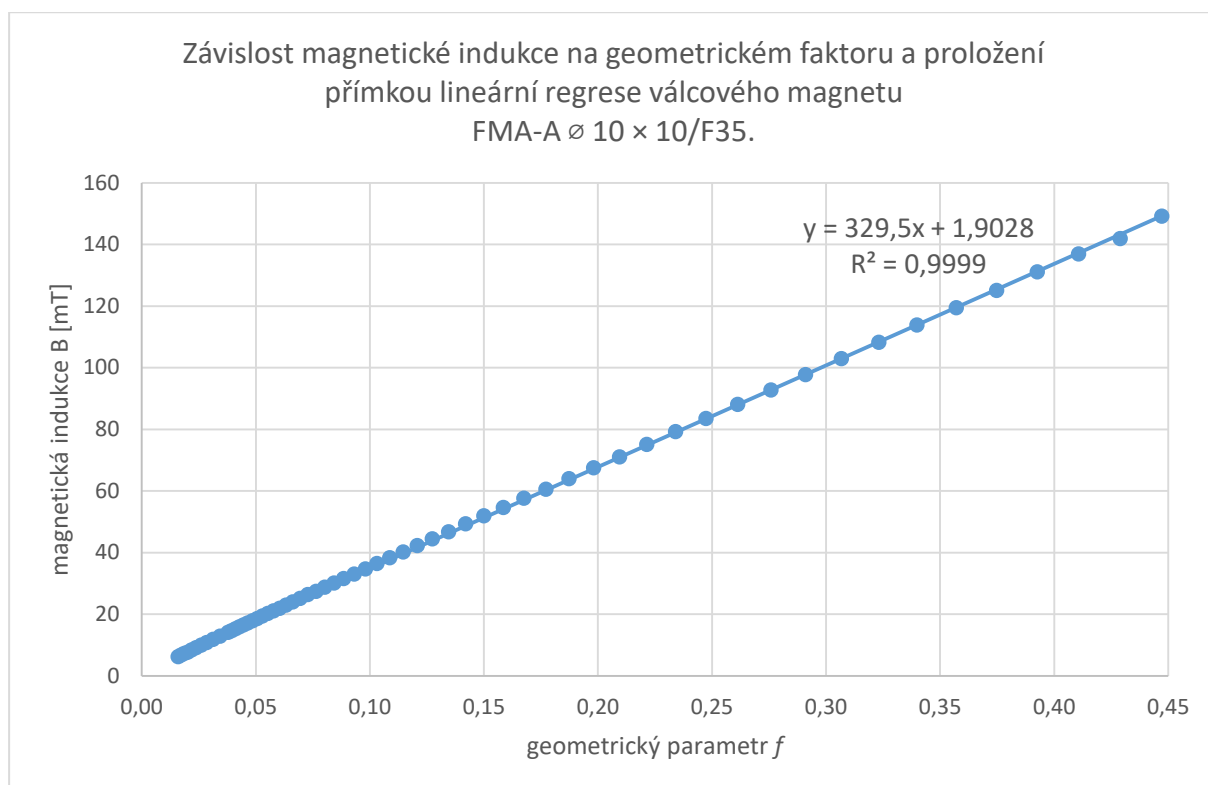
10,50	43,60	0,97	45,4634	0,0373
11,00	40,20	0,90	41,6768	0,0342
11,50	36,90	0,84	38,2993	0,0314
12,00	34,10	0,78	35,2771	0,0289
12,50	31,50	0,73	32,5648	0,0267
13,00	29,20	0,68	30,1235	0,0247
13,50	27,10	0,64	27,9202	0,0229
14,00	25,20	0,60	25,9267	0,0213
14,50	23,60	0,57	24,1185	0,0198
15,00	22,00	0,54	22,4747	0,0184



8 Naměřené hodnoty feritového magnetu tvaru válce FMA-A \varnothing 10 × 10/F35

Válec FMA-A \varnothing 10 × 10/F35			Teoretický výpočet		Lineární regrese	
			Délka D [mm]	10		
			Poloměr R	5		
			Br [mT]	430		
z [mm]	B [mT]	σ_B [mT]	B [mT]	Geom.		
0,00	149,20	3,98	192,3018	0,4472	329,5027141	1,902830777
0,20	141,90	3,84	184,4598	0,4290	0,47652049	0,088651297
0,40	136,90	3,74	176,6240	0,4108	0,99987662	0,450422184
0,60	131,10	3,62	168,8366	0,3926		
0,80	125,10	3,50	161,1374	0,3747	Stanovení chyby	
1,00	119,40	3,39	153,5638	0,3571	počet měření	60
1,20	113,80	3,28	146,1495	0,3399	pravděpodob.	0,95
1,40	108,20	3,16	138,9240	0,3231	Student.	2,001717484
1,60	102,90	3,06	131,9129	0,3068	s_k	0,953859396
1,80	97,70	2,95	125,1369	0,2910	s_d	0,177454852
2,00	92,70	2,85	118,6125	0,2758	R_{xy}	0,999938308
2,20	88,10	2,76	112,3518	0,2613		
2,40	83,50	2,67	106,3627	0,2474		
2,60	79,20	1,68	100,6497	0,2341		
2,80	75,10	1,60	95,2136	0,2214		
3,00	71,00	1,52	90,0527	0,2094		
3,20	67,50	1,45	85,1627	0,1981		
3,40	64,00	1,38	80,5374	0,1873		
3,60	60,50	1,31	76,1689	0,1771		
3,80	57,60	1,25	72,0481	0,1676		
4,00	54,60	1,19	68,1651	0,1585		
4,20	51,90	1,14	64,5093	0,1500		
4,40	49,30	1,09	61,0698	0,1420		
4,60	46,70	1,03	57,8356	0,1345		
4,80	44,40	0,99	54,7956	0,1274		
5,00	42,20	0,94	51,9390	0,1208		
5,20	40,20	0,90	49,2549	0,1145		
5,40	38,30	0,87	46,7333	0,1087		
5,60	36,40	0,83	44,3641	0,1032		
5,80	34,70	0,79	42,1379	0,0980		
6,00	33,00	0,76	40,0456	0,0931		
6,20	31,50	0,73	38,0788	0,0886		
6,40	30,10	0,70	36,2292	0,0843		
6,60	28,70	0,67	34,4894	0,0802		
6,80	27,40	0,65	32,8522	0,0764		
7,00	26,30	0,63	31,3109	0,0728		
7,20	25,10	0,60	29,8591	0,0694		
7,40	24,00	0,58	28,4912	0,0663		
7,60	22,90	0,56	27,2014	0,0633		
7,80	21,90	0,54	25,9849	0,0604		
8,00	21,00	0,52	24,8367	0,0578		
8,20	20,20	0,50	23,7525	0,0552		
8,40	19,40	0,49	22,7282	0,0529		
8,60	18,60	0,47	21,7599	0,0506		
8,80	17,80	0,46	20,8440	0,0485		
9,00	17,10	0,44	19,9772	0,0465		
9,20	16,50	0,43	19,1564	0,0445		
9,40	15,90	0,42	18,3788	0,0427		
9,60	15,20	0,40	17,6416	0,0410		
9,80	14,60	0,39	16,9424	0,0394		
10,00	14,10	0,38	16,2788	0,0379		

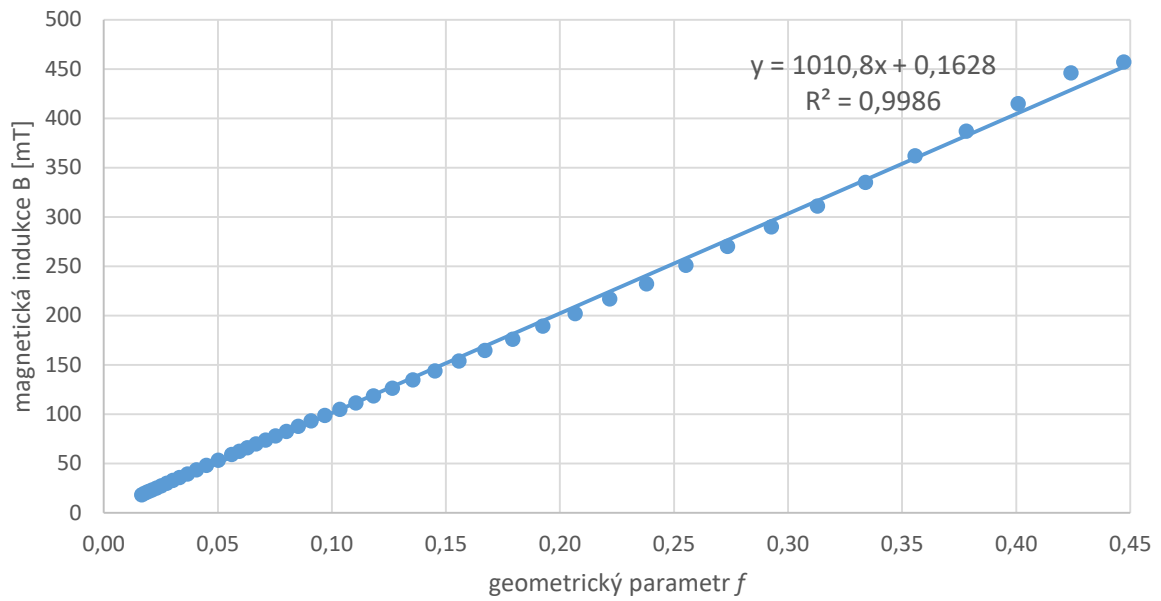
10,50	12,80	0,36	14,7619	0,0343
11,00	11,80	0,34	13,4245	0,0312
11,50	10,80	0,32	12,2417	0,0285
12,00	9,90	0,30	11,1920	0,0260
12,50	9,10	0,28	10,2577	0,0239
13,00	8,40	0,27	9,4236	0,0219
13,50	7,70	0,25	8,6768	0,0202
14,00	7,20	0,24	8,0063	0,0186
14,50	6,70	0,23	7,4027	0,0172
15,00	6,20	0,22	6,8579	0,0159



9 Naměřené hodnoty neodymového magnetu tvaru válce KT-10-10-N/N42

Válec KT-10-10-N/N42				Teoretický výpočet		Lin. Regrese	
				Délka D [mm]	10		
				Poloměr R [mm]	5		
				B_r [mT]	1290		
z [inch]	z [mm]	B [mT]	σ_B [mT]	B [mT]	Geom. Faktor		
0,00	0,00	457,00	14,71	576,9055	0,4472	1010,815565	0,162785658
0,01	0,25	446,00	14,38	547,0253	0,4241	5,629222325	1,074993402
0,02	0,51	415,00	13,45	517,2306	0,4010	0,998637259	4,70862225
0,03	0,76	387,00	12,61	487,7751	0,3781		
0,04	1,02	362,00	11,86	458,8932	0,3557	Stanovení chyby	
0,05	1,27	335,00	11,05	430,7930	0,3339	počet měření	45
0,06	1,52	311,00	10,33	403,6514	0,3129	pravděpodobnost	0,95
0,07	1,78	290,00	9,70	377,6107	0,2927	Student. souč.	2,016692199
0,08	2,03	270,00	9,10	352,7786	0,2735	s_k	11,35240875
0,09	2,29	251,00	8,53	329,2286	0,2552	s_q	2,167930807
0,10	2,54	232,00	7,96	307,0035	0,2380	R_{xy}	0,999318397
0,11	2,79	217,00	7,51	286,1180	0,2218		
0,12	3,05	202,00	7,06	266,5639	0,2066		
0,13	3,30	189,30	3,89	248,3136	0,1925		
0,14	3,56	176,10	3,62	231,3251	0,1793		
0,15	3,81	164,50	3,39	215,5451	0,1671		
0,16	4,06	153,80	3,18	200,9131	0,1557		
0,17	4,32	143,70	2,97	187,3637	0,1452		
0,18	4,57	134,80	2,80	174,8294	0,1355		
0,19	4,83	126,30	2,63	163,2424	0,1265		
0,20	5,08	118,50	2,47	152,5356	0,1182		
0,21	5,33	111,50	2,33	142,6443	0,1106		
0,22	5,59	104,80	2,20	133,5064	0,1035		
0,23	5,84	98,70	2,07	125,0631	0,0969		
0,24	6,10	93,20	1,96	117,2592	0,0909		
0,25	6,35	87,60	1,85	110,0432	0,0853		
0,26	6,60	82,60	1,75	103,3672	0,0801		
0,27	6,86	77,80	1,66	97,1870	0,0753		
0,28	7,11	73,70	1,57	91,4618	0,0709		
0,29	7,37	69,70	1,49	86,1541	0,0668		
0,30	7,62	66,00	1,42	81,2297	0,0630		
0,31	7,87	62,30	1,35	76,6570	0,0594		
0,32	8,13	59,10	1,28	72,4072	0,0561		
0,34	8,64	53,40	1,17	64,7738	0,0502		
0,36	9,14	48,10	1,06	58,1454	0,0451		
0,38	9,65	43,40	0,97	52,3688	0,0406		
0,40	10,16	39,40	0,89	47,3163	0,0367		
0,42	10,67	35,80	0,82	42,8815	0,0332		
0,44	11,18	32,70	0,75	38,9752	0,0302		
0,46	11,68	30,00	0,70	35,5228	0,0275		
0,48	12,19	27,40	0,65	32,4615	0,0252		
0,50	12,70	25,20	0,60	29,7385	0,0231		
0,52	13,21	23,00	0,56	27,3090	0,0212		
0,54	13,72	21,40	0,53	25,1351	0,0195		
0,56	14,22	19,80	0,50	23,1843	0,0180		
0,58	14,73	18,30	0,47	21,4291	0,0166		

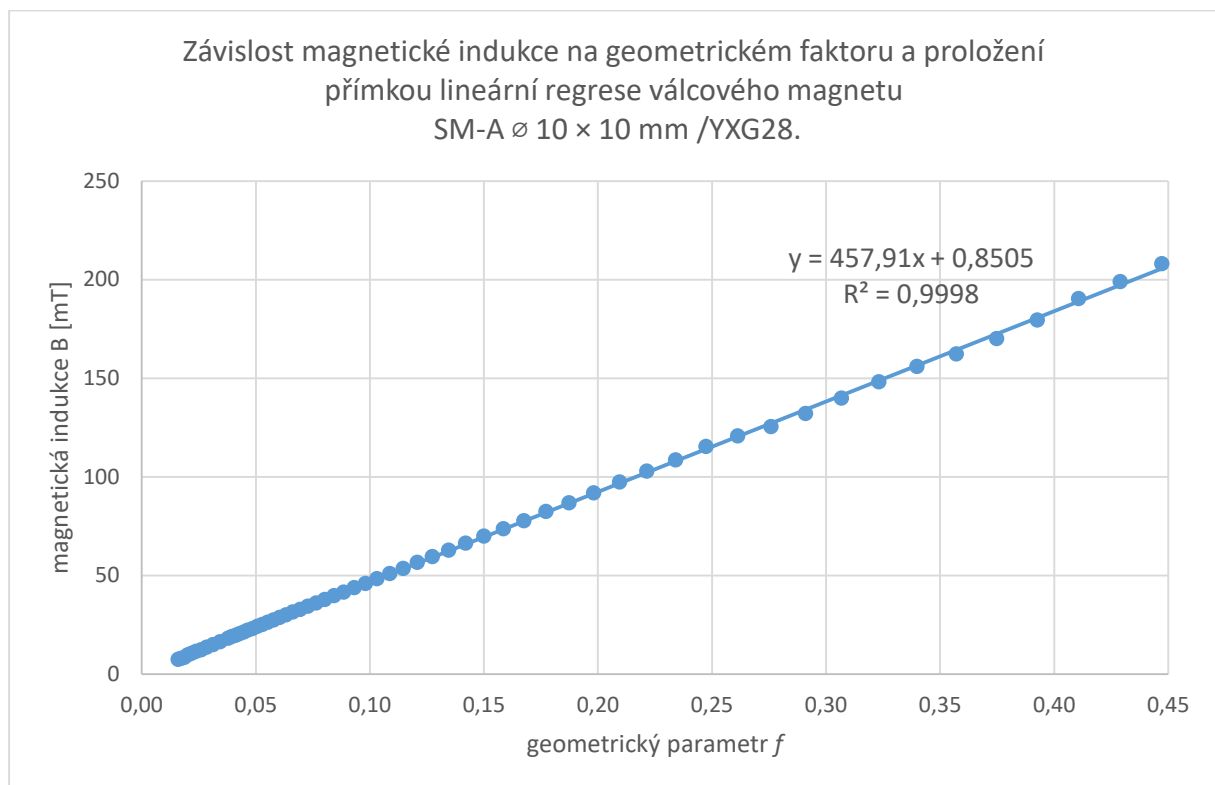
Závislost magnetické indukce na geometrickém faktoru a proložení
přímkou lineární regrese válcového magnetu
KT-10-10-N/N42.



10 Naměřené hodnoty samarium-kobaltového magnetu tvaru válce SM-A $\varnothing 10 \times 10$ mm/YXG28.

Válec SM-A $\varnothing 10 \times 10$ /YXG28			Teoretický výpočet		Lineární regrese	
			Délka D [mm]	10		
			Poloměr R [mm]	5		
			Br [mT]	1030		
z [mm]	B [mT]	σ_B [mT]	B [mT]	Geom. Faktor	Lineární regrese	
0,00	208,00	5,16	460,6300	0,4472	457,9068828	0,850478563
0,20	199,00	4,98	441,8456	0,4290	0,864326822	0,16079832
0,40	190,30	4,81	423,0762	0,4108	0,999789834	0,816988951
0,60	179,50	4,59	404,4225	0,3926		
0,80	170,10	4,40	385,9803	0,3747	Stanovení chyby	
1,00	162,30	4,25	367,8389	0,3571	počet měření	60
1,20	156,00	4,12	350,0789	0,3399	pravděpodob.	0,95
1,40	148,10	3,96	332,7715	0,3231	Student. souč.	2,001717484
1,60	139,90	3,80	315,9774	0,3068	s_k	1,730138112
1,80	132,10	3,64	299,7466	0,2910	s_q	0,321872808
2,00	125,40	3,51	284,1184	0,2758	R_{xy}	0,999894912
2,20	120,80	3,42	269,1218	0,2613		
2,40	115,40	3,31	254,7759	0,2474		
2,60	108,60	2,27	241,0911	0,2341		
2,80	102,90	2,16	228,0698	0,2214		
3,00	97,40	2,05	215,7077	0,2094		
3,20	91,90	1,94	203,9945	0,1981		
3,40	86,90	1,84	192,9152	0,1873		
3,60	82,50	1,75	182,4510	0,1771		
3,80	77,80	1,66	172,5803	0,1676		
4,00	73,70	1,57	163,2791	0,1585		
4,20	70,00	1,50	154,5223	0,1500		
4,40	66,40	1,43	146,2836	0,1420		
4,60	62,80	1,36	138,5365	0,1345		
4,80	59,50	1,29	131,2547	0,1274		
5,00	56,60	1,23	124,4119	0,1208		
5,20	53,60	1,17	117,9828	0,1145		
5,40	50,90	1,12	111,9425	0,1087		
5,60	48,40	1,07	106,2675	0,1032		
5,80	46,00	1,02	100,9349	0,0980		
6,00	43,80	0,98	95,9232	0,0931		
6,20	41,60	0,93	91,2119	0,0886		
6,40	39,70	0,89	86,7817	0,0843		
6,60	37,80	0,86	82,6143	0,0802		
6,80	36,00	0,82	78,6925	0,0764		
7,00	34,40	0,79	75,0005	0,0728		
7,20	32,80	0,76	71,5231	0,0694		
7,40	31,40	0,73	68,2463	0,0663		
7,60	30,00	0,70	65,1569	0,0633		
7,80	28,70	0,67	62,2428	0,0604		
8,00	27,40	0,65	59,4926	0,0578		
8,20	26,30	0,63	56,8956	0,0552		
8,40	25,20	0,60	54,4420	0,0529		
8,60	24,10	0,58	52,1225	0,0506		
8,80	23,10	0,56	49,9286	0,0485		
9,00	22,20	0,54	47,8524	0,0465		
9,20	21,30	0,53	45,8864	0,0445		
9,40	20,40	0,51	44,0236	0,0427		

9,60	19,60	0,49	42,2578	0,0410
9,80	18,90	0,48	40,5829	0,0394
10,00	18,10	0,46	38,9934	0,0379
10,50	16,40	0,43	35,3598	0,0343
11,00	14,90	0,40	32,1565	0,0312
11,50	13,60	0,37	29,3231	0,0285
12,00	12,40	0,35	26,8088	0,0260
12,50	11,50	0,33	24,5708	0,0239
13,00	10,60	0,31	22,5728	0,0219
13,50	9,70	0,29	20,7839	0,0202
14,00	8,50	0,27	19,1778	0,0186
14,50	7,90	0,26	17,7320	0,0172
15,00	7,40	0,25	16,4271	0,0159



11 Naměřené hodnoty feritového magnetu tvaru válce FMA-A \varnothing 20 \times 5 mm / F35

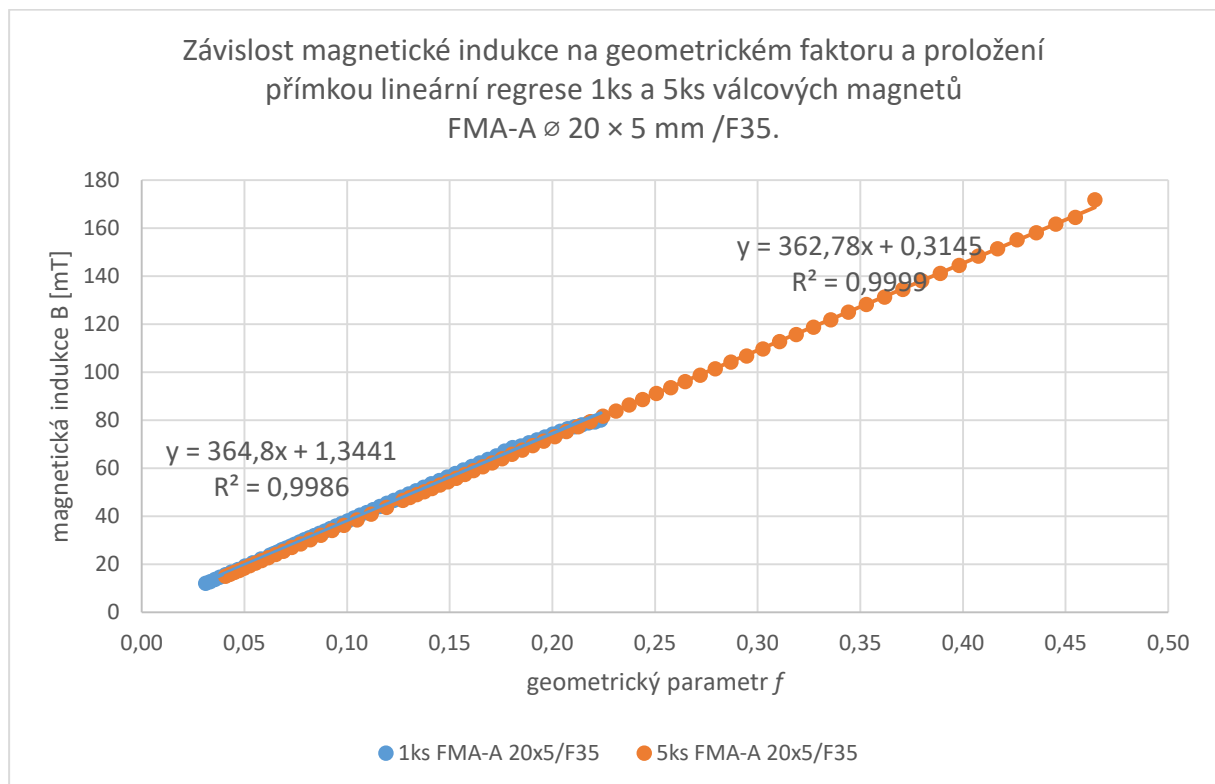
Válec FMA-A \varnothing 20 \times 5 mm / F35			Teoretický výpočet		Lineární regrese	
			Délka D [mm]	5		
			Poloměr R [mm]	10		
			Br [mT]	400		
z [mm]	B [mT]	σ_B [mT]	B [mT]	Geom. Faktor		
0,00	80,10	2,60	89,4427	0,2236	364,8048752	1,344086678
0,20	79,40	2,59	88,2713	0,2207	1,751187193	0,233231033
0,40	78,90	2,58	87,0362	0,2176	0,998642294	0,78168888
0,60	78,20	2,56	85,7422	0,2144		
0,80	77,40	2,55	84,3946	0,2110	Stanovení chyby	
1,00	76,50	2,53	82,9984	0,2075	počet měření	60
1,20	75,50	2,51	81,5589	0,2039	pravděpodob.	0,95
1,40	74,20	2,48	80,0812	0,2002	Student. souč.	2,001717484
1,60	73,10	2,46	78,5703	0,1964	s_k	3,505382021
1,80	71,90	2,44	77,0314	0,1926	s_q	0,466862637
2,00	70,60	2,41	75,4692	0,1887	R_{xy}	0,999320916
2,20	69,30	2,39	73,8886	0,1847		
2,40	68,60	2,37	72,2940	0,1807		
2,60	67,20	1,44	70,6899	0,1767		
2,80	65,20	1,40	69,0804	0,1727		
3,00	63,70	1,37	67,4694	0,1687		
3,20	62,30	1,35	65,8608	0,1647		
3,40	60,80	1,32	64,2579	0,1606		
3,60	59,30	1,29	62,6640	0,1567		
3,80	57,80	1,26	61,0820	0,1527		
4,00	56,40	1,23	59,5148	0,1488		
4,20	54,90	1,20	57,9648	0,1449		
4,40	53,60	1,17	56,4343	0,1411		
4,60	52,10	1,14	54,9252	0,1373		
4,80	50,60	1,11	53,4395	0,1336		
5,00	49,30	1,09	51,9786	0,1299		
5,20	48,00	1,06	50,5440	0,1264		
5,40	46,70	1,03	49,1368	0,1228		
5,60	45,40	1,01	47,7581	0,1194		
5,80	44,10	0,98	46,4085	0,1160		
6,00	42,80	0,96	45,0889	0,1127		
6,20	41,60	0,93	43,7996	0,1095		
6,40	40,50	0,91	42,5411	0,1064		
6,60	39,30	0,89	41,3136	0,1033		
6,80	38,10	0,86	40,1171	0,1003		
7,00	37,00	0,84	38,9518	0,0974		
7,20	36,00	0,82	37,8175	0,0945		
7,40	34,90	0,80	36,7140	0,0918		
7,60	33,90	0,78	35,6411	0,0891		
7,80	32,90	0,76	34,5985	0,0865		
8,00	32,00	0,74	33,5858	0,0840		
8,20	31,10	0,72	32,6025	0,0815		
8,40	30,20	0,70	31,6482	0,0791		
8,60	29,30	0,69	30,7223	0,0768		
8,80	28,40	0,67	29,8244	0,0746		
9,00	27,60	0,65	28,9537	0,0724		
9,20	26,80	0,64	28,1098	0,0703		
9,40	26,10	0,62	27,2920	0,0682		
9,60	25,20	0,60	26,4996	0,0662		
9,80	24,50	0,59	25,7321	0,0643		
10,00	23,80	0,58	24,9887	0,0625		

10,50	22,20	0,54	23,2317	0,0581
11,00	20,70	0,51	21,6116	0,0540
11,50	19,30	0,49	20,1185	0,0503
12,00	17,90	0,46	18,7426	0,0469
12,50	16,80	0,44	17,4749	0,0437
13,00	15,70	0,41	16,3067	0,0408
13,50	14,70	0,39	15,2299	0,0381
14,00	13,70	0,37	14,2370	0,0356
14,50	12,80	0,36	13,3209	0,0333
15,00	12,10	0,34	12,4754	0,0312

12 Naměřené hodnoty 5 kusů feritových magnetů tvaru válce FMA-A \varnothing 20 × 5 mm /F35.

5x Válec FMA-A \varnothing 20 × 5 mm /F35			Teoretický výpočet		Lineární regrese	
			Délka D [mm]	25		
			Poloměr R [mm]	10		
			Br [mT]	400		
z [mm]	B [mT]	σ_B [mT]	B [mT]	Geom.		
0,00	171,90	4,44	185,6953	0,4642	362,7840	0,314479281
0,20	164,60	4,29	181,8989	0,4547	0,401885	0,098617428
0,40	161,80	4,24	178,1032	0,4453	0,999915	0,417508292
0,60	158,20	4,16	174,3130	0,4358		
0,80	155,20	4,10	170,5332	0,4263	Stanovení chyby	
1,00	151,50	4,03	166,7684	0,4169	počet	70
1,20	148,40	3,97	163,0233	0,4076	pravděpo	0,95
1,40	144,50	3,89	159,3023	0,3983	Student.	1,995468931
1,60	141,20	3,82	155,6098	0,3890	s_k	0,801949793
1,80	138,10	3,76	151,9499	0,3799	s_q	0,196788014
2,00	134,60	3,69	148,3265	0,3708	R_{xy}	0,999957665
2,20	131,40	3,63	144,7434	0,3619		
2,40	128,30	3,57	141,2039	0,3530		
2,60	125,10	2,60	137,7114	0,3443		
2,80	121,90	2,54	134,2688	0,3357		
3,00	118,80	2,48	130,8788	0,3272		
3,20	115,80	2,42	127,5440	0,3189		
3,40	112,80	2,36	124,2665	0,3107		
3,60	109,80	2,30	121,0484	0,3026		
3,80	106,80	2,24	117,8912	0,2947		
4,00	104,30	2,19	114,7965	0,2870		
4,20	101,50	2,13	111,7654	0,2794		
4,40	98,80	2,08	108,7990	0,2720		
4,60	96,10	2,02	105,8979	0,2647		
4,80	93,60	1,97	103,0628	0,2577		
5,00	91,20	1,92	100,2939	0,2507		
5,20	88,70	1,87	97,5915	0,2440		
5,40	86,40	1,83	94,9554	0,2374		
5,60	83,90	1,78	92,3854	0,2310		
5,80	81,70	1,73	89,8813	0,2247		
6,00	79,50	1,69	87,4426	0,2186		
6,20	77,30	1,65	85,0685	0,2127		
6,40	75,30	1,61	82,7585	0,2069		
6,60	73,20	1,56	80,5116	0,2013		
6,80	71,30	1,53	78,3269	0,1958		
7,00	69,40	1,49	76,2035	0,1905		
7,20	67,60	1,45	74,1403	0,1854		
7,40	65,90	1,42	72,1361	0,1803		
7,60	64,00	1,38	70,1898	0,1755		
7,80	62,30	1,35	68,3001	0,1708		

8,00	60,70	1,31	66,4659	0,1662
8,20	59,00	1,28	64,6857	0,1617
8,40	57,50	1,25	62,9584	0,1574
8,60	55,90	1,22	61,2826	0,1532
8,80	54,40	1,19	59,6569	0,1491
9,00	53,00	1,16	58,0802	0,1452
9,20	51,60	1,13	56,5509	0,1414
9,40	50,20	1,10	55,0679	0,1377
9,60	49,00	1,08	53,6299	0,1341
9,80	47,80	1,06	52,2355	0,1306
10,00	46,60	1,03	50,8834	0,1272
10,50	43,70	0,97	47,6805	0,1192
11,00	40,90	0,92	44,7156	0,1118
11,50	38,50	0,87	41,9706	0,1049
12,00	36,20	0,82	39,4284	0,0986
12,50	34,10	0,78	37,0732	0,0927
13,00	32,10	0,74	34,8901	0,0872
13,50	30,30	0,71	32,8653	0,0822
14,00	28,50	0,67	30,9861	0,0775
14,50	27,00	0,64	29,2407	0,0731
15,00	25,50	0,61	27,6184	0,0690
15,50	24,10	0,58	26,1094	0,0653
16,00	22,80	0,56	24,7044	0,0618
16,50	21,60	0,53	23,3953	0,0585
17,00	20,50	0,51	22,1744	0,0554
17,50	19,50	0,49	21,0348	0,0526
18,00	18,40	0,47	19,9702	0,0499
18,50	17,50	0,45	18,9746	0,0474
19,00	16,60	0,43	18,0429	0,0451
19,50	15,90	0,42	17,1702	0,0429
20,00	15,10	0,40	16,3520	0,0409



13 Naměřené hodnoty neodymového magnetu tvaru válce NM-A \varnothing 20 \times 5 mm /N42.

Válec NM-A \varnothing 20 \times 5 mm /N42			Teoretický výpočet		Lineární regrese	
			Délka D [mm]	5		
			Poloměr R [mm]	10		
			Br [mT]	1290		
z [mm]	B [mT]	σ_B [mT]	B [mT]	Geom. Faktor	Lineární regrese	
0	289	6,7800	288,4527691	0,2236	1269,025405	-7,840340288
0,2	280	6,6000	284,6750944	0,2207	7,688250034	1,023955923
0,4	275	6,5000	280,6916653	0,2176	0,997839139	3,431854449
0,6	269	6,3800	276,5186454	0,2144	Stanovení chyby	
0,8	264	6,2800	272,1724995	0,2110		
1	258	6,1600	267,6698635	0,2075	počet měření	60
1,2	253	6,0600	263,0274191	0,2039	pravděpodob.	0,95
1,4	248	5,9600	258,2617745	0,2002	Student. souč.	2,001717484
1,6	241	5,8200	253,3893512	0,1964	s_k	15,38970451
1,8	236	5,7200	248,4262799	0,1926	s_q	2,049670474
2	231	5,6200	243,388305	0,1887	R_{xy}	0,998918985
2,2	226	5,5200	238,2906983	0,1847		
2,4	220	5,4000	233,1481841	0,1807		
2,6	214	4,3800	227,9748732	0,1767		
2,8	209	4,2800	222,7842082	0,1727		
3	203	4,1600	217,5889195	0,1687		
3,2	197,8	4,0560	212,4009904	0,1647		
3,4	192,7	3,9540	207,2316328	0,1606		
3,6	187,3	3,8460	202,0912714	0,1567		
3,8	182,3	3,7460	196,9895366	0,1527		
4	177	3,6400	191,9352656	0,1488		
4,2	172,5	3,5500	186,93651	0,1449		
4,4	167,5	3,4500	182,0005495	0,1411		
4,6	162,6	3,3520	177,1339119	0,1373		
4,8	157,9	3,2580	172,342397	0,1336		
5	153,3	3,1660	167,6311048	0,1299		
5,2	149,1	3,0820	163,0044661	0,1264		
5,4	144,8	2,9960	158,4662769	0,1228		
5,6	140,4	2,9080	154,0197329	0,1194		
5,8	136,3	2,8260	149,6674668	0,1160		
6	132,5	2,7500	145,4115851	0,1127		
6,2	128,5	2,6700	141,2537053	0,1095		
6,4	124,7	2,5940	137,1949936	0,1064		
6,6	121	2,5200	133,2362009	0,1033		
6,8	117,5	2,4500	129,3776986	0,1003		
7	113,9	2,3780	125,6195132	0,0974		
7,2	110,8	2,3160	121,9613595	0,0945		
7,4	107,3	2,2460	118,402672	0,0918		
7,6	104	2,1800	114,9426349	0,0891		
7,8	101,1	2,1220	111,5802109	0,0865		
8	98,3	2,0660	108,3141673	0,0840		
8,2	95,2	2,0040	105,1431012	0,0815		
8,4	92,2	1,9440	102,0654623	0,0791		
8,6	89,6	1,8920	99,07957476	0,0768		
8,8	86,9	1,8380	96,18365639	0,0746		
9	84,3	1,7860	93,37583703	0,0724		
9,2	81,7	1,7340	90,65417503	0,0703		
9,4	79,3	1,6860	88,0166722	0,0682		
9,6	77,1	1,6420	85,46128749	0,0662		
9,8	74,8	1,5960	82,98594918	0,0643		
10	72,8	1,5560	80,58856598	0,0625		
10,5	67,7	1,4540	74,92237259	0,0581		

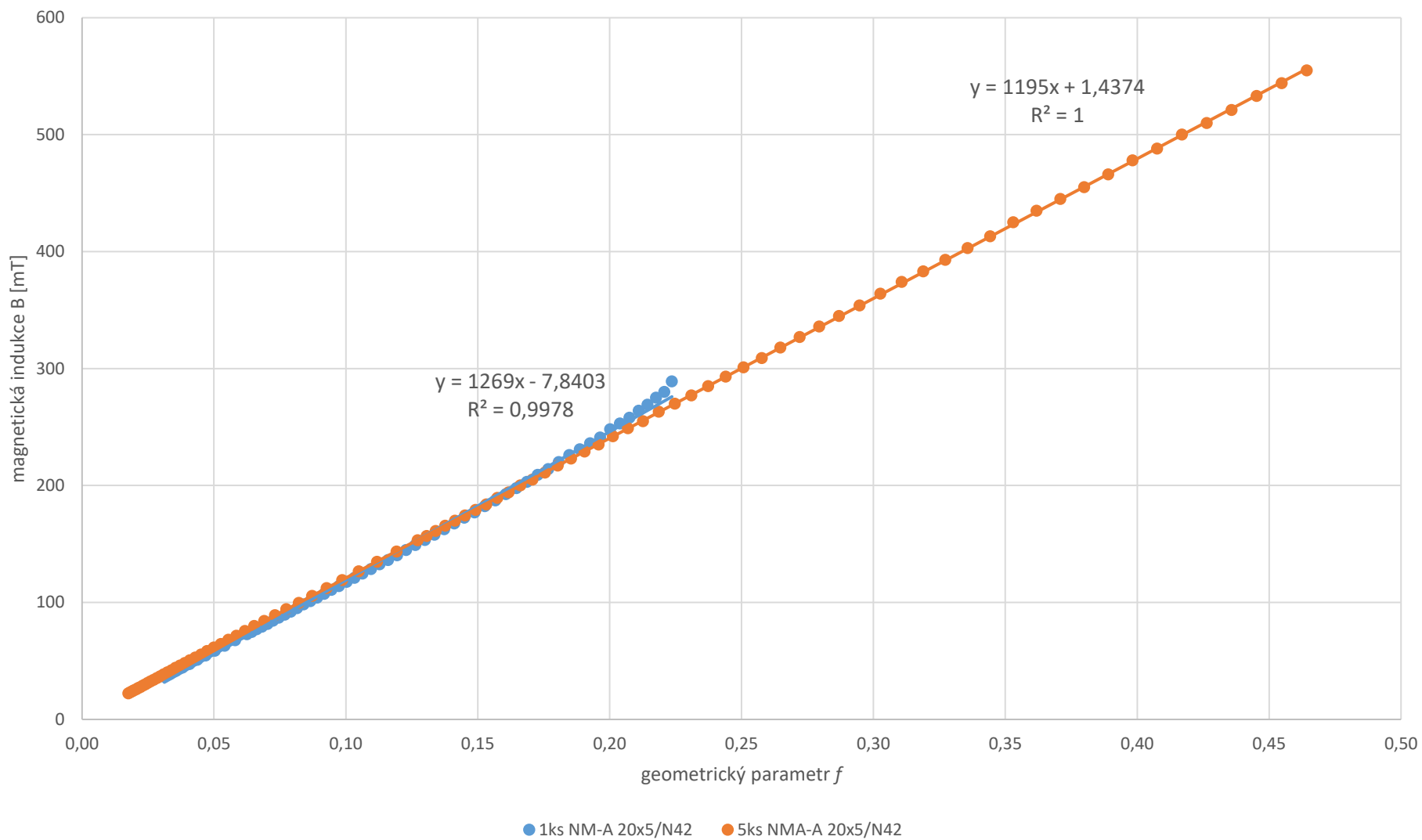
11	62,9	1,3580	69,69755874	0,0540
11,5	58,6	1,2720	64,88203956	0,0503
12	54,5	1,1900	60,44484344	0,0469
12,5	50,9	1,1180	56,35644458	0,0437
13	47,4	1,0480	52,58897013	0,0408
13,5	44,4	0,9880	49,11631155	0,0381
14	41,5	0,9300	45,91416451	0,0356
14,5	38,8	0,8760	42,9600166	0,0333
15	36,4	0,8280	40,23309835	0,0312

14 Naměřené hodnoty 5 kusů neodymových magnetů tvaru válce NM-A $\varnothing 20 \times 5$ mm /N42

5ks Válec NM-A $\varnothing 20 \times 5$ mm /N42			Teoretický výpočet		Lineární regrese	
			Délka D [mm]	25		
			Poloměr R [mm]	10		
			Remanentní magnetizace Br [mT]	1290		
z [mm]	B [mT]	σ_B [mT]	B [mT]	Geom.	Lineární regrese	
0	555	12,1000	598,8674656	0,4642	1194,981107	1,43739021
0,2	544	11,8800	586,6240879	0,4547	0,375700198	0,08157485
0,4	533	11,6600	574,3828504	0,4453	0,999991203	0,47787679
0,6	521	11,4200	562,1594629	0,4358	Stanovení chyby	
0,8	510	11,2000	549,9694408	0,4263		
1	500	11,0000	537,8280172	0,4169	počet měření	90
1,2	488	10,7600	525,7500581	0,4076	pravděpodob.	0,95
1,4	478	10,5600	513,7499825	0,3983	Student.	1,98728986
1,6	466	10,3200	501,8416891	0,3890	s_k	0,74662519
1,8	455	10,1000	490,0384885	0,3799	s_q	0,16211288
2	445	9,9000	478,3530435	0,3708	R_{xy}	0,99999560
2,2	435	9,7000	466,7973171	0,3619		
2,4	425	9,5000	455,3825287	0,3530		
2,6	413	8,3600	444,1191185	0,3443		
2,8	403	8,1600	433,0167212	0,3357		
3	393	7,9600	422,0841468	0,3272		
3,2	383	7,7600	411,3293707	0,3189		
3,4	374	7,5800	400,7595308	0,3107		
3,6	364	7,3800	390,3809321	0,3026		
3,8	354	7,1800	380,1990578	0,2947		
4	345	7,0000	370,2185869	0,2870		
4,2	336	6,8200	360,4434165	0,2794		
4,4	327	6,6400	350,8766893	0,2720		
4,6	318	6,4600	341,520825	0,2647		
4,8	309	6,2800	332,3775547	0,2577		
5	301	6,1200	323,4479581	0,2507		
5,2	293	5,9600	314,7325029	0,2440		
5,4	285	5,8000	306,2310845	0,2374		
5,6	277	5,6400	297,9430681	0,2310		
5,8	270	5,5000	289,8673293	0,2247		
6	263	5,3600	282,0022962	0,2186		
6,2	255	5,2000	274,3459894	0,2127		
6,4	249	5,0800	266,896062	0,2069		
6,6	242	4,9400	259,6498381	0,2013		
6,8	235	4,8000	252,6043502	0,1958		
7	229	4,6800	245,7563737	0,1905		
7,2	223	4,5600	239,1024617	0,1854		
7,4	217	4,4400	232,6389757	0,1803		
7,6	211	4,3200	226,3621161	0,1755		
7,8	205	4,2000	220,2679496	0,1708		
8	200	4,1000	214,3524352	0,1662		

8,2	194,2	3,9840	208,6114476	0,1617
8,4	189,3	3,8860	203,0407998	0,1574
8,6	183,9	3,7780	197,6362622	0,1532
8,8	179,1	3,6820	192,3935815	0,1491
9	174,3	3,5860	187,3084966	0,1452
9,2	169,9	3,4980	182,3767537	0,1414
9,4	165,5	3,4100	177,5941193	0,1377
9,6	161,1	3,3220	172,9563917	0,1341
9,8	156,8	3,2360	168,459412	0,1306
10	153,1	3,1620	164,0990724	0,1272
10,5	143,6	2,9720	153,7696195	0,1192
11	134,8	2,7960	144,2077044	0,1118
11,5	126,6	2,6320	135,3550332	0,1049
12	119,2	2,4840	127,1566632	0,0986
12,5	112,2	2,3440	119,561154	0,0927
13	105,6	2,2120	112,5206036	0,0872
13,5	99,7	2,0940	105,9905987	0,0822
14	94,2	1,9840	99,93010467	0,0775
14,5	89,1	1,8820	94,30131466	0,0731
15	84,2	1,7840	89,06947275	0,0690
15,5	79,8	1,6960	84,20268296	0,0653
16	75,5	1,6100	79,67171243	0,0618
16,5	71,6	1,5320	75,44979501	0,0585
17	68	1,4600	71,5124397	0,0554
17,5	64,5	1,3900	67,8372469	0,0526
18	61,4	1,3280	64,40373434	0,0499
18,5	58,4	1,2680	61,19317369	0,0474
19	55,5	1,2100	58,18843855	0,0451
19,5	52,9	1,1580	55,37386372	0,0429
20	50,5	1,1100	52,73511562	0,0409
20,5	48,1	1,0620	50,25907338	0,0390
21	46	1,0200	47,93372009	0,0372
21,5	44	0,9800	45,74804362	0,0355
22	42	0,9400	43,69194623	0,0339
22,5	40,2	0,9040	41,75616246	0,0324
23	38,5	0,8700	39,93218445	0,0310
23,5	36,9	0,8380	38,21219428	0,0296
24	35,4	0,8080	36,58900253	0,0284
24,5	33,9	0,7780	35,05599259	0,0272
25	32,5	0,7500	33,6070702	0,0261
25,5	31,3	0,7260	32,2366177	0,0250
26	30	0,7000	30,93945254	0,0240
26,5	28,9	0,6780	29,71078972	0,0230
27	27,7	0,6540	28,54620764	0,0221
27,5	26,8	0,6360	27,44161719	0,0213
28	25,7	0,6140	26,39323369	0,0205
28,5	24,8	0,5960	25,39755133	0,0197
29	23,9	0,5780	24,45132007	0,0190
29,5	23,1	0,5620	23,5515245	0,0183
30	22,2	0,5440	22,69536477	0,0176

Závislost magnetické indukce na geometrickém faktoru a proložení přímkou lineární regrese 1ks a 5ks válcových magnetů NM-A $\varnothing 20 \times 5$ mm /N42.



15 Naměřené hodnoty samarium kobaltového magnetu tvaru válce SM-A \varnothing 20 × 5 mm /YXG28

Válec SM-A \varnothing 20 × 5 mm /YXG28			Teoretický výpočet		Lineární regrese	
			Délka D [mm]	5		
			Poloměr R [mm]	10		
			Br [mT]	1030		
z [mm]	B [mT]	σ_B [mT]	B [mT]	Geom. Faktor		
0	136,4	3,7280	230,3150017	0,2236	607,1664666	-2,190299371
0,2	133,3	3,6660	227,2987188	0,2207	1,979709021	0,263666604
0,4	130,9	3,6180	224,1181513	0,2176	0,999373145	0,883695663
0,6	129,5	3,5900	220,7862053	0,2144		
0,8	127,3	3,5460	217,3160268	0,2110	Stanovení chyby	
1	124,9	3,4980	213,7208987	0,2075	počet měření	60
1,2	122,4	3,4480	210,0141408	0,2039	pravděpodob.	0,95
1,4	120	3,4000	206,2090137	0,2002	Student. souč.	2,001717484
1,6	117,5	3,3500	202,3186292	0,1964	s_k	3,962818161
1,8	115	3,3000	198,3558669	0,1926	s_q	0,527786051
2	112,3	3,2460	194,3332978	0,1887	R_{xy}	0,999686524
2,2	109,7	3,1940	190,2631157	0,1847		
2,4	107,4	3,1480	186,1570773	0,1807		
2,6	104,5	2,1900	182,0264491	0,1767		
2,8	102	2,1400	177,8819647	0,1727		
3	99,5	2,0900	173,7337884	0,1687		
3,2	97	2,0400	169,5914885	0,1647		
3,4	94,6	1,9920	165,4640169	0,1606		
3,6	91,8	1,9360	161,3596973	0,1567		
3,8	89,6	1,8920	157,2862191	0,1527		
4	87,3	1,8460	153,2506385	0,1488		
4,2	84,7	1,7940	149,2593839	0,1449		
4,4	82,5	1,7500	145,3182682	0,1411		
4,6	80,1	1,7020	141,4325033	0,1373		
4,8	78	1,6600	137,6067201	0,1336		
5	75,8	1,6160	133,8449906	0,1299		
5,2	73,5	1,5700	130,1508528	0,1264		
5,4	71,5	1,5300	126,5273373	0,1228		
5,6	69,4	1,4880	122,976996	0,1194		
5,8	67,4	1,4480	119,5019309	0,1160		
6	65,4	1,4080	116,1038238	0,1127		
6,2	63,4	1,3680	112,7839663	0,1095		
6,4	61,8	1,3360	109,5432895	0,1064		
6,6	59,7	1,2940	106,3823929	0,1033		
6,8	58	1,2600	103,3015733	0,1003		
7	56,3	1,2260	100,3008516	0,0974		
7,2	54,8	1,1960	97,38000024	0,0945		
7,4	53,1	1,1620	94,53856754	0,0918		
7,6	51,5	1,1300	91,77590229	0,0891		
7,8	50	1,1000	89,09117614	0,0865		
8	48,7	1,0740	86,4834049	0,0840		
8,2	47,1	1,0420	83,95146837	0,0815		
8,4	45,8	1,0160	81,49412883	0,0791		
8,6	44,4	0,9880	79,11004807	0,0768		
8,8	43	0,9600	76,79780316	0,0746		
9	41,8	0,9360	74,55590089	0,0724		
9,2	40,6	0,9120	72,38279091	0,0703		
9,4	39,4	0,8880	70,27687781	0,0682		
9,6	38,2	0,8640	68,23653187	0,0662		
9,8	37,1	0,8420	66,26009896	0,0643		
10	36	0,8200	64,34590927	0,0625		

10,5	33,6	0,7720	59,82173935	0,0581
11	31,4	0,7280	55,64998876	0,0540
11,5	29,1	0,6820	51,80503934	0,0503
12	27,1	0,6420	48,26216181	0,0469
12,5	25,3	0,6060	44,99778133	0,0437
13	23,6	0,5720	41,98964281	0,0408
13,5	22	0,5400	39,21689992	0,0381
14	20,6	0,5120	36,66014686	0,0356
14,5	19,3	0,4860	34,3014086	0,0333
15	18	0,4600	32,12410178	0,0312

