

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

**Testovací pracoviště pro analýzu  
vlastností permanentních magnetů  
pro elektrické pohony**

Mgr. Richard Lacko

Bakalářská práce  
2011

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Mgr. Richard LACKO**  
Osobní číslo: **D08392**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení v dopravě**  
Název tématu: **Testovací pracoviště pro analýzu vlastností permanentních magnetů pro elektrické pohony**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

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

1. Rozbor vlastností permanentních magnetů pro elektrické pohony
2. Rozbor degračních vlivů ovlivňujících vlastnosti permanentních magnetů
3. Návrh a rozbor metodik měření magnetických vlastností materiálů
4. Návrh zkušebního pracoviště pro testování magnetických vlastností permanentních magnetů
5. Ověření vlastností navrženého pracoviště pro testování magnetických vlastností permanentních magnetů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**HORÁK, Zdeněk; KRUPKA, František; ŠINDELÁŘ, Václav. Technická fyzika. 3. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. 1434 s.**

**GIERAS, Jacek, F.; WING Mitchell. Permanent Magnet Motor Technology, Design And Applications. Secon Edition. New York: Marcel Dekker, 2002. ISBN 0-8247-0739-7**

**BEZOUŠEK, Pavel; SCHEJBAL, Bohumil. Elektrotechnika. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2002. 173 s. ISBN 80-7194-409-2**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Ondřej Černý, Ph.D.**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **7. ledna 2011**

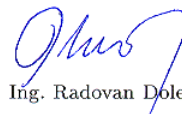
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2011**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 10. března 2011

## Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 25. 5. 2011

Mgr. Richard Lacko v. r.

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Černému, Ph.D. za zájem, se kterým sledoval tuto práci, a za cenné připomínky a rady, které mi poskytl. Poděkování patří též všem dalším pracovníkům Katedry elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě Dopravní fakulty Jana Pernera v Pardubicích za vytvoření kvalitních studijních podmínek.

## Anotace

LACKO, Richard. *Testovací pracoviště pro analýzu vlastností permanentních magnetů pro elektrické pohony*. Pardubice, 2011. 56 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.

Bakalářská práce se zabývá problematikou měření magnetických vlastností permanentních magnetů. První kapitola stručným způsobem rekapituluje základní fyzikální poznatky a veličiny důležité pro popis magnetického pole, a dále se zabývá základními vlastnostmi permanentních magnetů ze vzácných zemin. Druhá kapitola se věnuje degradačním vlivům, které mohou ovlivnit magnetické vlastnosti permanentních magnetů, pozornost je opět věnována pouze magnetům ze vzácných zemin. Třetí kapitola se věnuje možné metodice měření permanentních magnetů a přináší teoretický návrh možného měření. Na základě teoretického návrhu z třetí kapitoly pak kapitola čtvrtá řeší konkrétní návrh měřícího pracoviště, pátá kapitola prakticky ověřuje navržený způsob měření.

**Klíčová slova:** permanentní magnet, magnetický obvod, demagnetizační křivka, magnetická měření.

## Annotation

LACKO, Richard. *Testing Workplace for Analyzing the Properties of Permanent Magnets for Electric Motors*. Pardubice, 2011. 56 pp. Bachelor Thesis. University of Pardubice, Jan Perner Transport Faculty.

This bachelor thesis deals with the problems of measuring the magnetic properties of permanent magnets. The first chapter shortly recapitulates basic physical knowledge and variables important for the description of the magnetic field and deals with the basic properties of permanent magnets from rare earths. The second chapter devotes to the degradation influences that can influence magnetic properties of permanent magnets, attention is devoted only to the permanent magnets from rare earths. The third chapter devotes to the methodology of measuring the permanent magnets and produces the theoretical project of the possible measuring. The fourth chapter solves concrete proposal of the measuring workplace upon the theoretical project from the third chapter, the fifth chapter practically verifies proposed way of resolution the measuring consequently.

**Keywords:** permanent magnet, magnetic field, magnetic circuit, demagnetization curve, magnetic measuring.

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Rozbor vlastností permanentních magnetů pro elektrické pohony</b>	<b>13</b>
1.1 Magnetické pole v látce . . . . .	13
1.1.1 Fyzikální popis magnetického pole . . . . .	13
1.1.2 Reakce materiálu na magnetické pole . . . . .	14
1.1.3 Rozdělení materiálů dle magnetických vlastností . . . . .	15
1.2 Demagnetizační křivka . . . . .	16
1.2.1 Křivka prvotní magnetizace . . . . .	16
1.2.2 Hysterezní křivka . . . . .	16
1.2.3 Maximální energetický součin, porovnání demagnetizačních křivek permanentních magnetů . . . . .	17
1.2.4 Aproximace demagnetizační křivky . . . . .	19
1.3 Permanentní magnety ze vzácných zemin . . . . .	19
1.3.1 Samarium-kobaltové magnety (SmCo) . . . . .	20
1.3.2 Neodymové magnety (NdFeB) . . . . .	20
1.4 Přednostní osa orientace permanentního magnetu . . . . .	21
<b>2 Rozbor degradačních vlivů ovlivňujících vlastnosti permanentních mag- netů</b>	<b>22</b>
2.1 Chemická odolnost, koroze . . . . .	22
2.1.1 Odolnost permanentních magnetů SmCo . . . . .	22
2.1.2 Odolnost permanentních magnetů NdFeB . . . . .	22
2.1.3 Eliminace korozivních a oxidačních dějů u magnetů NdFeB. . . . .	23
2.2 Teplotní vlivy . . . . .	24
2.2.1 Curieova teplota . . . . .	24
2.2.2 Teplotní koeficienty . . . . .	25
2.3 Mechanická odolnost . . . . .	26
<b>3 Návrh a rozbor metodik měření magnetických vlastností materiálu</b>	<b>27</b>
3.1 O měřících metodách všeobecně . . . . .	27



3.1.1	Měření vlastností materiálu . . . . .	27
3.1.2	Měření vlastností výrobků . . . . .	27
3.1.3	Faktory ovlivňující přesnost měření . . . . .	28
3.2	Návrh metodiky měření vlastností permanentních magnetů . . . . .	29
3.2.1	Magnetický obvod s permanentním magnetem . . . . .	29
3.2.2	Magnetický obvod s permanentním magnetem a cívkou s proudem .	30
3.3	Hallova sonda . . . . .	32
3.3.1	Princip Hallova jevu . . . . .	32
3.3.2	Hallova sonda A1302 a její kalibrace . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Návrh zkušebního pracoviště pro testování magnetických vlastností per-</b>	
	<b>manentních magnetů</b>	<b>35</b>
4.1	Vzorek permanentního magnetu . . . . .	36
4.1.1	Parametry vzorku permanentního magnetu NdFeB . . . . .	36
4.1.2	Kontrolní vzorek . . . . .	36
4.2	Pólové nástavce s cívkami . . . . .	37
4.2.1	Mechanické provedení pólových nástavců . . . . .	38
4.2.2	Cívky pólových nástavců . . . . .	39
4.2.3	Magnetické vlastnosti pólových nástavců . . . . .	40
4.2.4	Měření ve vzduchové mezeře . . . . .	41
4.2.5	Hallova sonda v magnetickém obvodu . . . . .	42
4.3	Měření vlastností permanentních magnetů . . . . .	43
4.3.1	Postup a cíl měření . . . . .	43
4.3.2	Měření v dlouhodobém horizontu . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Ověření vlastností navrženého pracoviště pro testování magnetických</b>	
	<b>vlastností permanentních magnetů</b>	<b>45</b>
5.1	Příprava měření . . . . .	45
5.1.1	Přístrojové vybavení . . . . .	45
5.1.2	Kontrola před měřením . . . . .	46
5.2	Realizace měření . . . . .	47
5.2.1	Měření s NdFeB magnetem . . . . .	47

5.2.2	Měření s feritovým magnetem . . . . .	50
5.3	Problémy a komplikace během měření . . . . .	51
	<b>Závěr</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>54</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>56</b>

# Úvod

Zdokonalení vlastností permanentních magnetů ze vzácných zemin typů SmCo a NdFeB znamenalo jistým způsobem převratnou událost v problematice konstruování elektromotorů. Tyto magnetické materiály, dosahující remanentní magnetické indukce kolem 1 T a koercitivní intenzity magnetického pole až  $900 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ , umožnily konstrukci elektromotorů s permanentními magnety. Tyto motory se začaly uplatňovat nejdříve v malých průmyslových aplikacích, postupem času však tato technologie pronikla i do oblasti pohonů dopravních prostředků, a to zejména jako motory synchronní.

První dopravní prostředky, u kterých se začaly aplikovat synchronní motory s permanentními magnety, byla silniční vozidla, postupem doby však došlo k rozšíření i do oblasti vozidel kolejových. V současnosti je možné konstruovat motory o výkonech v řádu stovek kilowattů, a to jak konstrukce s vnitřním rotorem (častější konstrukce), tak s rotorem vnějším. Elektromotory s permanentními magnety poskytují celou řadu výhod, mají však i jisté slabiny. Jednou z nich je nemožnost řídit velikost magnetického pole, které permanentní magnety produkují.

Je tedy zřejmé, že celá koncepce elektromotorů předpokládá permanentní magnety produkující konstantní magnetické pole, které se s časem nemění. Bohužel, na magnetické vlastnosti permanentních magnetů ze vzácných zemin, které se v těchto aplikacích využívá, má vliv celá řada chemicko-fyzikálních vlivů. Ty mohou vlastnosti uvedených magnetik ovlivnit. Špatná technologie výroby může zapříčinit postupnou ztrátu magnetických vlastností, v extrémním případě dokonce s destruktivním účinkem na celý elektromotor.

Dalším vlivem, který může ovlivnit vlastnosti permanentních magnetů, je běžný provoz elektromotoru. V některých režimech provozu se pro řízení uplatňuje ovlivňování otáček odbuzováním, kdy proud tekoucí statorovým vinutím synchronního stroje vyvolává opačné magnetické pole, než které produkují permanentní magnety. I tento režim provozu by mohl v dlouhodobějším horizontu případně způsobovat ztrátu magnetických vlastností permanentních magnetů, a tím i zhoršení výkonových vlastností celého stroje.

Tato bakalářská práce si proto klade za cíl navrhnout jednoduchý způsob, kterým by bylo možné v dlouhodobém horizontu zkoumat změnu magnetických vlastností permanentních magnetů, které jsou či byly vystavovány běžným provozním zatížením v trakč-

ních elektromotorech, případně extrémním podmínkám, které mají vliv na jejich degradaci a ztrátu magnetických vlastností.

Celá práce by však nebyla kompletní, pokud by se omezila pouze na strohý teoretický návrh. Hlavním cílem je tedy nejenom tuto metodu teoreticky navrhnout, ale také zkonstruovat a vyzkoušet funkční model měřícího pracoviště. Tento model by se měl stát výzvou do budoucna k vytvoření skutečného pracoviště, které by bylo operativně použitelné v praxi.

# 1 Rozbor vlastností permanentních magnetů pro elektrické pohony

## 1.1 Magnetické pole v látce

Magnetické pole je fyzikální pole, které vzniká v okolí pohybujícího elektrického náboje (např. v okolí vodičů s elektrickým proudem) nebo je jeho zdrojem **permanentní magnet**. Permanentním magnetem rozumíme trvale nebo dočasně magneticky polarizované těleso. Původní teorie o vzniku magnetického pole se opírala zejména o Ampérovu domněnku, která předpokládala, že magnetické vlastnosti látek jsou způsobeny existencí elementárních proudů, které v látce existují. Tuto domněnku zpřesnil až objev elektronu a atomového jádra, které elektron obíhá. Elektron při svém oběhu vytváří proudovou smyčku, kterou lze popsat vztahem

$$\mathbf{m}_e = \mu_0 i \mathbf{S} = \mu_0 e v \mathbf{S}, \quad (1.1)$$

kde vektor  $\mathbf{m}_e$  je orbitální magnetický moment proudové smyčky, kterou tvoří elektron o náboji  $e$  pohybující se obvodovou rychlostí  $v$ . Tím vznikne elektrický proud o velikosti  $i$ . Vektor  $\mathbf{S}$  je kolmý na plochu o velikosti  $S$ , kterou pohybující se elektron vymezuje. Konstanta  $\mu_0$  je **permeabilita vakua**, její přibližná velikost je pro technické účely udávána hodnotou  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ . Mimo orbitálního magnetického momentu přispívá ke vzniku magnetického pole též spinový magnetický moment  $\mathbf{m}_s$  elektronu. Dohromady s momentem orbitálním tak dává výsledný magnetický moment<sup>1</sup>.

### 1.1.1 Fyzikální popis magnetického pole

Silové působení magnetického pole lze kvantitativně charakterizovat pomocí vektoru magnetické indukce  $\mathbf{B}$ . Ten charakterizuje magnetické pole vyvolané volnými elektrickými proudy  $I$  (proud vodivý, konvekční a posuvný), a dále proudy vázanými  $I_i$ . Mezi proudy vázané řadíme kromě proudů polarizačních také **proudy magnetizační**, které vznikají

---

<sup>1</sup>Celá problematika se však poněkud komplikuje ve víceelektronových atomech. Fyzikálně správný popis vzniku magnetického pole tak dává až kvantová teorie, a dále teorie relativity při řešení pohybu nabitě částice v Lorentzově transformaci souřadnic.

v okolí částic v látce. Tento vznik souvisí zejména s orbitálním a spinovým magnetickým momentem elektronů. Souvislost magnetické intenzity  $\mathbf{B}$  a obou typů proudů lze charakterizovat vztahem:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0(I - I_i), \quad (1.2)$$

kde  $d\mathbf{l}$  je element délky.

Dalším vektorem pro popis magnetického pole je vektor magnetické intenzity  $\mathbf{H}$ . Tento vektor však charakterizuje magnetické pole vyvolané pouze volnými elektrickými proudy. Pro tento vektor platí

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I. \quad (1.3)$$

Magnetické pole v látce lze schematizovat pomocí magnetických indukčních čar. Vzhledem k tomu, že magnetické pole je nezhřídlovým fyzikálním polem, jsou tyto čáry spojitě. Pro vektor magnetické indukce  $\mathbf{B}$  a plošný vektor  $d\mathbf{S}$ , jehož velikost  $dS$  představuje elementární plochu, kterou magnetické pole prochází, proto platí vztah

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0. \quad (1.4)$$

V případě magnetů se dle dohody místo výstupu magnetických indukčních čar označuje jako **severní magnetický pól (N)** a místo vstupu jako **jižní magnetický pól (S)**.

### 1.1.2 Reakce materiálu na magnetické pole

Představme si homogenní magnetické pole intenzity  $H$ . Před vložením vzorku do tohoto pole je velikost magnetické indukce  $B_0$ , po vložení se však změní na hodnotu  $B$ , a to díky příspěvku magnetické indukce  $B_i$ . Lze tedy psát

$$B = B_0 + B_i. \quad (1.5)$$

Příspěvek  $B_i$  je ve srovnání s  $B_0$  malý a platí

$$B_i = \chi_m B_0, \quad (1.6)$$

kde  $\chi_m$  je tzv. **magnetická susceptibilita**, vyjadřující schopnost látky tělesa magnetovat se ve vnější magnetickém poli o velikost  $B_0$ . Dosazením z (1.6) do (1.5) získáme vztah

$$B = B_0 + \chi_m B_0 = (1 + \chi_m) B_0 = \mu_r B_0, \quad (1.7)$$

kde  $\mu_r$  je **relativní permeabilita materiálu**, kterou je možné úpravou vztahu (1.7) zapsat jako poměr

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} = \frac{\mu}{\mu_0}, \quad (1.8)$$

kde  $\mu$  je **celková permeabilita**, kterou lze vyjádřit vztah mezi velikostí magnetické indukce  $B$  a intenzity magnetického pole  $H$

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu H. \quad (1.9)$$

Pro materiály permanentních magnetů je významná zejména **reverzibilní permeabilita**  $\mu_{\text{rev}}$ . Jedná se o permeabilitu pro malé vratné změny intenzity vnějšího magnetického pole ( $\Delta H \rightarrow 0$ ), které na magnet působí. Vratnou permeabilitu lze vyjádřit vztahem

$$\mu_{\text{rev}} = \mu_0 \mu_{\text{rrev}} = \left. \frac{\Delta B}{\Delta H} \right|_{\Delta H \rightarrow 0}, \quad (1.10)$$

kde  $\mu_{\text{rrev}}$  je relativní hodnota reverzibilní permeability.

### 1.1.3 Rozdělení materiálů dle magnetických vlastností

Dle chování látky působením vnějšího magnetického pole lze provést následující dělení dle vzájemného působení magnetických momentů v látce:

- **Diamagnetické látky**,  $\mu_r < 1$ , u kterých se orbitální a spinové magnetické momenty elektronů vzájemně ruší, výsledný magnetický moment je nulový. Vnější magnetické pole působící na látku způsobuje vznik precesního pohybu elektronů. Tento pohyb vytvoří nový magnetický moment, působící proti vnějšímu magnetickému poli o velikosti magnetické indukce  $B_0$ . Látka tak nepatrně zeslabuje magnetické pole, přírůstek magnetické indukce  $B_i$  je záporný.
- **Paramagnetické látky**,  $\mu_r > 1$ , u těchto látek je výsledný magnetický moment nenulový, ve vnějším magnetickém poli se magnetický moment orientuje do směru magnetické indukce  $B_0$ . Látka tak nepatrně zesiluje magnetické pole o přírůstek  $B_i$ .
- **Feromagnetické látky**,  $\mu_r \gg 1$ , u kterých jsou atomy schopny se díky značnému výslednému magnetickému momentu ve velkých skupinách (tzv. doménách) magneticky polarizovat. Vzájemná vazba v doménách je natolik silná, že vložením do

vnějšího magnetického pole stačí zorientovat pouze jediný atom a ostatní se již orientují spontánně. Látky tak značně zesilují magnetické pole o přírůstek magnetické indukce  $B_i$ . Zvláštními typy feromagnetický látek jsou:

- **antiferomagnetické látky**, jejichž atomy mají stejně velké a opačně orientované magnetické momenty,
- **ferimagnetické látky**, jejichž atomy mají nesejně velké a opačně orientované magnetické momenty. Jsou tak zvláštním případ antiferomagnetických látek.

## 1.2 Demagnetizační křivka

Pro další popis uvažujme pouze látky feromagnetické. Magnetické vlastnosti feromagnetických materiálů jsou silně závislé na působení vnějšího magnetického pole, charakterizovaného velikostí magnetické intenzity  $H$ . Velikost výsledné magnetické indukce  $B$  je tedy závislá právě na této intenzitě. Tato závislost je navíc nelineární, a proto permeabilita  $\mu$  materiálu není konstantou. Pro hodnocení magnetických vlastností látek je proto využíváno zejména grafických metod.

### 1.2.1 Křivka prvotní magnetizace

Křivka prvotní magnetizace, nazývaná též panenskou magnetizační křivkou, vyjadřuje funkční závislost  $B = f(H)$  pro materiál, který nikdy nebyl vystaven působení neproměnného vnějšího magnetického pole. Pokud vystavíme materiál postupně vzrůstající intenzitě  $H$  magnetického pole, dojde k postupnému natáčení momentů magnetických domén. Velikost magnetické indukce  $B$  nelineárně narůstá. Tento nárůst trvá až do okamžiku, kdy dojde natočení všech magnetických domén. Pak dochází k tzv. stavu nasycení, kdy se hodnota magnetické indukce  $B$  stává prakticky konstantní, a to bez ohledu na dále vzrůstající intenzitu magnetického pole  $H$ .

### 1.2.2 Hysterezní křivka

Tato křivka vyjadřuje funkční závislost  $B = f(H)$  pro materiál, který již byl vystaven působení neproměnného vnějšího magnetického pole. Pokračujme v myšleném experimentu z podkapitoly 1.2.1. Pokud začneme intenzitu  $H$  vnějšího magnetického pole



naopak zmenšovat, začne též velikost magnetické indukce  $B$  rovněž nelineárně klesat. Při nulové velikosti intenzity  $H$  však velikost indukce  $B$  již není nulová a zůstává na hodnotě **remanentní magnetické indukce**  $B_r$ , zkráceně remanence. Pro výrobu permanentních magnetů tak mají význam právě materiály, které mají vysokou remanentní magnetickou indukci.

Vzniklý magnetismus v látce tak lze odstranit pouze opačným vnějším magnetickým polem o velikosti magnetické intenzity  $H_c$ , nazývané **koercitivní magnetická indukce**, zkráceně koercitivita<sup>2</sup>. Při hodnotě skutečné koercitivity je tedy  $B = 0$ . Vynesením této části závislosti  $B = f(H)$  (II. kvadrant grafu) získáme **demagnetizační křivku**. Prakticky pouze tato část hysterezní křivky je důležitá pro porovnávání vlastností permanentních magnetů.

Další zvětšování  $H$  vede opět k nasycení, následující zmenšování pak zanechá v materiálu remanenci s opačnou orientací magnetických pólů. Cyklické magnetování materiálu tedy probíhá podle uzavřené magnetické křivky, plocha hysterezní křivkou vymezená je úměrná práci na jeden magnetizační cyklus.

### 1.2.3 Maximální energetický součin, porovnání demagnetizačních křivek permanentních magnetů

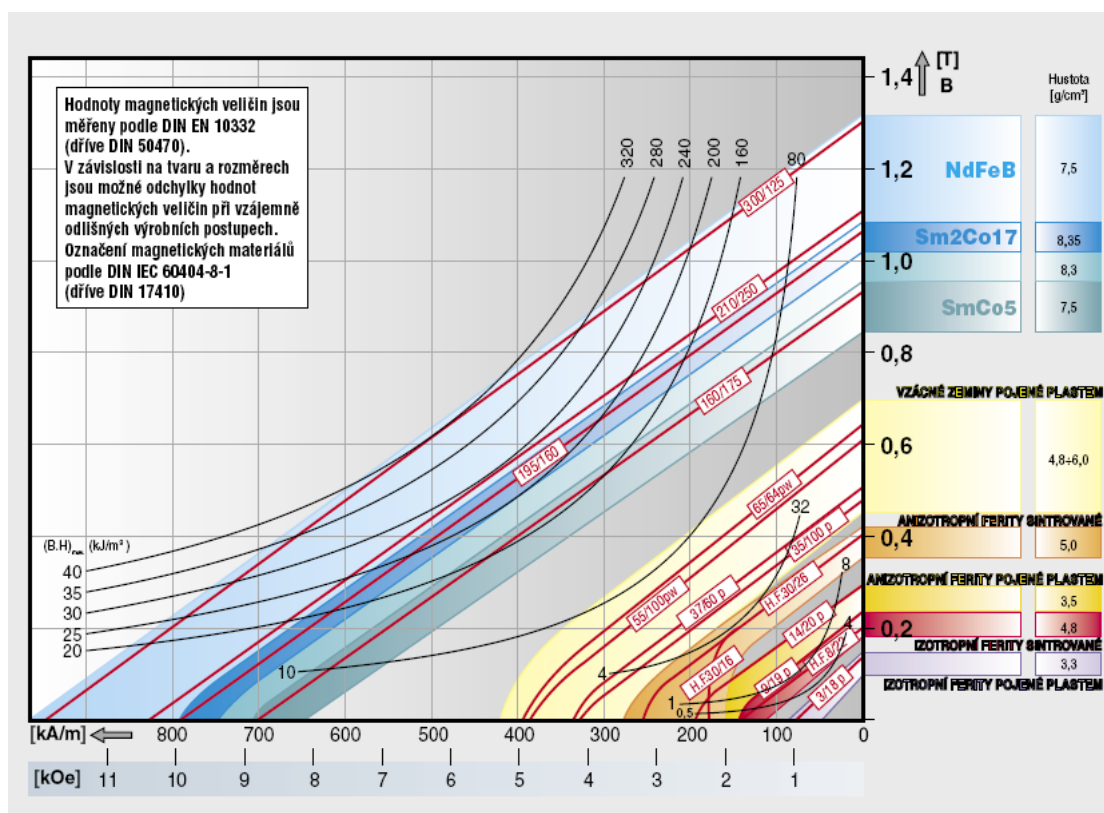
Jak již bylo řečeno, vlastnosti permanentního magnetu lze stanovit z demagnetizační křivky, tedy z druhého kvadrantu křivky hysterezní. Důležitými hodnotami jsou zde remanentní magnetická indukce  $B_r$  a koercitivní magnetická intenzita  $H_c$ . Další velice důležitou veličinou je **maximální energetický součin**  $(BH)_{\max}$ . Ten udává maximální energii magnetického pole, které permanentní magnet ve svém okolí vyvolává. Důležitost pro permanentní magnety spočívá v tom, že na jeho hodnotě závisí objem magnetu, který je zapotřebí pro vytvoření magnetického pole ve vzduchové mezeře. Čím vyšší je  $(BH)_{\max}$ ,

---

<sup>2</sup>V případě permanentních magnetů je koercitivita vycházející z uvedené hysterezní křivky označována také jako **skutečná koercitivita**  $H_{cB}$ . Dále je též ale uváděna i tzv. **vnitřní koercitivita**  $H_{cJ}$ , která představuje intenzitu vnějšího magnetického pole působícího na permanentní magnet, při které dojde ve vnitřní struktuře permanentního magnetu ke vzájemnému zrušení vektorů polarizace individuálních magnetických domén. Musí tedy platit, že  $H_{cB} < H_{cJ}$ . Protože se tato práce zabývá chováním permanentních magnetů navenek, bude v dalším textu koercitivitou  $H_c$  míněna skutečná koercitivita  $H_{cB}$ .

tím menší objem permanentní magnet pro konkrétní aplikaci může mít<sup>3</sup>.

Hodnota maximálního energetického součinu odpovídá ploše největšího obdélníku, který je možný vepsat pod konkrétní demagnetizační křivku. Při jeho stanovení se však nejčastěji vychází z dotyku demagnetizační křivky s hyperbolou ze soustavy energetických křivek. Demagnetizační křivky materiálů pro permanentní magnety spolu s energetickými hyperbolami jsou zobrazeny na obrázku 1.1. Označení magnetických materiálů odpovídá normě DIN IEC 60404-8-1, hodnoty magnetických veličin jsou měřeny dle normy DIN EN 10332



Obr. 1.1: Demagnetizační křivky různých látky pro permanentní magnety. Obrázek byl v nezměněné formě převzat z [8].

<sup>3</sup>Ač je maximální energetický součin uvažován jako energie magnetického pole, není jeho rozměrem 1 J. Nejčastěji používanou jednotkou je  $1\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ . Z této jednotky je patrná i souvislost s objemem permanentního magnetu pro konkrétní aplikaci.

### 1.2.4 Aproximace demagnetizační křivky

Zabývejme se nyní situací, kdy je nutné sestavit demagnetizační křivku z  $n$  naměřených diskrétních hodnot  $B$  a  $H$ . Následující způsob tohoto řešení byl převzat z [6].

Demagnetizační křivku magnetického materiálu jde nejlépe popsat hyperbolou, danou funkčním předpisem

$$B = B_r \frac{H_c - H}{H_c - a_0 H}. \quad (1.11)$$

V tomto funkčním předpisu představují  $B$  a  $H$  proměnné,  $a_0$  je pak konstantní koeficient daný sumarizačním vzorcem pro  $n$  měření  $B$  a  $H$

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{H_c}{H_i} + \frac{B_r}{B_i} - \frac{H_c B_r}{H_i B_i} \right). \quad (1.12)$$

Koeficient  $a_0$  lze pak následně využít k výpočtu reverzibilní permeability  $\mu_{\text{rev}}$  dle vztahu

$$\mu_{\text{rev}} = \frac{B_r}{H_c} (1 - a_0). \quad (1.13)$$

Jak je však z obrázku 1.1 patrné, permanentní magnety ze vzácných zemin mají prakticky přímkovou demagnetizační křivku. Tím se výraz (1.11) výrazně zjednoduší

$$B = B_r \left( 1 - \frac{H}{H_c} \right). \quad (1.14)$$

Tímto řešením odpadá nutnost hledání koeficientu  $a_0$ .

## 1.3 Permanentní magnety ze vzácných zemin

Pro účely elektrických pohonů jsou v současnosti využívány výhradně permanentní magnety ze vzácných zemin. Kovy vzácných zemin, které se nazývají též lanthanoidy či  $4f$ -kovy<sup>4</sup>, představují početnou skupinu chemických prvků, začínající lanthanem  ${}_{57}\text{La}$  a končící luteciem  ${}_{71}\text{Lu}$ . Dvanáct z těchto prvků, cer  ${}_{58}\text{Ce}$  až thulium  ${}_{69}\text{Tm}$ , se vyznačuje nezaplňenou elektronovou podsférou  $4f$ . Díky této nezaplňené podsféře získávají  $4f$ -kovy odlišné magnetické vlastnosti, lišící se od  $3d$  kovů skupiny železa (přechodové kovy).

---

<sup>4</sup>Číslo 4 označuje hodnotu hlavního kvantového čísla  $n$  atomu a souvisí s energií elektronu. Písmeno  $f$  pak souvisí s vedlejším kvantovým číslem atomu. Jedná se o označení elektronových podsfér v atomu, kde se používá malých písmen ( $s, p, d, f, \dots$ ).

Mezi tyto prvky patří též neodym  ${}_{60}\text{Nd}$  a samarium  ${}_{62}\text{Sm}$ , které jsou v současnosti nejvíce využívány právě při výrobě permanentních magnetů ze vzácných zemin spolu s přechodovými kovy kobaltem  ${}_{27}\text{Co}$  a železem  ${}_{26}\text{Fe}$ . Tyto permanentní magnety jsou dnes nejčastěji založeny na intermetalických fázích:

- Samaria a kobaltu, tzv. **samarium-kobaltové magnety (SmCo)**,
- Neodymu a železa, tzv. **neodymové magnety (NdFeB)**.

### 1.3.1 Samarium-kobaltové magnety (SmCo)

Samarium-kobaltové magnety jsou známy již od roku 1970. Vyrábějí se metodami práškové metalurgie, lisováním v magnetickém poli a následným spékáním. Vykazují několikanásobně větší hodnoty maximálního energetického součinu  $(BH)_{\max}$ , než tomu je u klasických magnetických materiálů typu feritů či AlNiCo.

SmCo magnety se vyrábějí ve dvou strukturách. Struktura  $\text{SmCo}_5$  má jeden atom samaria a pět atomů kobaltu. Atomy samaria a kobaltu tvoří hexagonální mřížku. Struktura  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  je tvořena dvěma atomy samaria a sedmnácti atomy kobaltu. Atomy samaria a kobaltu tvoří romboedrickou nebo hexagonální mřížku. Z hlediska magnetických vlastností vykazuje struktura  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  oproti  $\text{SmCo}_5$  vyšší remanenci  $B_r$  a teplotní stabilitu, a to při značně proměnlivých teplotách.

### 1.3.2 Neodymové magnety (NdFeB)

Permanentní magnety tohoto typu byly objeveny v roce 1984 ve snaze získat cenově výhodnější magnetický materiál obdobných vlastností jako SmCo. Výroba je realizována metodou práškové metalurgie a lisováním v silném magnetickém poli, a následným spékáním. Přestože jsou cenově výhodnější<sup>5</sup>, vzkazují též vyšší hodnoty  $(BH)_{\max}$  než magnety SmCo. Další výhodou oproti magnetům SmCo je též vyšší mechanická odolnost. Mezi nevýhody však patří nižší pracovní teploty a značná náchylnost ke korozi. Postupné zvládnutí technologie neodymových magnetů však přineslo značné zlepšení tohoto nepříznivého jevu.

---

<sup>5</sup>Nižší cena souvisí nejenom s výrobními náklady, ale také s větší dostupností surovin.

Struktura permanentních magnetů NdFeB je tvořena jako  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , je tedy tvořena dvěma atomy neodymu, čtrnácti atomy železa a jedním atomem boru. Do magnetů NdFeB jsou však přidávány obvykle i další legující prvky ke zvýšení koercitivity. Krystalická buňka se 68 atomy je tvořena čtyřmi podjednotkami. Mřížka je tetragonální s hexagonálními švy atomů železa.

## 1.4 Přednostní osa orientace permanentního magnetu

Permanentní magnet dosahuje nejlepších magnetických vlastností obvykle v jednom směru, který je nazýván **přednostní osa orientace**. Této osy se docílí během výroby vystavením materiálu vnějšímu silnému magnetickému poli. Dle osy orientace lze permanentní magnety rozdělit do pěti skupin, toto členění bylo převzato z [8]:

1. **Izotropní permanentní magnety** – nemají žádnou přednostní osu orientace. Směr a způsob magnetování je tedy libovolný.
2. **Anizotropní permanentní magnety** – jsou lisovány v magnetickém poli a dostávají tak přednostní osu orientace. Dobré magnetické vlastnosti mají pouze v této ose a mohou být magnetovány pouze v ní. Při stejném objemu magnetu se dosáhne vyššího magnetického toku nežli u magnetů izotropních. Remanence je přibližně dvojnásobná.
3. **Permanentní magnety s axiální přednostní osou orientace** – takto, tzn. axiálně, jsou orientovány kruhové a válcové magnety a hranoly přes výšku.
4. **Permanentní magnety s diametrální přednostní osou orientace** – pro zvláštní aplikace, kupříkladu u kruhových či válcových permanentních magnetů motorů nebo čerpadel, je přednostní osa orientace diametrální (kolmo k ose rotace).
5. **Permanentní magnety pólově orientované** – zde jsou póly uspořádány tak, jak bude provedeno pozdější vícepólové magnetování. Tyto trvalé magnety se používají převážně ve spojení se senzory, v pohonech motorů nebo v generátorech. Remanence je přibližně 1,5 až 2 násobná v porovnání se stejným izotropním materiálem.

## 2 Rozbor degradačních vlivů ovlivňujících vlastnosti permanentních magnetů

Následující kapitola bude věnována faktorům, které způsobují degradaci vlastností permanentních magnetů. Mezi tyto faktory patří zejména působení chemikálií, koroze, teplotní vlivy a v neposlední řadě též vlivy mechanické. Degradaci magnetických vlastností permanentních magnetů může způsobit též silné radioaktivní záření, a to zejména u magnetů NdFeB. Tento vliv však pro běžné aplikace není nutno uvažovat. Pozornost v dalším textu bude věnována pouze permanentním magnetům ze vzácných zemin.

### 2.1 Chemická odolnost, koroze

Permanentní magnety ze vzácných kovů, jak již sám název napovídá, lze řadit ke kovovým materiálům. Z toho vyplývají vlastnosti typické pro kovy, jako je např. malá odolnost proti působení koncentrovaných kyselin. Dalšími chemickými látkami, které mohou na materiál působit, jsou látky vykazující zásadité prostředí, dále to může být působení solí a některých plynů. V případě permanentních magnetů pro elektrické pohony je pak velice důležité posouzení vlastností vlivu vlhkosti, maziv a rozpouštědel. Tyto vlivy mají též přímou souvislost s teplotou, která umocňuje chemické degradační procesy.

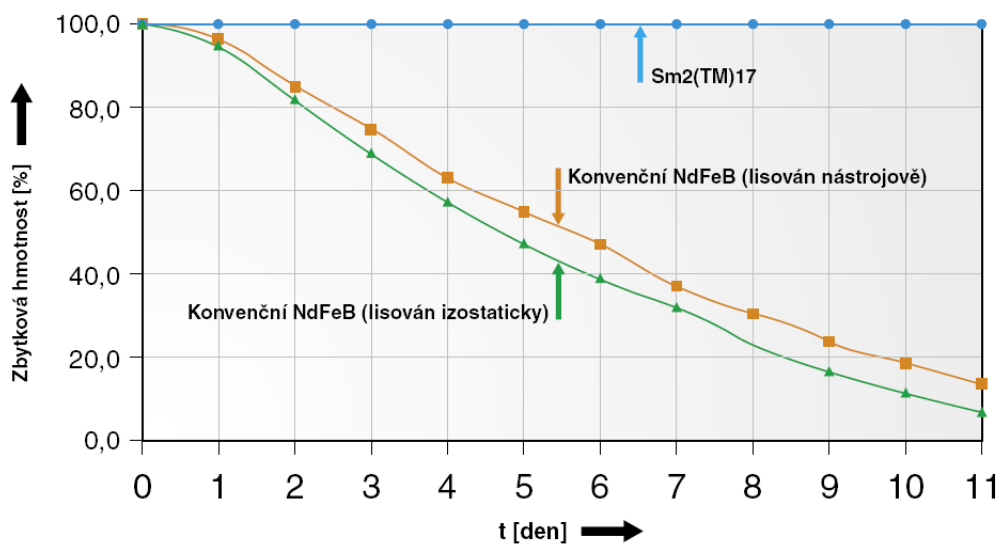
#### 2.1.1 Odolnost permanentních magnetů SmCo

Jak již uvedeno, tento druh permanentních magnetů ze vzácných zemin je stabilními fázovými intermetalickými částicemi. Tyto druhy vykazují za předpokladu nízkých teplot poměrně dobrou odolnost vůči všem výše uvedeným chemickým látkám, a také poměrně dobré vlastnosti proti působení vlhkosti. Odolnost proti působení koncentrovaných kyselin je jako u většiny kovů nízká, podobné vlastnosti vykazují též vůči slaným roztokům.

#### 2.1.2 Odolnost permanentních magnetů NdFeB

Mezi nepříznivé vlastnosti volných kovů vzácných zemin patří vysoká korozivnost. U magnetů SmCo se však samarium nevyskytuje jako volné, a proto jsou jejich korozivní vlastnosti příznivé. V klasických sintrovaných magnetech NdFeB se neodým vyskytuje také jako vázaný, ale též jako volný. Vlivem vzdušné vlhkosti tak dochází k degradaci magnetu

na prášek tvořený oxidem či hydroxidem neodymu. Magnetu se tak v podstatě rozpadá v prachovou formu. O tom svědčí výsledek měření na obrázku 2.1, při kterém byly permanentní magnety struktury  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  a  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  vystaveny teplotě  $130^\circ\text{C}$  a tlaku  $300\text{ kPa}$  v nasycené vodní páře. Rapidní úbytek hmotnosti je v případě  $\text{NdFeB}$  magnetu značný. Tento nepříznivý jev může způsobit v praxi značné problémy právě zejména v elektrických motorech. Může dojít vlivem vzniku prachové struktury k zaprášení vnitřní části tělesa motoru, k přeskoku oblouku či k mechanickému poškození. Uvedený degradační proces značně urychlí působení solí, koncentrovaných kyselin či zvýšené teploty.



Obr. 2.1: Procentní úbytek hmotnosti permanentních magnetů struktury  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  a  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , které byly vystaveny teplotě  $130^\circ\text{C}$  a tlaku  $300\text{ kPa}$  v nasycené vodní páře. Obrázek byl v nezměněné formě převzat z [8].

Z plynů na magnety  $\text{NdFeB}$  působí velmi nepříznivě vodík, který způsobuje rozpadání tělesa magnetu vlivem hydrogenace. Vliv technických látek, jako jsou rozpouštědla či maziva, je však na koroziivnost magnetů  $\text{NdFeB}$  poměrně malý.

### 2.1.3 Eliminace koroziivních a oxidačních dějů u magnetů $\text{NdFeB}$ .

V zásadě lze pro eliminaci koroziivních dějů požit tři metody. První metodou je **výroba plastem pojených permanentních magnetů**. Látka tělesa magnetu kromě feromagnetického materiálu obsahuje též jisté množství plastového pojiva ve formě epoxidové pryskyřice či polyamidu. Tak dojde k obklopení volných částic neodymu, a tím k anti-

korozivní ochraně tohoto citlivého materiálu. U tělesa magnetu může docházet ke slabé povrchové korozi, která však do vnitřní struktury magnetu proniká velice pozvolna. Pro zamezení i tohoto jevu se pak používá v některých aplikacích plastové povrstvení povrchu.

Jinou metodou je **povlakování plastem**. Tím se vytvoří stabilní ochrana těsným povlakem, který, jak je uvedeno v [8], odolává ve vzduchu teplotám až 110 °C, bez přítomnosti kyslíku dokonce teplotám až 220 °C. Způsobem třetím je též povlakování, nyní však vrstvou korozivzdorného kovu, který je galvanicky nanesen na povrch tělesa magnetu. Této metodě se říká **kovové povlakování** a jedná se o rozšířenou metodu, která se využívá nejenom u magnetů NdFeB, ale i u magnetů SmCo. Nevýhodou kovového povlakování je však jisté nepatrné zvětšení vzdálenosti mezi magnetickým materiálem a okolím, dále též částečné přímé uzavření magnetických siločár vrstvou naneseného kovu. Oboje uvedené nevýhody lze však obvykle zanedbat.

## 2.2 Teplotní vlivy

V předchozí kapitole bylo uvedeno, že zvyšování teploty vede k urychlení chemické degradace permanentního magnetu ze vzácných zemin. Zvyšování teploty nad jisté meze však vede též degradaci vnitřní magnetické struktury a ke vzniku magnetických ztrát. Tyto ztráty mohou být:

1. **Reverzibilní** – vznikají vlivem atomárních poruch při zvyšování teploty, při snížení teploty permanentní magnet vrací zpět své magnetické vlastnosti,
2. **Ireverzibilní** – projevují se v odchylce na od prakticky lineárního průběhu demagnetizační křivky permanentního magnetu ze vzácných zemin. Tyto ztráty jsou trvalé vlivem změny materiálové struktury.

### 2.2.1 Curieova teplota

Při jisté teplotě  $T_C$ , zvaná **Curieova teplota**, dochází u feromagnetických materiálů ke ztrátě magnetických vlastností. Jak již bylo uvedeno, ve feromagnetických látkách existují magnetické domény a působením vnějšího magnetického pole se tyto domény souhlasně orientují. V látce však existuje též chaotický tepelný pohyb atomů a v případě překročení jisté teploty  $T_C$ , dochází prakticky ke skokovému přechodu vlivem intenzivního tepelného



pohybu a ke zničení magnetických domén. Látka se stává látkou paramagnetickou. Teplota  $T_C$  tedy vede ke změně magnetické susceptibility  $\chi_m$  látky. Její hodnotu lze určit pomocí Curieova-Weissova vztahu jako

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_C}, \quad (2.1)$$

kde  $T$  je teplota,  $T_C$  Curieova teplota pro dané feromagnetikum a  $C$  je látkově specifická konstanta.

Curieova teplota je charakteristickou hodnotou každého feromagnetického materiálu<sup>6</sup>. V případě  $\text{Sm}_2\text{Co}_5$  magnetů se pohybuje okolo  $740^\circ\text{C}$ , u  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  pak okolo  $840^\circ\text{C}$ . U Nd-FeB magnetů pak od  $310^\circ\text{C}$  do  $340^\circ\text{C}$ . Maximální provozní teplota by však neměla překročit hodnotu přibližně  $0,4T_C$ . Záleží však na materiálu a předepsané katalogové hodnotě. U NdFeB magnetů, které vykazují horší tepelné vlastnosti, se tak pracovní teploty pohybují dle materiálu od  $80^\circ\text{C}$  do  $200^\circ\text{C}$ .

### 2.2.2 Teplotní koeficienty

Teplotní koeficienty jsou materiálové parametry, udávající procentuální pokles remanence  $B_r$  permanentního magnetu na  $1^\circ\text{C}$  resp. procentuální pokles koercitivity  $H_c$  na  $1^\circ\text{C}$ . Vzhledem k tomu, že se jedná o ztráty se vzrůstem teploty, jsou tyto koeficienty záporné.

Jestliže magnetické vlastnosti permanentních magnetů jsou závislé na teplotě, je tedy nutno hodnoty  $B_r$  a  $H_c$  udávat při jisté teplotě, řekněme teplotě laboratorní. Při návrhu zařízení s permanentními magnety je tak samozřejmě nutné zohledňovat pracovní teplotu ve vztahu k maximální pracovní teplotě magnetu, ale také provést přepočty  $B_r$  a  $H_c$  dle katalogových teplotních koeficientů. Je totiž samozřejmě možná situace, kdy permanentní magnet s větší udávanou hodnotou např.  $B_r$  bude díky horšímu teplotnímu koeficientu vykazovat mnohem menší magnetickou stabilitu při vyšších pracovních teplotách, než permanentní magnet se sice nižší katalogovou hodnotou  $B_r$ , ale s lepším teplotním koeficientem.

Příklady průměrných teplotních koeficientů permanentních magnetů ze vzácných zemin lze najít např. v [9] a jsou použity v tabulce 2.1.

---

<sup>6</sup>Curieova teplota  $T_C$  je vždy menší než teplota tání dané látky. To vysvětluje neexistenci feromagnetických kapalin či dokonce plynů.

Tepl. koef.	Rozsah teplot	Sm <sub>2</sub> Co <sub>5</sub>	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B
pro $B_r$ (% na 1 °C)	od -40 °C do +20 °C	-0,10	-0,045	-0,03
	od +20 °C do +150 °C	-0,12	-0,045	-0,03
pro $H_c$ (% na 1 °C)	od -40 °C do +20 °C	-0,6	-0,3	-0,22
	od +20 °C do +150 °C	-0,8	-0,3	-0,22

Tab. 2.1: Příklady průměrných teplotních koeficientů permanentních magnetů ze vzácných zemin. Hodnoty byly převzaty z [9].

### 2.3 Mechanická odolnost

Jak je z teorie feromagnetizmu známo, magnetické vlastnosti feromagnetika lze značně znehodnotit mechanickým působením (např. údery na materiál), kdy dochází ke zničení vnitřního uspořádání atomů. Permanentní magnety ze vzácných zemin patří však k metalickým materiálům s poměrně velkou tvrdostí a křehkostí. Mechanickými údery (resp. úderem) tak dochází spíše ke zničení tělesa permanentního magnetu, případně k odštípnutí jeho části. Z uvedených vlastností tak vyplývá problematické též případné mechanické obrábění, i když v principu možné je. U permanentních magnetů ze vzácných zemin, které jsou pojeny plastem, lze dokonce provádět takové operace jako je soustružení, frézování či vrtání. Tyto operace lze samozřejmě realizovat pouze za použití speciálních tvrdokovových nástrojů, nutné je brát ohledy též teplotu vznikající při obrábění. Obecně lze říci, že SmCo magnety mají mnohem horší mechanické vlastnosti než magnety NdFeB, přičemž největší křehkost vykazuje struktura Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>.

## 3 Návrh a rozbor metodik měření magnetických vlastností materiálu

### 3.1 O měřících metodách všeobecně

Magnetická měření lze všeobecně rozdělit na měření vlastností materiálů a měření vlastností vlastních výrobků. Principiálně se jedná o stejná měření, rozdílnosti lze najít v úpravě vzorku a samozřejmě v podmínkách měření.

#### 3.1.1 Měření vlastností materiálu

Cílem je získání hodnot veličin, které charakterizují daný materiál. Získané hodnoty je pak možné využít ke stanovení magnetické jakosti materiálu pro konkrétní aplikace. K dispozici je vždy vzorek magnetického materiálu a dle úpravy tohoto vzorku lze rozdělit způsob na:

1. **Měření na oddělených vzorcích** – nejpoužívanější způsob měření, a také nejsnadnější. Dispozici je odebraný vzorek daného materiálu, obvykle svým tvarem přizpůsobený k realizaci konkrétního měření. Důležité u této metody je správný výběr vzorku, aby se co nejvíce blížil svými vlastnostmi materiálu, který je používán při výrobě daného výrobku.
2. **Měření bez oddělovaného vzorku** – jedná se o nedestrukční měření, které se provádí na celých kusech materiálu, které přicházejí do výroby. Měření se provádí buďto na celém kusu materiálu nebo se měření provádí na více místech. Tento způsob však pro zjišťování vlastností permanentních magnetů pochopitelně použitelný není.

Je tedy zřejmé pro zjištění magnetických vlastností permanentních magnetů pro tuto práci bude využito měření na odděleném vzorku, který svým tvarem bude odpovídat co možná nejlépe navrženému magnetickému obvodu.

#### 3.1.2 Měření vlastností výrobků

Cílem je zjištění vlastností konkrétního výrobku, tedy např. permanentního magnetu konkrétního tvaru a pro konkrétní aplikaci. Při tomto měření je nutné zahrnout též různá

rozptylová pole a nehomogenity měřeného vzorku. U tohoto typu měření je nutné, aby jeho provedení odpovídalo použití měřeného výrobku. Pro účely této práce nebude prováděno měření na konkrétním permanentním magnetu pro trakční motor. Jak již bylo uvedeno, bude pro návrh měřicího pracoviště a konkrétní měření využito vzorku.

### 3.1.3 Faktory ovlivňující přesnost měření

Do měření magnetických vlastností látek pochopitelně mohou vstupovat takové vlivy, jako je nevhodná metoda měření, přesnost měřícího zařízení, hrubá chyba při měření apod. Při měření magnetických vlastností materiálu však mohou nastat chyby způsobené též vlastnostmi materiálu samotného. Jedná se zejména o:

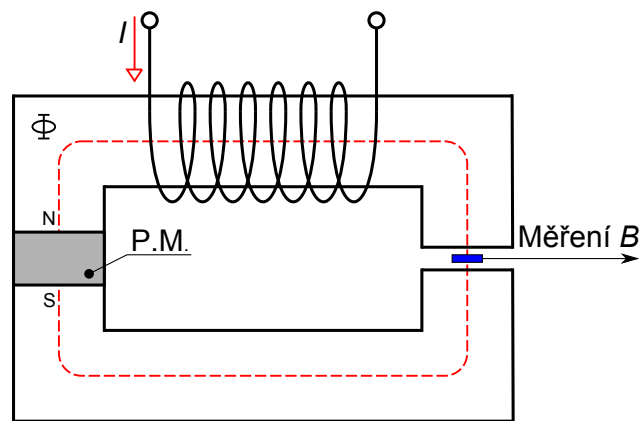
1. **Reluktanci na vzduchových mezerách** v případě děleného či neuzavřeného magnetického obvodu. Špatná volba tvaru magnetického obvodu může způsobit rozptylové toky, a tím v podstatě nehomogenitu materiálu. Využití výpočtu magnetické intenzity a indukce z magnetizačního proudu tak v podstatě není možné.
2. **Nehomogenita materiálu** způsobí též dosti komplikované rozptylové toky. Skrytou nehomogenitu materiálu je možné odhalit jiným způsobem měření či použitím více vzorků.
3. **Nestálost feromagnetika** může nastat samovolně stárnutím materiálu nebo nebo vnějšími fyzikálně-chemickými vlivy, které byly podrobněji popsány v kapitole 2.
4. **Hystereze feromagnetika** je vyjádřena komplikovanou a v podstatě neuzavřenou křivkou. Postup magnetování tak notně ovlivňuje měřené veličiny. Jak již bylo uvedeno, v případě permanentních magnetů je důležitý zejména druhý kvadrant hysterezní křivky, tedy křivka demagnetizační, kterou je možné aproximovat funkcí (1.11). Z tvaru funkčního předpisu je zřejmé, že se jedná o hyperbolu, v případě permanentních magnetů ze vzácných zemin je však tato závislost prakticky lineární, o čemž svědčí obrázek 1.1. Tato vlastnost by tedy teoreticky měla měření ulehčit.

Z uvedených vlivů je patrná značná komplikovanost při určování co možná nejpřesnější hodnoty měření. Při požadavku přesnějších měření je tedy nutné využít metody vycháze-

jící z teorie chyb. Konkrétní rozbor metod určování přesnosti měření však není cílem této práce.

### 3.2 Návrh metodiky měření vlastností permanentních magnetů

V následující podkapitole bude proveden teoretický návrh možného způsobu měření vlastností permanentních magnetů. Představme si permanentní magnet (P. M.) vložený mezi železné pólové nástavce. Na protější straně pólových nástavců existuje vzduchová mezeřa, do které je vložen senzor magnetické indukce  $B$ . Magnetický tok obvodem je možné ovlivňovat velikostí elektrického proudu  $I$ , protékajícím cívkou o  $N$  závitů. Sestava je zobrazena na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Magnetický obvod s permanentním magnetem (P. M.), cívkou a senzorem pro měření velikosti magnetické indukce  $B$ .

Jak již bylo uvedeno, obrázek 3.1 představuje pouze idealizovaný teoretický návrh, konkrétní návrh měřícího pracoviště a praktické měření bude obsahem až dalších kapitol bakalářské práce. Nejsou zohledněny rozptylové toky na hranách nástavců a ve vzduchové mezeře. Možné ovlivňující faktory, popsané v kapitole 3.1.3, rovněž nejsou uvažovány. Obvod je navržen tak, aby dosedající plocha permanentního magnetu a nástavce byla shodná, totéž bude platit pro průřez ve vzduchové mezeře.

#### 3.2.1 Magnetický obvod s permanentním magnetem

Uvažujme teoreticky navržený magnetický obvod z obrázku 3.1 za situace, kdy cívkou na pólových nástavcích neprotéká žádný proud. Protože je průřez magnetického obvodu ve

všech místech stejný, je též ve všech místech stejný magnetický tok  $\Phi$ . Totéž bude platit pro hodnotu magnetické indukce  $B_{\text{pm}}$ . Pro magnetická napětí v obvodu platí, že

$$U_{\text{mpm}} + U_{\text{mFe}} + U_{\text{m0}} = 0, \quad (3.1)$$

kde  $U_{\text{mpm}}$  je magnetické napětí permanentního magnetu,  $U_{\text{mFe}}$  pólových nástavců,  $U_{\text{m0}}$  magnetické napětí ve vzduchové mezeře. Vztah (3.1) lze rozepsat pomocí magnetických intenzit jako

$$H_{\text{pm}}h_{\text{pm}} + H_{\text{Fe}}l_{\text{Fe}} + H_0h_0 = 0, \quad (3.2)$$

kde  $h_{\text{pm}}$  je tloušťka permanentního magnetu,  $l_{\text{Fe}}$  délka střední siločáry v obou pólových nástavcích a  $h_0$  šířka vzduchové mezery. Protože uvažujeme, že ve vzduchové mezeře je vložen senzor magnetického pole, je měřením známa hodnota magnetické indukce  $B_{\text{pm}}$  v obvodu. Platí tedy

$$H_{\text{pm}}h_{\text{pm}} + \frac{B_{\text{pm}}}{\mu_{\text{Fe}}\mu_0}l_{\text{Fe}} + \frac{B_{\text{pm}}}{\mu_0}h_0 = 0. \quad (3.3)$$

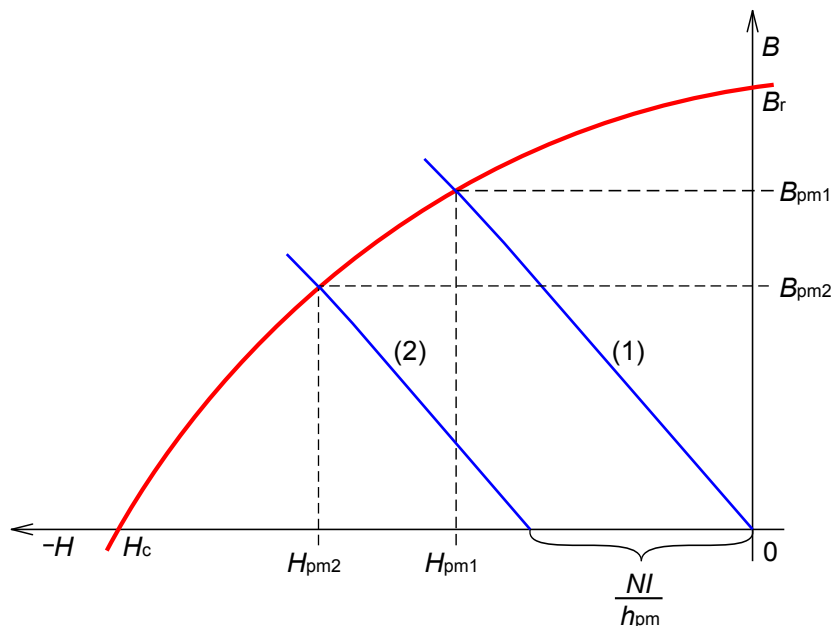
Uvažujeme, že je pro nás známa hodnota relativní permeability  $\mu_{\text{Fe}}$  materiálu pólových nástavců. Úpravou rovnice (3.3) pak lze najít závislost magnetické intenzity  $H_{\text{pm}}$  uvnitř permanentního magnetu na velikosti magnetické indukce  $B_{\text{pm}}$  ve tvaru

$$H_{\text{pm}} = -\frac{1}{\mu_0 h_{\text{pm}}} \left( \frac{1}{\mu_{\text{Fe}}} l_{\text{Fe}} + h_0 \right) B_{\text{pm}}. \quad (3.4)$$

Ze vztahu (3.4) je patrné, že se jedná o rovnici přímky za předpokladu, že budeme považovat  $\mu_{\text{Fe}}$  za konstantu. Znaménko před rovnicí svědčí o záporné směrnici přímky, je tedy zakreslena do 2. kvadrantu souřadné soustavy  $(H; B)$ . Přímka proto protíná demagnetizační křivku daného obvodu a tento průsečík určuje hodnoty  $H_{\text{pm}}$  a  $B_{\text{pm}}$  za těchto podmínek. Tzn. zejména pro dané rozměry permanentního magnetu a vzduchové mezery. Situace je schematizována na obrázku 3.2, přímka (1).

### 3.2.2 Magnetický obvod s permanentním magnetem a cívkou s proudem

Nyní uvažujeme stejný magnetický obvod jako v předchozích odstavcích, cívkou však již nyní protéká nenulový stejnosměrný proud  $I$ . Směr tohoto proudu je orientován tak, aby v magnetickém obvodu vytvořil tok opačný magnetickému toku, jehož zdrojem je permanentní magnet. Cívka tak vytváří v obvodu opačné magnetomotorické napětí velikosti



Obr. 3.2: Demagnetizační křivka permanentního magnetu v magnetickém obvodu.

$NI$ . Vztah (3.1) tak přechází do tvaru

$$U_{\text{mpm}} + U_{\text{mFe}} + U_{\text{m0}} = -NI. \quad (3.5)$$

Obdobně jako v rovnicích (3.2) tedy platí

$$H_{\text{pm}}h_{\text{pm}} + H_{\text{Fe}}l_{\text{Fe}} + H_0h_0 = -NI. \quad (3.6)$$

Pokud budeme senzorem magnetického pole měřit velikost indukce  $B_{\text{pm}}$ , lze psát vztah (3.6) ve tvaru

$$H_{\text{pm}}h_{\text{pm}} + \frac{B_{\text{pm}}}{\mu_{\text{Fe}}\mu_0}l_{\text{Fe}} + \frac{B_{\text{pm}}}{\mu_0}h_0 = -NI. \quad (3.7)$$

Úpravami rovnice (3.7) pak lze získat výsledný vztah pro  $H_{\text{pm}}$  ve tvaru

$$H_{\text{pm}} = -\frac{1}{\mu_0h_{\text{pm}}} \left( \frac{1}{\mu_{\text{Fe}}}l_{\text{Fe}} + h_0 \right) B_{\text{pm}} - \frac{NI}{h_{\text{pm}}}. \quad (3.8)$$

Rovnice (3.8) je za předpokladu  $I = \text{konst.}$  opět rovnicí přímky, její průsečík s vodorovnou osou soustavy  $(H; B)$  se však přesouvá směrem do záporných hodnot o velikost magnetické intenzity  $\frac{NI}{h_{\text{pm}}}$ . Průsečík s demagnetizační křivkou tak opět určuje hodnoty  $H_{\text{pm}}$  a  $B_{\text{pm}}$  za daných podmínek. Změnou velikosti proudu  $I$  je tak možné provést zpětně konstrukci demagnetizační křivky permanentního magnetu v daném obvodu. Situace je schematizována na obrázku 3.2, přímka (2).

### 3.3 Hallova sonda

Hallova sonda představuje moderní polovodičový prvek k určování velikosti magnetické indukce. V katalogích výrobců lze obvykle najít polovodičové prvky založené na Hallově jevu, které v jistém rozsahu vnější magnetické indukce vykazují prakticky lineární závislost výstupního napětí (kontinuální sondy) nebo jsou konstruovány jako spínače závislé na vnějším magnetickém poli.

Mezi základní přednosti Hallových sond patří malé rozměry a prakticky žádné rušení indikovaného magnetického pole. Mezi další výhody patří možnost využití jak ve stejnosměrných magnetických polích, tak v polích střídavých, kde je výstupem sondy střídavé elektrické napětí. Hallova sonda však nemusí sloužit jen jako prvek měřicí či indikující magnetické pole, má též směrové vlastnosti, a lze proto využít také k určení směru vektorů  $\mathbf{B}$  a  $\mathbf{H}$  magnetického pole. Protože pro potřeby bakalářské práce bude používáno výhradně Hallových sond, bude věnována pozornost pouze tomuto senzoru magnetického pole.

#### 3.3.1 Princip Hallova jevu

Hallův jev je proces vznikající současným působením elektrického a magnetického pole na kov či polovodič. Děj bude vznikat v případě, že z tohoto materiálu bude vyrobena destička tloušťky  $d$ , která bude vložena do magnetického pole s indukcí  $B$  tak, že proud  $I$ , protékající destičkou z vnějšího zdroje, bude kolmý právě na vektor magnetické indukce  $\mathbf{B}$ . Pak dojde k odchylování nosičů náboje k jedné straně destičky, a tím ke vzniku potenciálového rozdílu  $U_H$ , zvaného **Hallovo napětí**. Toto napětí je určeno vztahem

$$U_H = R_H \frac{I B}{d}, \quad (3.9)$$

kde  $R_H$  je Hallova materiálová konstanta. Tato konstanta je důležitá pro citlivost sondy a její velikost je nepřímo úměrná hustotě volných nosičů náboje v materiálu. Z tohoto plyne, že u běžných kovů, které mají velkou hustotu nosičů náboje, je Hallův jev prakticky zanedbatelný. Naopak u polovodičů je hustota nosičů náboje malá, Hallova konstanta má proto velikost dostatečnou pro kvalitní citlivost Hallova senzoru.

Bude-li vzorkem materiálu protékat konstantní proud  $I$ , je z tvaru rovnice (3.9) patrné, že Hallova sonda je prvkem lineárním, velikost Hallova napětí je tedy přímo úměrná mag-



netické indukci vnějšího magnetického pole. Limitujícím je pochopitelně použité napájecí napětí Hallova senzoru.

### 3.3.2 Hallova sonda A1302 a její kalibrace

Pro účely magnetických měření v této práci byla použita Hallova sonda A1302. Jedná se o kontinuální lineární senzor magnetického pole, jehož fyzikální parametry lze najít v [10], vybrané jsou pak uvedeny v tabulce 3.1.

Charakteristika	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Napájecí napětí	4,5	–	6	V
Napájecí proud	–	–	11	mA
Klidové výstupní napětí	2,4	2,5	2,6	V
Magnetická citlivost	0,010	0,013	0,016	$V \cdot mT^{-1}$

Tab. 3.1: Vybrané fyzikální parametry Hallové sondy A1302. Data byly s úpravami převzata z dokumentu [10], který obsahuje kompletní fyzikální parametry tohoto prvku.

Uvážíme-li lineární charakter senzoru A1302, lze z typických hodnot magnetické citlivosti a klidového výstupního napětí z tabulky 3.1 odvodit kalibrační vztah pro výstupní napětí  $U_{hs}$  v závislosti na magnetické indukci  $B$  ve tvaru

$$U_{hs} = 0,013B + 2,5 \quad [V; mT]. \quad (3.10)$$

Inverzní vztah k rovnici (3.10) pak lze použít pro výpočet magnetické indukce  $B$  z napětí  $U_{hs}$  měřeného na Hallově sondě:

$$B = 76,923U_{hs} - 193,308 \quad [mT; V]. \quad (3.11)$$

Jiným způsobem kalibrace je ověření vlastností Hallové sondy přímo v magnetickém obvodu. Pro účely této práce byl proveden jednoduchý pokus, který měl ověřit lineární vlastnosti sondy A1302. Sonda byla vložena mezi dvě stejné sériově zapojené vzduchové cívky rozkladného transformátoru. Pokud tyto cívky budou těsně v jedné ose přiléhat k sobě, lze je zjednodušeně považovat za solenoid. Pokud do solenoidu není vloženo žádné jádro, lze závislost magnetické indukce  $B$  na protékajícím proudu  $I$  popsat vztahem

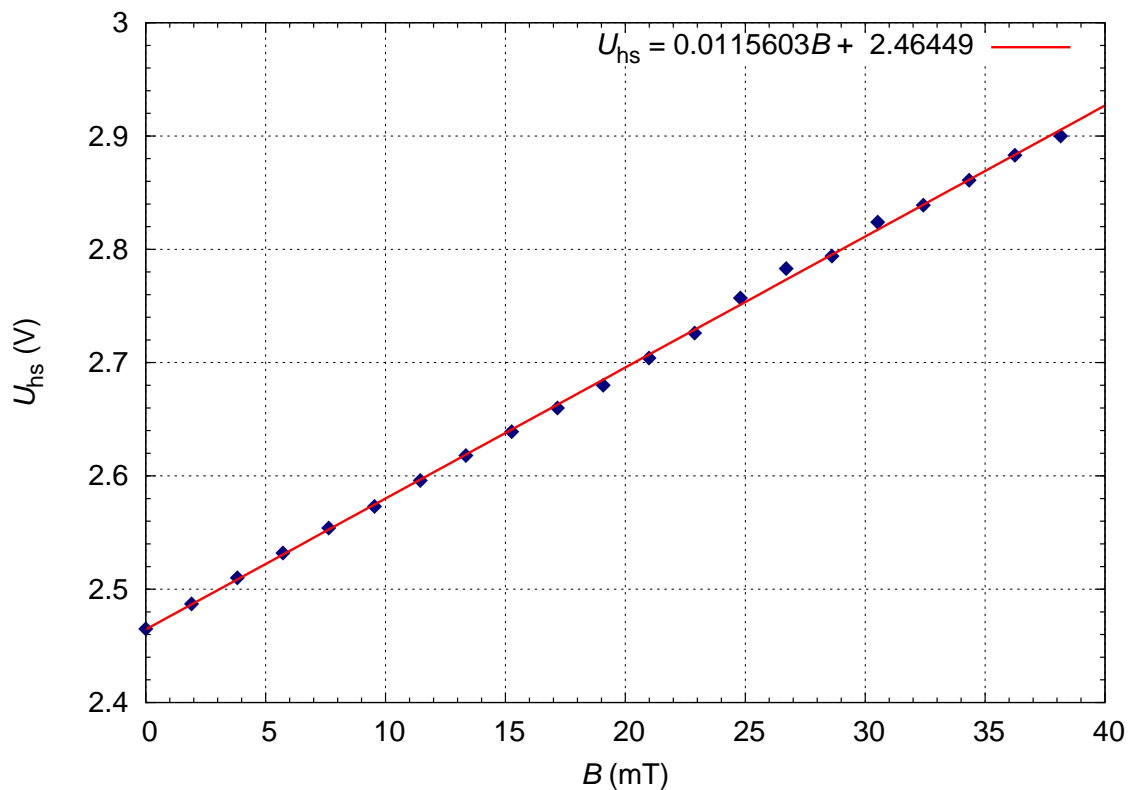
$$B = \frac{\mu_0 N}{\sqrt{l^2 + D^2}} I, \quad (3.12)$$

kde  $N$  je celkový počet závitů solenoidu,  $l$  aktivní délka a  $D$  střední průměr solenoidu. Pro účely pokusu byly použity dvě vzduchové cívky o 1 200 závitů, tzn. při sériovém zapojení  $N = 2\,400$  závitů. Bylo měřeno napětí na Hallově sondě v závislosti na protékajícím proudu cívkami. Výsledkem je kalibrační vztah

$$U_{\text{hs}} = 0,0116B + 2,4645 \quad [\text{V}; \text{mT}], \quad (3.13)$$

který byl získán lineární regresí z měřených hodnot<sup>7</sup>. Grafické vynesení závislosti je na obrázku 3.3. Inverzní funkci ke vztahu (3.13) pak lze obdobně jako vztah (3.11) použít k výpočtu magnetické indukce  $B$  z napětí  $U_{\text{hs}}$  měřeného na Hallově sondě

$$B = 86,5029U_{\text{hs}} - 213,1857 \quad [\text{mT}; \text{V}]. \quad (3.14)$$

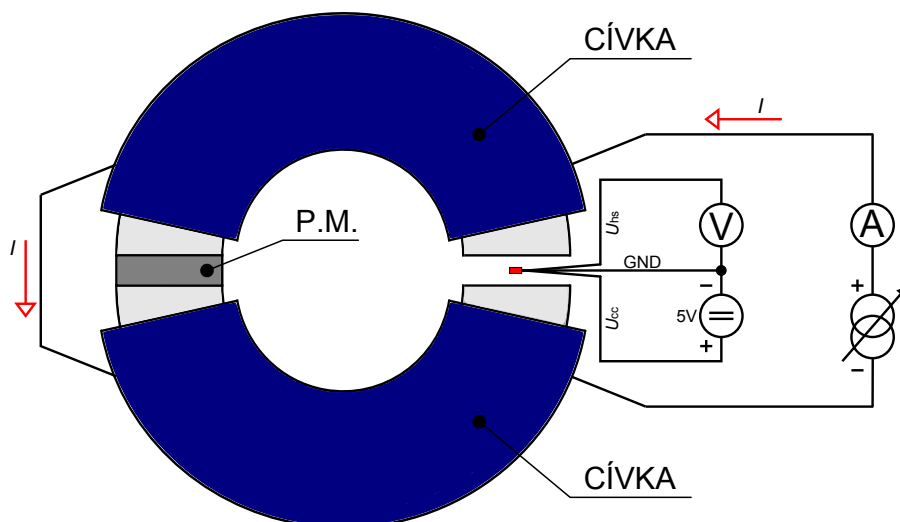


Obr. 3.3: Kalibrace Hallové sondy A1302 v solenoidu.

<sup>7</sup>Řešeno programem *Gnuplot 4.4*.

## 4 Návrh zkušebního pracoviště pro testování magnetických vlastností permanentních magnetů

Návrh zkušebního pracoviště vychází z idealizovaného návrhu, který byl popsán v podkapitole 3.2, celá sestava je schematizována na obrázku 4.1. Skládá se z permanentního magnetu (P.M.) a půleného toroidního jádra, které tvoří pólové nástavce.



Obr. 4.1: Návrh zkušebního pracoviště pro testování magnetických vlastností permanentních magnetů. V obrázku je zakreslena pro zjednodušení pouze jedna Hallova sonda.

Na každé polovině toroidního je navinuta cívka o  $N_1$  a  $N_2$  závitech. Cívky jsou zapojeny do série, takže jimi protéká stejně velký proud  $I$ . Zdrojem tohoto proudu je regulovaný stejnosměrný proudový zdroj. Velikost proudu je v obvodu měřena ampérmetrem. Směr protékajícího proudu je uvažován tak, aby v magnetickém obvodu cívky vytvářely opačný magnetický tok, než jaký je do obvodu dodáván vzorkem permanentního magnetu.

Na protější straně pólových nástavců je vzduchová mezera do které jsou vloženy dvě Hallovy sondy A1302. Hallovy sondy jsou připojeny na samostatné stejnosměrné napájení, výstupní napětí sondy je měřeno voltmetrem. Pro určení velikosti magnetické indukce  $B$  z hodnoty napětí na voltmetru je možné použít kalibračního vztahu (3.11) nebo (3.14). Pro přehlednost je v obrázku 4.1 zakreslena pouze jediná Hallova sonda, důvod případného použití dvou sond bude popsán v dalším textu. Sondy jsou umístěny v přípravku, který je vložen do nitra vzduchové mezery a zajišťuje tak mechanické upevnění obou sond,

a také přesné vymezení vzduchové mezery. Tento přípravek rovněž není pro přehlednost v obrázku 4.1 zakreslen.

## 4.1 Vzorek permanentního magnetu

Jako zkušební vzorek permanentního magnetu je pochopitelně nutné použít takový druh permanentního magnetu, který je využíván v elektromotorech s permanentními magnety. Nejdostupnějším, a také zároveň v praxi nejvíce používaným, je permanentní magnet NdFeB.

### 4.1.1 Parametry vzorku permanentního magnetu NdFeB

Pro účely této práce byly zakoupeny dva vzorky NdFeB magnetů od společnosti Neomag [11], jeden pro měření a druhý jako náhradní. Cílem bylo vybrat vzorek tvaru hranolu, jehož směr magnetování by byl ve směru tloušťky  $h_{\text{pm}}$  magnetu. Dalším kritériem byly rozměry velikostně úměrné toroidnímu jádru pro pólové nástavce a tloušťka magnetu. Po zvážení všech okolností, a také dle možností, nabízených dodavateli, byl vybrán magnet NH 099 materiálu N 35 ve tvaru hranolu o rozměrech 35 mm × 35 mm × 10 mm.

Výrobce magnetu zaručuje třívrstvou povrchovou antikorozní ochranu Nikl-Měď-Nikl. Hmotnost magnetu je 91,9 g a přibližná velikost přídržné síly přepočítaná na hmotnost je 25 kg. Výrobce dále udává Curieovu teplotu velikosti 310 °C a pracovní teplotu 80 °C. Magnetické vlastnosti uvádí tabulka 4.1.

$B_r$ (T)	$H_{cB}$ (kA·m <sup>-1</sup> )	$H_{cJ}$ (kA·m <sup>-1</sup> )	$(BH)_{\text{max}}$ (kJ·m <sup>-3</sup> )
1,18 až 1,25	≥ 859	≥ 935	263 až 294

Tab. 4.1: Magnetické vlastnosti NdFeB magnetu NH 099 z materiálu N 35.

### 4.1.2 Kontrolní vzorek

Pro kontrolu navržené metody je účelné vyzkoušet měření také na jiném materiálovém typu permanentního magnetu. Za tímto účelem bylo od společnosti Neomag zakoupeno několik vzorků feritových magnetů. Ač se tento druh permanentního magnetu pro své vlastnosti v pohonech nepoužívá, jedná se o velmi dostupný druh magnetika. Opět bylo

vzhledem ke tvaru navrženého magnetického obvodu nutno vybrat vzorek tvaru hranolu, jehož směr magnetování by byl na výšku. Dále byla nutná podmínka stejné tloušťky jako neodymový vzorek magnetu, bohužel však výrobce nedodává feritové magnety, které by měly stejné též stranové rozměry. Vybrán byl proto magnet FH011 ve tvaru hranolu o rozměrech  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ .

Výrobce definuje tento magnet jako anizotropní feritový magnet keramický materiálu F 30 o dosti velké křehkosti. Hmotnost magnetu je 78 g, velikost přídržné síly výrobce neuvádí. Dále udává Curieovu teplotu velikosti  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  a pracovní teplotu  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Magnetické vlastnosti uvádí tabulka 4.2.

$B_r$ (T)	$H_{cB}$ ( $\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$H_{cJ}$ ( $\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$(BH)_{\text{max}}$ ( $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ )
0,37 až 0,40	175 až 210	180 až 220	26 až 30

Tab. 4.2: Magnetické vlastnosti feritového magnetu FH011 z materiálu F 30.

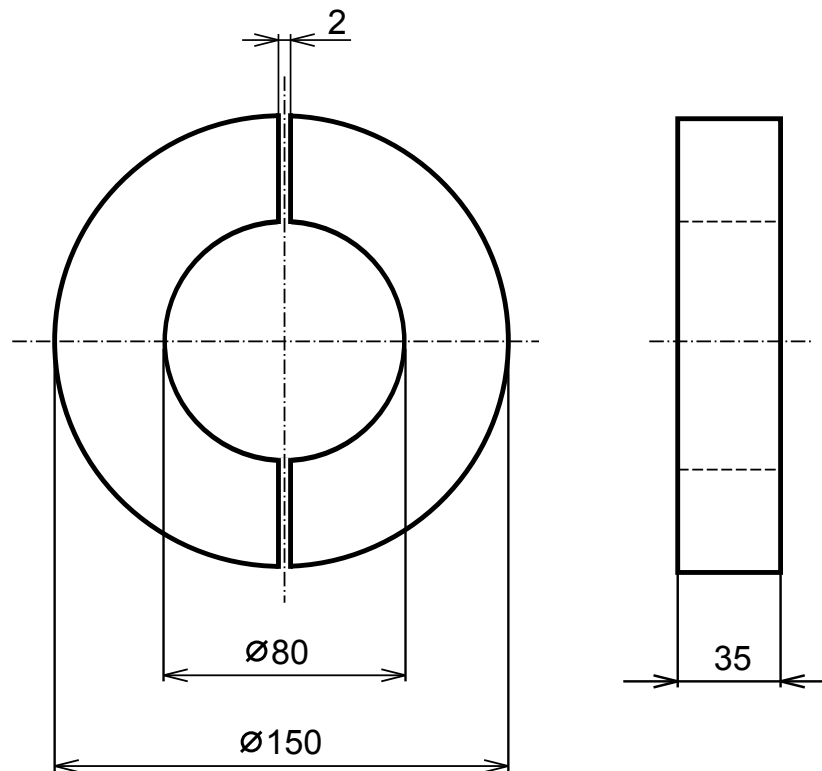
## 4.2 Pólové nástavce s cívkami

V minulé kapitole byl popsán idealizovaný model magnetického obvodu, který využíval pólových nástavců s ostrými hranami. Mezi hlavní nevýhody tohoto provedení však patří rozptylové magnetické toky právě na hranách, které již v praktickém měření zanedbat nelze, jejich určení je však značně obtížné. Bylo tedy nutné najít takový tvar, který by splňoval požadavky na nízké magnetické ztráty.

Při výrobě transformátorů splňují požadavky nízkých magnetických ztrát a symetrie toroidní jádra. Toroidní jádro představuje pásek obvykle z orientované křemíkové oceli navinutý nejčastěji do kruhového tvaru. Pro účely této práce byla oslovena společnost Vakar s.r.o., která byla schopna dodat v příznivé ceně a v krátkých časových lhůtách toroidní jádro daných rozměrů. Protože permanentní magnet je nutné vkládat do nitra magnetického obvodu, byl na společnost Vakar s.r.o. dán dále požadavek na výrobu půleného toroidní jádra, které by vytvořilo dvojici pólových nástavců, a navíc by značně usnadnilo ruční navíjení cívek.

#### 4.2.1 Mechanické provedení pólových nástavců

Mechanický návrh toroidního jádra vycházel z požadavku na konstantní průřez magnetického obvodu. Prvotní proto bylo zajištění vhodného tvaru vzorku permanentního magnetu a tvar pólových nástavců byl následně navržen a zadán k výrobě dle rozměrů tohoto permanentního magnetu.



Obr. 4.2: Pólové nástavce tvaru toroidního jádra.

Byl navržen vnější průměr toroidního jádra o průměru  $d_2 = 150$  mm. Pro vnitřní průměr  $d_1$  při vložení permanentního magnetu o rozměrech  $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  je šířka magnetu  $s = 35$  mm. Pro  $d_1$  proto platí

$$d_1 = d_2 - 2s = (150 - 2 \cdot 35) \text{ mm} = 80 \text{ mm} . \quad (4.1)$$

Pro výpočty magnetického obvodu je nutno znát délku střední siločáry  $l_{\text{Fe}}$  pólových nástavců. Od této délky je však nutno odečíst tloušťku odebraného materiálu vlivem řezání toroidního jádra. Tloušťka řezu  $t = 2$  mm. Platí tedy

$$l_{\text{Fe}} = \pi(d_1 + s) - 2t = \pi(80 + 35) \text{ mm} - 2 \cdot 2 \text{ mm} = 357 \text{ mm} = 0,357 \text{ m} . \quad (4.2)$$

Tuto délku je třeba znát pro dosazení do rovnice (3.8). Představuje jisté zjednodušení, které však vzhledem k přesnosti měřící metody lze tolerovat<sup>8</sup>.

Výška pólových nástavců opět odpovídá výšce permanentního magnetu, tedy 35 mm, a proto je shodná s šířkou  $s$ . Průřez nástavců je tedy čtvercový o velikosti

$$S_{\text{Fe}} = s^2 = 35^2 \text{ mm}^2 = 1\,225 \text{ mm}^2 = 1,225 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2. \quad (4.3)$$

#### 4.2.2 Cívky pólových nástavců

Pro ovlivňování magnetického toku, který vyvozuje v magnetickém obvodu permanentní magnet, jsou na pólových nástavcích navinuty cívky. Tyto cívky jsou na pólových nástavcích navinuty pevně a nelze je jednoduše sejmut.

Před realizací vinutí bylo zvažováno, zda jít cestou většího počtu závitů vodičem malého průřezu a malého proudu v obvodu, nebo cestou menšího počtu závitů, ale vodičem většího průřezu s možností většího proudového zatížení. Po zvážení obou variant se jevila jako výhodnější druhá možnost, která poskytuje možnost většího proudového zatížení a snazší navíjení. Problém však nastal v dostupnosti lakovaného či smaltovaného vodiče většího průřezu. Proto byla zvolena velmi dostupná alternativa, a to měděný elektromontážní propojovací vodič CY 2,5 (H05V-C) o průřezu  $S_{\text{Cu}} = 2,5 \text{ mm}^2$  s PVC izolací.

Na první pólový nástavec bylo navinuto v šesti vrstvách  $l_1 = 21 \text{ m}$  vodiče, což odpovídá  $N_1 = 116$  závitů. Uvažujeme-li měrný elektrický odpor mědi  $\rho = 0,018 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$  je odpor  $R_1$  první cívky

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S_{\text{Cu}}} = 0,018 \cdot \frac{21}{2,5} \Omega = 0,151 \Omega. \quad (4.4)$$

Na druhý pólový nástavec bylo navinuto opět v šesti vrstvách  $l_2 = 20,5 \text{ m}$  vodiče, což odpovídá  $N_2 = 110$  závitů. Pro elektrický odpor  $R_2$  druhého vinutí proto platí

$$R_2 = \rho \frac{l_2}{S_{\text{Cu}}} = 0,018 \cdot \frac{20,5}{2,5} \Omega = 0,148 \Omega. \quad (4.5)$$

Při sériovém zapojení obou cívek je celkový počet závitů

$$N = N_1 + N_2 = 107 + 104 = 211 \quad (4.6)$$

---

<sup>8</sup>Magnetické indukční čáry nejsou ve skutečnosti uvnitř prstencového jádra rozloženy rovnoměrně, ale směrem do středu se zhušťují.

a výsledný odpor

$$R = R_1 + R_2 = 0,151 \Omega + 0,148 \Omega = 0,299 \Omega . \quad (4.7)$$

Nesymetrie v počtu závitů obou cívek je způsobena nemožností přesného vymezení vzdálenosti závitů na vnější straně pólového nástavce prstencového tvaru při ručním navíjení.

Důležitým parametrem je proudová zatížitelnost. Pro vodič CY 2,5 je udávána proudová zatížitelnost na vzduchu 33 A. Je nutno však uvažovat, že vodič je navinut v několika vrstvách, což komplikuje ochlazování vodiče. Odhadem proto uvažujme zatížení 20 A jako horní mez pro dlouhodobější zatížení. Při tomto proudu je proudová hustota

$$J = \frac{I}{S_{\text{Cu}}} = \frac{20}{2,5} \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2} = 8 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2} , \quad (4.8)$$

na vinutí dochází k výkonovým ztrátám

$$P = RI^2 = 0,299 \cdot 20^2 \text{ W} = 120 \text{ W} . \quad (4.9)$$

Z hlediska maximálních přípustných teplot je výrobcem udávána pro tento typ vodiče hodnota 70 °C, při zkratu 160 °C po dobu 5 sekund.

### 4.2.3 Magnetické vlastnosti pólových nástavců

Jak již bylo uvedeno, jako pólových nástavců je použito půleného toroidního jádra. Protože se předpokládá využití jádra ve střídavých obvodech (je primárně určeno pro výrobu transformátorů), je svinuto z křemíkové pásky tloušťky 35 mm s orientovanou magnetickou strukturou. U střídavých obvodů použití pásky snižuje ztráty vířivými proudy, a to s druhou mocninou tloušťky plechu pásky.

Pro zjišťování vlastností permanentního magnetu je však nutné použít pochopitelně stejnosměrný magnetický tok. Bylo by proto možné využít prstence např. z ocelového masivu, takové těleso kruhového tvaru a konkrétních rozměrů je však prakticky nedostupné, navíc použití plechů ve stejnosměrném magnetickém obvodu není na překážku.

Poněkud problematické se však ukázalo nalezení hodnoty relativní permeability  $\mu_{\text{Fe}}$  pólových nástavců, protože výrobce toroidního jádra bohužel nedodal žádné jeho magnetické parametry. Její přesné určení však není z hlediska přesnosti měření prakticky podstatné, tento fakt je patrný v rovnici (3.7). Hodnotu relativní permeability  $\mu_{\text{Fe}}$  obsahuje pouze

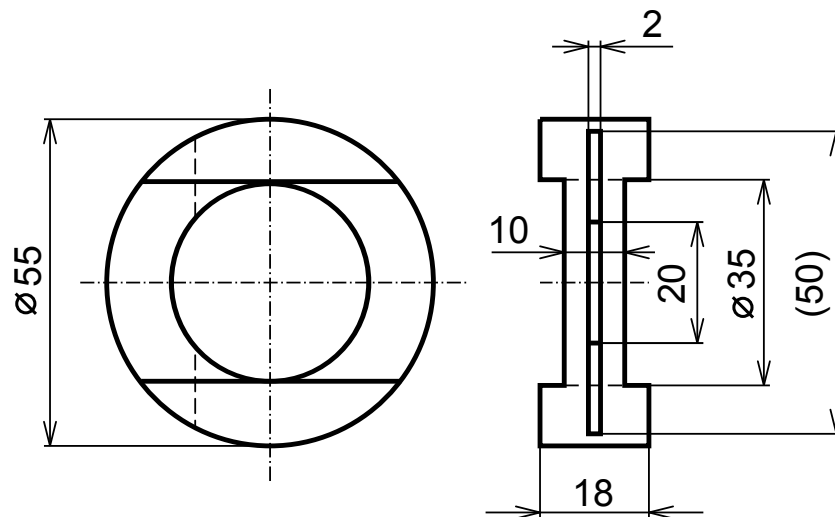


jmenovatel druhého členu levé strany rovnice, který představuje magnetické napětí pólových nástavců. Třetí člen na levé straně rovnice (3.7) naopak představuje magnetické napětí vzduchové mezery. Protože relativní permeabilita vzduchu je rovna jedné, obsahuje tento člen pouze hodnotu permeability vakua  $\mu_0$ .

Dále uvažujeme, že běžné hodnoty relativní permeability feromagnetických materiálů se pohybují v řádu  $10^3$ , a že permeabilita vakua má řád  $10^{-7}$ . Druhý člen rovnice (3.7), obsahující permeabilitu  $\mu_{Fe}$  ve jmenovateli, je proto prakticky  $1\,000\times$  menší než člen třetí. Hrubý odhad permeability  $\mu_{Fe}$  tak způsobí zanedbatelnou chybu, prakticky by bylo možné dokonce druhý člen rovnice (3.7) zanedbat. Pro další výpočty proto byla zvolena hodnota relativní permeability  $\mu_{Fe} = 8\,000$ . Ta se běžně využívá pro výpočty v oceli, navíc přibližně koresponduje s hodnotami uvedenými v [5] pro křemíkovou ocel.

#### 4.2.4 Měření ve vzduchové mezeře

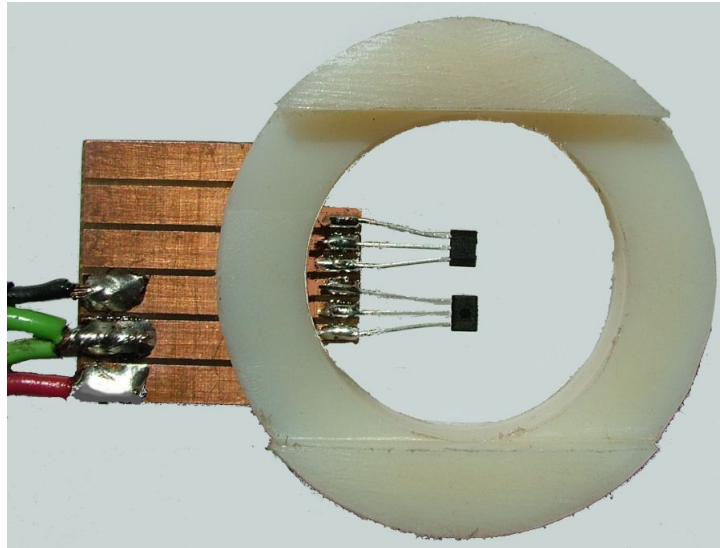
Mezi oběma pólovými nástavci se nachází mezeře o velikosti  $h_0 = 10\text{ mm}$ . Do této mezery je vkládán přípravek z plastické hmoty, který zaručuje vymezení rozměry a mechanické upevnění Hallových sond A1302, které jsou použity pro měření magnetické indukce  $B_{pm}$  v obvodu. Díky svému tvaru a přesným rozměrům je pevně ve vodorovném směru nasunut na konce obou pólových nástavců. Celá sestava je schematizována na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Přípravek pro upevnění Hallových sond ve vzduchové mezeře.

#### 4.2.5 Hallova sonda v magnetickém obvodu

Jak je z obrázku patrné, je do pláště válce přípravku vyříznuta příčně spára, která slouží k upevnění Hallovy sondy. Mechanicky je toto upevnění vyřešeno tak, že je vyrobena deska plošného spoje, na které jsou sondy připájeny. Plošný spoj je pak vložen do spáry přípravku, viz. obrázek 4.4.



Obr. 4.4: Přípravek pro upevnění Hallovy sondy ve vzduchové mezeře s plošným spojem a dvěma Hallovy sondami.

Základní měření probíhá tak, že je měřeno napětí  $U_{hs}$  na jedné Hallovy sondě a k výpočtu hodnoty magnetické indukce je používán kalibrační vztah (3.11) pro sondu A1302, alternativně je možné použít vztahu (3.14). Protože rozměry sondy A1302 jsou dostatečně malé, byla do přípravku umístěna ještě druhá Hallova sonda A1302, která je otočena o  $180^\circ$ . Ta umožňuje případné měření opačného toku, rozdílové měření, apod. Pro měření základní však druhá sonda potřebná není. Napájení Hallovy sondy je z vnějšího laboratorního zdroje, jak je uvedeno v tabulce 3.1, sonda vyžaduje stejnosměrné napájení o velikosti napětí 5 V. Zapojení sondy je na obrázku 4.1.

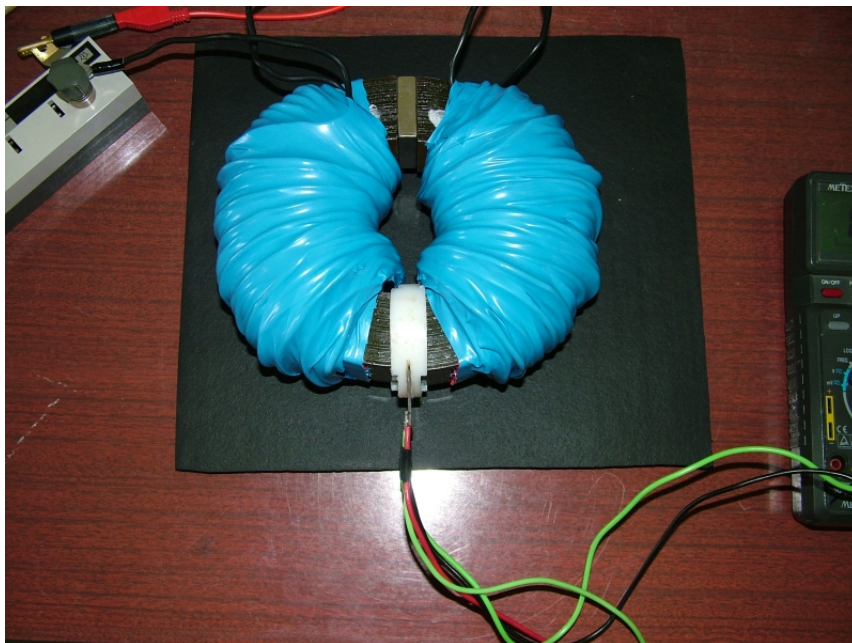
Je evidentní, že přípravek zmenšuje plochu vzduchové mezery<sup>9</sup>. Plasty však nevykazují prakticky žádné magnetické vlastnosti, tudíž lze vliv na magnetické pole neuvažovat.

<sup>9</sup>Tvarem se jedná o kruh vepsaný do čtverce. Jak lze jednoduše vypočítat, kruh má o 21 % menší plochu než čtverec.

Jistým zjednodušením je však zanedbání rozptylového toku ve vzduchové mezeře. Předpokládejme však, že tento vliv vzhledem k přesnosti dané měřicí metody není nutné uvažovat.

### 4.3 Měření vlastností permanentních magnetů

Samotné měření využívá metodiky, která byla popsána v podkapitole 3.2. Cílem měření je nalezení funkční závislosti  $B_{\text{pm}} = f(H_{\text{pm}})$ , v dlouhodobém horizontu pak ověření neměnnosti magnetických vlastností daného vzorku permanentních magnetů.



Obr. 4.5: Realizované zkušební pracoviště s vloženým vzorkem NdFeB magnetu.

#### 4.3.1 Postup a cíl měření

Výstupními veličinami měření je proud  $I$  protékající cívkami na pólových nástavcích, a dále výstupní napětí  $U_{\text{hs}}$  měřené na Hallově sondě. S využitím kalibračního vztahu (3.11) lze z hodnoty napětí  $U_{\text{hs}}$  určit velikost magnetické indukce  $B_{\text{pm}}$  v obvodu. Do série s cívkami a regulovatelným proudovým zdrojem je zařazen ampérmetr, kterým je měřen proud  $I$  protékající cívkami.

Protože jsou známy hodnoty permeabilit a geometrické rozměry sestavy, lze hodnoty

$B_{\text{pm}}$  a  $I$  dosadit do vzorce (3.8). Tím je možné určit magnetickou intenzitu  $H_{\text{pm}}$ . Změnou proudu  $I$  tak lze v celém rozsahu dosažitelných hodnot  $B_{\text{pm}}$  nalézt výše uvedenou funkční závislosti  $B_{\text{pm}} = f(H_{\text{pm}})$ . Limitními hodnotami měření jsou maximální přípustný proud cívku a měřicí rozsah Hallovy sondy. Měření by pro kontrolu mělo být prováděno jak při zvyšování, tak při snižování proudu  $I$ , předpokládá se však dosažení prakticky identických hodnot.

### 4.3.2 Měření v dlouhodobém horizontu

Jak je v úvodu celé práce uvedeno, celá myšlenka realizace testovacího pracoviště není založena na jednorázovém měření vzorku permanentního magnetu, ale na dlouhodobém proměřování vzorků, které byly přímo provozovány v motorech s permanentními magnety, nebo byly vystaveny vnějším vlivům, které mohly způsobit jejich magnetickou degradaci. Protože princip měření je založen na magnetickém namáhání magnetu stejnosměrným magnetickým tokem opačného směru, lze v dlouhodobém horizontu dle změn funkční závislosti  $B_{\text{pm}} = f(H_{\text{pm}})$  usuzovat na kvalitu a míru degradace magnetických vlastností měřených vzorků.

## 5 Ověření vlastností navrženého pracoviště pro testování magnetických vlastností permanentních magnetů

Na základě předešlých návrhů, výpočtů a realizace bylo dne 13. května 2011 provedeno měření v laboratoři Katedry elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě Dopravní fakulty Jana Pernera, které mělo prakticky ověřit navržený způsob testování vlastností permanentních magnetů a jeho případné budoucí využívání v praxi. Pro toto měření byly použity vzorky permanentních magnetů uvedené v kapitole 4.



Obr. 5.1: Měřící pracoviště připravené dne 13. května 2011 k ověření své funkčnosti.

### 5.1 Příprava měření

Pro samotnou realizaci měření bylo nutné vybrat vhodné přístroje a zařízení. Využity byly pouze měřící přístroje a zařízení, kterými disponuje laboratoř katedry.

#### 5.1.1 Přístrojové vybavení

Pro realizaci měření bylo nutné zajistit:

1. Regulovatelný proudový zdroj, který může do cívek obvodu dodat stejnosměrný proud cca do 25 A,
2. Stabilizovaný napěťový zdroj o výstupním napětí 5 V pro napájení Hallovy sondy,
3. Ampérmetr vhodného rozsahu pro měření proudu protékajícího cívkami,
4. Voltmetr vhodného rozsahu pro měření napětí na Hallově sondě,
5. Ostatní příslušenství jako propojovací vodiče apod.

Pro napájení cívek byl k dispozici laboratorní proudový napájecí zdroj s možností plynulé regulace proudu do 30 A, jako napěťový zdroj pro napájení Hallovy sondy byl použit laboratorní napájecí zdroj s možností průběžné kontroly výstupního napětí na číslicovém displayi.

Hodnotu proudu protékajícího cívkami bylo možné odečítat na číslicovém displayi proudového zdroje, k měření však byl použit běžný multimetr. Ten však umožňuje proudová měření pouze do hodnoty 20 A, a to pouze po omezený čas řádu sekund. Do obvodu proto bylo nutné zařadit bočník, na kterém bylo měřeno napětí. Tento bočník měl převod 1 A/1 mV. Pro měření napětí na Hallově sondě byl použit rovněž běžný multimetr.

Pro omezení proudu byly sériově s cívkou zařazeny dva paralelně zapojené reostaty. Paralelní kombinace byla zvolena z důvodu maximálního výkonu reostatů. Důvod zařazení těchto reostatů byl spíše bezpečnostní, aby v případě spojení nakrátko byl v obvodu zařazen spotřebič.

### 5.1.2 Kontrola před měřením

Před samotným měřením byla kontrola vlastností magnetického obvodu s cívkami. Přestože je vinutí cívek provedeno vodičem s PVC izolací a samotné vinutí není realizováno přímo na kov jádra, ale je odděleno další PVC izolací, bylo pro kontrolu provedeno měření elektrického odporu mezi vodiči vinutí a jádrem. Měření potvrdilo, že nedošlo k proříznutí izolace, a tím ke znehodnocení cívek.

Další kontrolou bylo ověření, zda při navíjení nedošlo k přelomení měděného vodiče cívek. Měření elektrického odporu vinutí potvrdilo, že vodič nebyl navíjením přerušen.

## 5.2 Realizace měření

Protože kontrola před měření potvrdila, že obvod není poškozen, bylo možné přistoupit k samotné realizaci měření postupně na obou vzorcích magnetů.

### 5.2.1 Měření s NdFeB magnetem

Měření na NdFeB magnetu byl prováděno v rozsahu proudů od 0 A do 25 A, a to celkem třikrát. První měření bylo provedeno s proudovým krokem 0,5 A, kdy byl proud postupně navyšován, jeho směr byl zvolen, tak aby v magnetickém obvodu vytvořil opačný magnetický tok. Při tomto měření bylo dosaženo maximálního proudu cívkami 17,5 A. Vyšší hodnotu proudu nebylo možné nastavit vzhledem k sériovému zařazení reostatů.

Druhé měření bylo realizováno jako kontrolní. Byl provedeno tak, že se proud tekoucí cívkami s krokem 0,5 A opět snižoval. Toto měření mělo ověřit, zda se neliší hodnoty ve směru vzestupném a sestupném. Byly získány prakticky identické hodnoty výstupních napětí Hallovy sondy pro dané proudy jako v prvním měření. Pro další výpočty bylo proto použito pouze prvního měření.

Pro třetí měření byly z obvodu vyřazeny reostaty, aby bylo možné docílit vyššího proudu obvodem. S krokem po 5 A byl navyšován z nulové hodnoty proud, a to až na hodnotu 25 A. Protože při proudech nad 20 A prakticky nedocházelo ke změně výstupního napětí na Hallově sondě, bylo evidentní, že došlo k dosažení minimální hodnoty výstupního napětí sondy.

Pro vyhodnocení měření a další výpočty proto byly v případě NdFeB použity data z prvního a třetího měření. Naměřené a vypočtené hodnoty uvádí tabulka 5.1, pro výpočty hodnot  $H_{\text{pm}}$  a  $B_{\text{pm}}$  byl použit program *MS Excel 2003*. Tato data byla následně pomocí programu *Gnuplot 4.4* zakreslena do grafu, viz. obrázek 5.2.

Tab. 5.1: Měření závislosti magnetické indukce  $B_{\text{pm}}$  na magnetické intenzitě  $H_{\text{pm}}$  pro neodymový magnet.

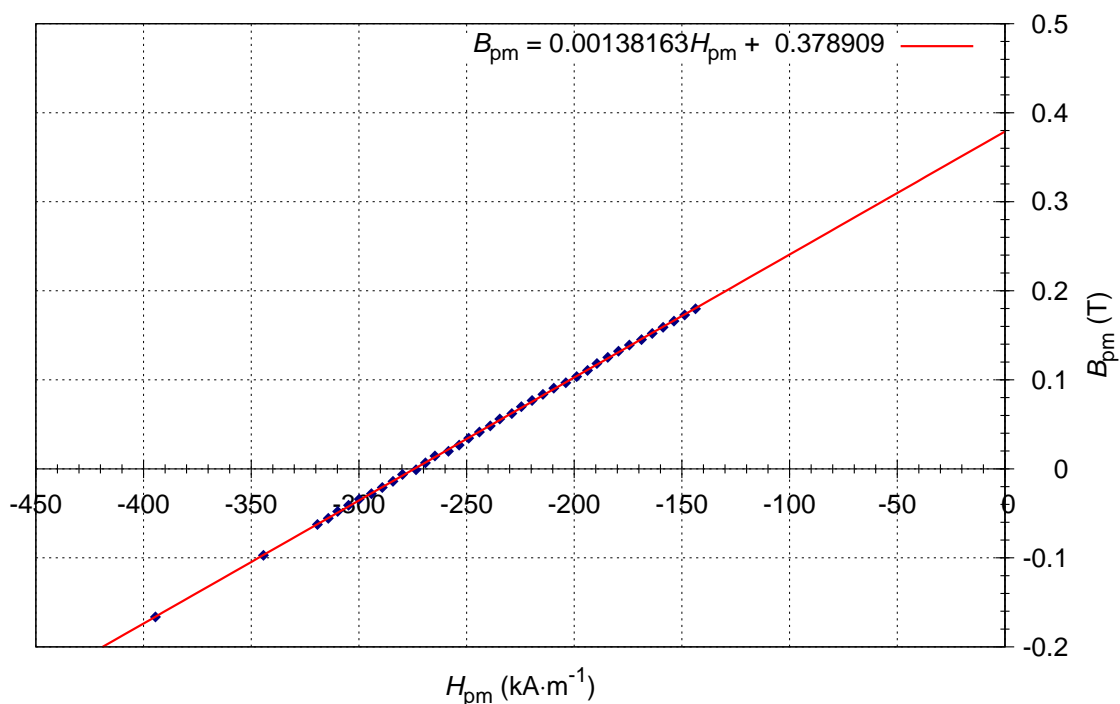
$I$ (A)	$U_{\text{hs}}$ (V)	$H_{\text{pm}}$ (kA·m <sup>-1</sup> )	$B_{\text{pm}}$ (T)
0,0	4,85	-143,6937	0,1798
0,5	4,76	-148,7099	0,1728
1,0	4,67	-153,7261	0,1659

*(pokračování tabulky 5.1 na další stránce)*

<i>(pokračování tabulky 5.1 z předchozí stránky)</i>			
$I$ (A)	$U_{hs}$ (V)	$H_{pm}$ (kA·m <sup>-1</sup> )	$B_{pm}$ (T)
1,5	4,58	-158,7423	0,1590
2,0	4,49	-163,7585	0,1521
2,5	4,40	-168,7747	0,1452
3,0	4,32	-174,4058	0,1390
3,5	4,23	-179,4220	0,1321
4,0	4,14	-184,4382	0,1252
4,5	4,05	-189,4544	0,1182
5,0	3,95	-193,8558	0,1105
5,5	3,86	-198,8720	0,1036
6,0	3,77	-203,8882	0,0967
6,5	3,69	-209,5193	0,0905
7,0	3,60	-214,5355	0,0836
7,5	3,51	-219,5517	0,0767
8,0	3,42	-224,5679	0,0698
8,5	3,32	-228,9692	0,0621
9,0	3,24	-234,6003	0,0559
9,5	3,14	-239,0017	0,0482
10,0	3,05	-244,0179	0,0413
10,5	2,96	-249,0341	0,0344
11,0	2,86	-253,4354	0,0267
11,5	2,77	-258,4516	0,0198
12,0	2,70	-264,6976	0,0144
12,5	2,60	-269,0989	0,0067
13,0	2,50	-273,5003	-0,0010
13,5	2,43	-279,7462	-0,0064
14,0	2,33	-284,1476	-0,0141
14,5	2,24	-289,1638	-0,0210
15,0	2,15	-294,1800	-0,0279
15,5	2,07	-299,8111	-0,0341
16,0	1,98	-304,8273	-0,0410
16,5	1,89	-309,8435	-0,0479
17,0	1,79	-314,2448	-0,0556
17,5	1,70	-319,2610	-0,0625
20,0	1,25	-344,3421	-0,0972

*(Konec tabulky 5.1)*





Obr. 5.2: Graf měření závislosti magnetické indukce  $B_{pm}$  na magnetické intenzitě  $H_{pm}$  pro neodymový magnet. V grafu je též vynesena hodnota  $H_{pm}$  při proudu 25 A, při které však již indukce  $B_{pm}$  není měřena spolehlivě.

Z grafu je patrný přímkový průběh závislosti  $B_{pm} = f(H_{pm})$ . Bylo proto možné aplikovat lineární regresi, regresní vztah vypočetl z měřených dat program *Gnuplot 4.4* ve tvaru

$$B_{pm} = 0,00138163H_{pm} + 0,378909. \quad (5.1)$$

Jistou slabinou grafu je však nepokrytí celé demagnetizační křivky, a tím nemožnost určení skutečného průběhu při větších hodnotách indukce  $B_{pm}$ . To by bylo teoreticky možné při otočení směru proudu cívkami s postupným navyšovaní magnetického toku, a tím k možnosti pokrýt celý graf. Toto měření však nebylo možné realizovat, neboť by došlo k překročení kritické magnetické indukce, při které se již Hallova sonda A1302 nechová lineárně. Z obrázku 1.1 je však patrné, že demagnetizační křivky NdFeB magnetů jsou přímkové. Proložení přímkou proto lze realizovat v celém rozsahu a lze ho považovat za správné.

### 5.2.2 Měření s feritovým magnetem

Jako kontrolní vzorek pro ověření metody měření byl použit feritový magnet, postup měření byl shodný s postupem měření NdFeB magnetu. První měření probíhalo opět v rozsahu proudů od 0 A až 17,5 A. Druhé měření bylo opět se snižováním proudu zpět na 0 A, opět byly získány prakticky totožné hodnoty, takže pro další zpracování byla použita data pouze z prvního měření.

Třetí měření bylo opět provedeno stejně jako v případě NdFeB magnetu. Při tomto měření však již byla překročena hodnota koercitivní magnetické intenzity feritu. Tento stav způsobil vypadnutí magnetu z obvodu a nutnost měření opakovat. Později se též ukázalo, že došlo poškození magnetických domén ve feritu, a tím k poškození magnetických vlastností permanentního magnetu.

Tabulka 5.2 s měřeními daty pro ferit proto obsahuje pouze hodnoty pro proudy do 17 A. Jak je z této tabulky patrné, při proudu 17 A byl ferit vystaven magnetické intenzitě  $H_{\text{pm}} = -222,0150 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ , což je dle tabulky 4.2 již nad hranicí vnitřní koercitivity  $H_{\text{cJ}}$ .

Tab. 5.2: Měření závislosti magnetické indukce  $B_{\text{pm}}$  na magnetické intenzitě  $H_{\text{pm}}$  pro feritový magnet.

$I$ (A)	$U_{\text{hs}}$ (V)	$H_{\text{pm}}$ ( $\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$B_{\text{pm}}$ (T)
0,0	3,40	-54,5382	0,0682
0,5	3,31	-59,5544	0,0613
1,0	3,21	-63,9557	0,0536
1,5	3,13	-69,5868	0,0475
2,0	3,03	-73,9881	0,0398
2,5	2,95	-79,6192	0,0336
3,0	2,86	-84,6354	0,0267
3,5	2,76	-89,0368	0,0190
4,0	2,68	-94,6679	0,0128
4,5	2,58	-99,0692	0,0052
5,0	2,49	-104,0854	-0,0018
5,5	2,40	-109,1016	-0,0087
6,0	2,32	-114,7327	-0,0148
6,5	2,22	-119,1340	-0,0225
7,0	2,13	-124,1503	-0,0295
7,5	2,03	-128,5516	-0,0372

*(pokračování tabulky 5.2 na další stránce)*

<i>(pokračování tabulky 5.2 z předchozí stránky)</i>			
$I$ (A)	$U_{\text{hs}}$ (V)	$H_{\text{pm}}$ (kA·m <sup>-1</sup> )	$B_{\text{pm}}$ (T)
8,0	1,94	-133,5678	-0,0441
8,5	1,85	-138,5840	-0,0510
9,0	1,77	-144,2151	-0,0572
9,5	1,67	-148,6164	-0,0648
10,0	1,58	-153,6327	-0,0718
10,5	1,50	-159,2637	-0,0779
11,0	1,41	-164,2799	-0,0848
11,5	1,30	-168,0664	-0,0933
12,0	1,22	-173,6975	-0,0995
12,5	1,13	-178,7137	-0,1064
13,0	1,02	-182,5002	-0,1148
13,5	0,92	-186,9015	-0,1225
14,0	0,83	-191,9177	-0,1295
14,5	0,74	-196,9340	-0,1364
15,0	0,65	-201,9502	-0,1433
15,5	0,56	-206,9664	-0,1502
16,0	0,46	-211,3677	-0,1579
16,5	0,38	-216,9988	-0,1641
17,0	0,29	-222,0150	-0,1710

*(Konec tabulky 5.2)*

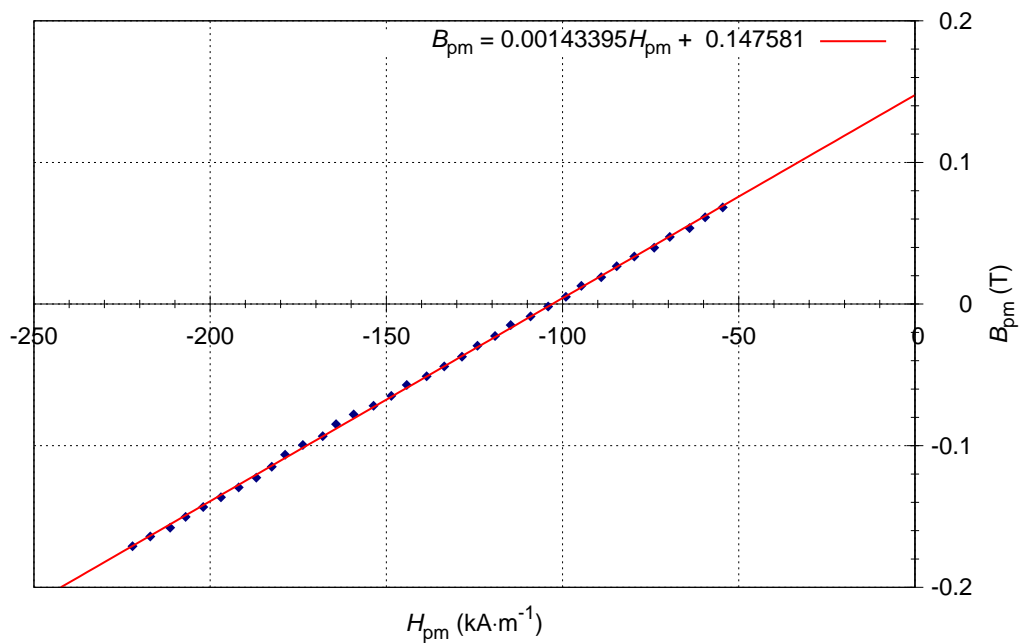
Grafický průběh závislosti  $B_{\text{pm}} = f(H_{\text{pm}})$  je na obrázku 5.3. Patrný je opět přímkový průběh. Bylo proto možné aplikovat lineární regresi, regresní vztah vypočetl z měřených dat program *Gnuplot 4.4* ve tvaru

$$B_{\text{pm}} = 0,00143395H_{\text{pm}} + 0,147581. \quad (5.2)$$

Slabinou grafu je opět nepokrytí celé demagnetizační křivky, a tím nemožnost určení skutečného průběhu při větších hodnotách indukce  $B_{\text{pm}}$ . Z obrázku 1.1 je však patrné, že také demagnetizační křivky feritových magnetů jsou přibližně přímkové. Proložení přímkou proto lze realizovat v celém rozsahu a lze ho považovat za správné.

### 5.3 Problémy a komplikace během měření

Během celého měření nenastaly žádné komplikace, vyjma již zmíněného vypadávání feritu z magnetického obvodu. Během měření proto bylo nutné provizorní upevnění magnetu



Obr. 5.3: Graf měření závislosti magnetické indukce  $B_{pm}$  na magnetické intenzitě  $H_{pm}$  pro feritový magnet.

v magnetickém obvodu.

Jako problematické se též ukázalo vkládání NdFeB magnetu mezi půlené toroidní jádro, a též oddělení obou půlek při vyjímání magnetu. Jednalo se o riskantní operace, neboť díky vzájemnému přitažlivému silovému působení mezi magnetem a pólovými nástavci prakticky nešlo tyto akce provádět šetrně. Hrozilo tak mechanické poškození permanentního magnetu, případně i jiné části celé sestavy.

Pro vyřešení obou zmíněných problémů je proto do budoucna nutné navrhnout mechanický přípravek, který by obě operace umožnil provádět šetrně.

## Závěr

Tato bakalářská práce si vytkla za cíl najít cestu budoucího směřování k vyřešení metodiky měření permanentních magnetů pro elektrické pohony. Ač se tato práce celé široké problematice dotýká velmi okrajově, a z daleka ji proto celou nepostihuje, z výsledků ověření modelového testovacího pracoviště lze konstatovat, že nastavený směr je patrně správný. V budoucnosti je však nutno vyřešit některé problémy a náměty, které bakalářská práce přinesla.

Jedním z takových námětů je realizace většího magnetického obvodu, ve kterém by bylo možné měřit při vyšších magnetických tocích. S tím by ovšem souviselo i nalezení jiného způsobu měření magnetické indukce. Použitá Hallova sonda je prvkem optimálním z hlediska linearity, ovšem rozsah možného měření je dosti omezený. To by také umožnilo realizaci magnetického obvodu bez vzduchové mezery. Uvažme také, že není nutno se omezovat pouze na stejnosměrná magnetická měření. Měřící zařízení by mělo být univerzální. Mělo by tedy umožnit působení na magnet komutovaným či dokonce střídavým magnetickým polem, a tím získat možnost ověřovat další vlastnosti permanentních magnetů.

Celé budoucí zařízení použitelné v praxi by také mělo být uživatelsky komfortní. Tzn., že součástí měřícího zařízení by měly být měřící přístroje, které by umožnily obsluhu přímé odečítání hodnoty magnetické indukce a intenzity. Otevírá se zde tak i možnost propojení s počítačem. V neposlední řadě je také nutno nově uvažovat o koncepci mechanického provedení celého budoucího pracoviště, ostatně problémy nastávají při manipulaci s permanentními magnety byly zmíněny v předchozí kapitole.

Problémů a námětů pro budoucí práci je tedy mnoho. Skutečným cílem bakalářské práce proto bylo alespoň částečně k jejich řešení přispět.

## Seznam použité literatury

- [1] DUFEK, Milan; HRÁBEK, Jaroslav; TRNKA, Zdeněk. *Magnetická měření*. Praha: SNTL, 1964. 404 s.
- [2] HAJKO, Vladimír; POTOCKÝ, Ladislav; ZENTKO, Anton. *Magnetizačné procesy*. Bratislava: Alfa, 1982. 320 s.
- [3] FUKA, Josef; HAVELKA, Bedřich. *Elektrina a magnetismus*. Praha: SPN, 1979. 656 s.
- [4] HORÁK, Zdeněk; KRUPKA, František; ŠINDELÁŘ, Václav. *Technická fyzika*. Praha: SNTL, 1961. 1 434 s.
- [5] BROŽ, Jaromír; ROSKOVEC, Vladimír; VALOUCH, Miloslav. *Fyzikální a matematické tabulky*. Praha: SNTL, 1980. 308 s.
- [6] GIERAS, Jacek, F.; WING Mitchell. *Permanent Magnet Motor Technology, Design And Applications*. Secod Edition. New York: Marcel Dekker, 2002. ISBN 0-8247-0739-7
- [7] BEZOUŠEK, Pavel; SCHEJBAL, Bohumil. *Elektrotechnika*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2002. 173 s. ISBN 80-7194-409-2
- [8] *Supermagnety.cz* [online]. 2003 [cit. 2011-03-26]. Permanentní magnety. Dostupné z WWW: <http://www.supermagnety.cz/>.
- [9] *VIMEX trading a. s.* [online]. 2010 [cit. 2011-04-14]. Permanentní magnety a magnetické systémy. Dostupné z WWW: <http://www.plzen-info.cz/vimex/>.
- [10] Allegro MicroSystems, Inc. *A1301 and A1302: Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors* [online]. 2005 [cit. 2011-04-27]. Datasheet. Dostupné z WWW: [http://www.gme.cz/\\_dokumentace/dokumenty/533/533-448/dsh.533-448.1.pdf](http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/533/533-448/dsh.533-448.1.pdf).
- [11] *Neomag* [online]. 2003 [cit. 2011-05-01]. Výroba a prodej magnetických systémů. Dostupné z WWW: <http://www.neomag.cz/>.

## Seznam obrázků

1.1	Demagnetizační křivky různých látky pro permanentní magnety. Obrázek byl v nezměněné formě převzat z [8]. . . . .	18
2.1	Procentní úbytek hmotnosti permanentních magnetů struktury $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ a $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , které byly vystaveny teplotě $130^\circ\text{C}$ a tlaku $300\text{ kPa}$ v nasycené vodní páře. Obrázek byl v nezměněné formě převzat z [8]. . . . .	23
3.1	Magnetický obvod s permanentním magnetem (P.M.), cívkou a senzorem pro měření velikosti magnetické indukce $B$ . . . . .	29
3.2	Demagnetizační křivka permanentního magnetu v magnetickém obvodu. . .	31
3.3	Kalibrace Hallovy sondy A1302 v solenoidu. . . . .	34
4.1	Návrh zkušebního pracoviště pro testování magnetických vlastností permanentních magnetů. V obrázku je zakreslena pro zjednodušení pouze jedna Hallova sonda. . . . .	35
4.2	Pólové nástavce tvaru toroidního jádra. . . . .	38
4.3	Přípravek pro upevnění Hallových sond ve vzduchové mezeře. . . . .	41
4.4	Přípravek pro upevnění Hallových sond ve vzduchové mezeře s plošným spojem a dvěma Hallovými sondami. . . . .	42
4.5	Realizované zkušební pracoviště s vloženým vzorkem NdFeB magnetu. . . .	43
5.1	Měřicí pracoviště připravené dne 13. května 2011 k ověření své funkčnosti. . . .	45
5.2	Graf měření závislosti magnetické indukce $B_{\text{pm}}$ na magnetické intenzitě $H_{\text{pm}}$ pro neodymový magnet. V grafu je též vynesena hodnota $H_{\text{pm}}$ při proudu $25\text{ A}$ , při které však již indukce $B_{\text{pm}}$ není měřena spolehlivě. . . . .	49
5.3	Graf měření závislosti magnetické indukce $B_{\text{pm}}$ na magnetické intenzitě $H_{\text{pm}}$ pro feritový magnet. . . . .	52

## Seznam tabulek

2.1	Příklady průměrných teplotních koeficientů permanentních magnetů ze vzácných zemin. Hodnoty byly převzaty z [9]. . . . .	26
3.1	Vybrané fyzikální parametry Hallovy sondy A1302. Data byly s úpravami převzata z dokumentu [10], který obsahuje kompletní fyzikální parametry tohoto prvku. . . . .	33
4.1	Magnetické vlastnosti NdFeB magnetu NH 099 z materiálu N 35. . . . .	36
4.2	Magnetické vlastnosti feritového magnetu FH 011 z materiálu F 30. . . . .	37
5.1	Měření závislosti magnetické indukce $B_{pm}$ na magnetické intenzitě $H_{pm}$ pro neodymový magnet. . . . .	47
5.2	Měření závislosti magnetické indukce $B_{pm}$ na magnetické intenzitě $H_{pm}$ pro feritový magnet. . . . .	50



## Seznam použitých značek veličin

Následující tabulka uvádí seznam značek měřených či počítaných veličin, které jsou v bakalářské práci použity. Pro značení vektorů je v textu využito značení tučným zkoseným písmem, příklad:  $B$  – velikost magnetické indukce,  $\mathbf{B}$  – vektor magnetické indukce.

Značka	Význam	Jednotka
$B$	Magnetická indukce (obecně)	T
$B_0$	Magnetická indukce ve vzduchu	T
$B_i$	Příspěvek magnetická indukce ve feromagnetiku	T
$B_{\text{pm}}$	Magnetická indukce v obvodu s permanentním magnetem	T
$B_r$	Remanentní magnetická indukce (obecně)	T
$e$	Náboj elektronu, $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C	C
$\Phi$	Magnetický tok (obecně)	Wb
$(BH)_{\text{max}}$	Maximální energetický součin	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
$D$	Střední průměr (obecně)	m
$d_1, d_2$	Vnitřní a vnější průměr toroidního jádra	m
$H$	Intenzita magnetického pole (obecně)	$\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$
$H_{\text{pm}}$	Intenzita magnetického pole permanentního magnetu	$\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$
$H_c$	Koercitivní intenzita magnetického pole	$\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$
$H_{\text{cB}}$	Skutečná koercitivní intenzita magnetického pole	$\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$
$H_{\text{cJ}}$	Vnitřní koercitivní intenzita magnetického pole	$\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$
$h_0$	Šířka vzduchové mezery	m
$h_{\text{pm}}$	Tloušťka permanentního magnetu	m
$I$	Elektrický proud (obecně)	A
$I_i$	Elektrický proud vázaný	A
$i$	Proud vyvolaný elektronovou smyčkou	A
$J$	Proudová hustota (obecně)	$\text{A} \cdot \text{mm}^2$
$l$	Délka (obecně)	m
$l_1, l_2$	Délka vodiče 1. a 2. cívky	m
$l_{\text{Fe}}$	Délka pólových nástavců	m
$\chi_{\text{m}}$	Magnetická susceptibilita	—
$N$	Celkový počet závitů cívek	—
$N_1, N_2$	Počet závitů 1. a 2. cívky	—
$m_e$	Magnetický moment elektronu	$\text{A} \cdot \text{m}^2$
$\mu_0$	Magnetická permeabilita vakua, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
$\mu_{\text{Fe}}$	Relativní magnetická permeabilita pólových nástavců	—
$\mu_r$	Relativní permeabilita materiálu (obecně)	—
$\mu$	Magnetická permeabilita látky	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
$\mu_{\text{rev}}$	Relativní reverzibilní permeabilita	—
$\mu_{\text{rev}}$	Reverzibilní permeabilita	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
$P$	Ztrátový výkon na cívkách	W
$R_H$	Hallova materiálová konstanta	$\text{m}^3 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
$R$	Celkový elektrický odpor cívek	$\Omega$
$R_1, R_2$	Elektrický odpor 1. a 2. cívky	$\Omega$
$\varrho$	Měrný elektrický odpor (obecně)	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$

*(pokračování seznamu na další stránce)*

# Příloha 1

<i>(pokračování seznamu z předchozí stránky)</i>		
<b>Značka</b>	<b>Význam</b>	<b>Jednotka</b>
$s$	Šířka permanentního magnetu	m
$S$	Plocha, průřez (obecně)	m <sup>2</sup>
$S_{Cu}$	Průřez vodiče cívek	mm <sup>2</sup>
$S_{Fe}$	Průřez magnetického obvodu	m <sup>2</sup>
$t$	Šířka řezu při půlení jádra	m
$T$	Teplota (obecně)	°C
$T_C$	Teplota Curieova	°C
$U_{m0}$	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře	A
$U_{mFe}$	Magnetické napětí pólových nástavců	A
$U_{mpm}$	Magnetické napětí permanentního magnetu	A
$U_H$	Hallovo napětí	V
$U_{hs}$	Výstupní napětí Hallovy sondy	V
$v$	Obvodová rychlost elektronu	m·s <sup>-1</sup>

*(Konec seznamu)*