

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Měření na magnetických otevřených vzorcích**

**vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**

**2011**

**autor: Ondřej Weiss**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky  
Akademický rok: 2009/2010

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

Jméno a příjmení: **Ondřej WEISS**

Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Magnetická měření na otevřených vzorcích**

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

1. Shrňte parametry magnetických materiálů.
2. Sestavte podrobný přehled pro měření na otevřených vzorcích.
3. Vysvětlete rozdíly, výhody a nevýhody pro otevřené a uzavřené vzorky.

Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **dle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


1. **Draxler K., Kašpar P., Ripka P.: Magnetické prvky a měření, ISBN 80-01-01080-5, ČVUT Praha: 1994.**
2. **Dufek M., Hrabák J., Trnka Z.: Magnetická měření, SNTL Praha: 1964.**
3. **IEEE Transactions on Magnetics**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Boček, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **12. října 2009**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **4. června 2010**



Doc. Ing. Jiří Kotlan, CSc.  
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 12. října 2009

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku měření feromagnetických otevřených vzorků. Popisují se zde detailně jednotlivé metody měření, přístroje používané k dané metodě a názorné zapojení. Pro úplnost jsou zde vysvětleny parametry, jež se snažíme těmito měřeními zjistit jak pro stejnosměrné, tak i pro střídavé magnetování.

## **Klíčová slova**

Feromagnetický, hysterezní smyčka, permeabilita, koercitivita, remanence, otevřený vzorek, magnetování, indukce

## **Abstract**

The present thesis is focused on the measurement of open ferromagnetic samples. Describe here in detail the various methods of measuring devices used for the method and illustrative diagrams. For completeness, here are explained by the parameters that we try to check these measurements for both DC as well as for alternating magnetization.

## **Key words**

Ferromagnetic, hysteresis loop, permeability, coercivity, remanence, open sample, magnetization, induction

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 15.7.2011

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Také své rodině, která mi cestu za vzděláním neustále umožňovala a podporovala.

# Obsah

ÚVOD .....	1
SEZNAM SYMBOLŮ .....	2
<b>1 PARAMETRY MAGNETICKÝCH PRVKŮ .....</b>	<b>3</b>
1.1 ZÁKLADNÍ VELIČINY MAGNETICKÉHO POLE.....	3
1.2 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ.....	5
1.2.1 Diamagnetické materiály ( $\mu_r > 1$ ).....	5
1.2.2 Paramagnetické materiály ( $\mu_r > 1$ ).....	5
1.2.3 Feromagnetické materiály ( $\mu_r \gg 1$ ) .....	6
1.3 FEROMAGNETICKÉ MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V ELEKTROTECHNICE .....	6
1.3.1 Magneticky měkké materiály.....	7
1.3.2 Magneticky tvrdé materiály .....	7
1.4 PŘEHLED PARAMETRŮ FEROMAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ .....	7
1.4.1 Magnetizační charakteristiky.....	7
1.4.2 Koercitivita a remanence .....	9
1.4.3 Energetický součín.....	10
1.4.4 Ztráty v magnetickém obvodu .....	10
1.4.5 Curieova teplota.....	11
1.4.6 Součinitel magnetostrikce .....	11
1.4.7 Anizotropie.....	11
<b>2 MĚŘENÍ NA OTEVŘENÝCH VZORCÍCH.....</b>	<b>12</b>
2.1 PŘÍSTROJE POUŽÍVANÉ PŘI MĚŘENÍ NA OTEVŘENÝCH VZORCÍCH .....	14
2.1.1 Hallova sonda.....	14
2.1.2 Rogowski-Chattockův potenciometr.....	15
2.1.3 Ferometr .....	16
2.1.4 Epsteinův přístroj.....	17
2.1.5 Koercimetr .....	18
2.1.6 Magnetostrikční tenzometr.....	18
2.1.7 Torzní magnetometr .....	19
2.2 METODY MĚŘENÍ NA OTEVŘENÝCH VZORCÍCH .....	20
2.2.1 Magnetování .....	20
2.2.2 Určení intenzity při měření otevřených vzorků .....	20
2.2.3 Měření magnetizačních charakteristik magneticky tvrdých materiálů.....	23
2.2.4 Stejnoseměrná měření otevřených vzorků magneticky měkkých materiálů.....	29
2.3 MĚŘENÍ OTEVŘENÝCH VZORKŮ PŘI STRÍDAVÉM MAGNETOVÁNÍ .....	33
2.3.1 Epsteinův přístroj.....	34
2.3.2 Měření ztrát a magnetovacích charakteristik otevřených vzorků kompenzovaným ferometrem ....	36
2.3.3 Měření dalších parametrů otevřených vzorků.....	38
<b>3 SHRUTÍ VÝHOD, NEVÝHOD PRO OTEVŘENÉ A UZAVŘENÉ VZORKY.....</b>	<b>47</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>48</b>



## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na měření důležitých parametrů magnetických otevřených vzorků různými metodami.

Text je rozdělen do tří částí; v první se uvádí shrnutí parametrů vystihující dané vzorky, druhá uvádí podrobný přehled možných metod, přístrojů a zapojení měření. Třetí část popisuje rozdíly mezi metodami pro otevřené a uzavřené vzorky.

## Seznam symbolů

$\Phi$ [Wb] .....	Magnetický tok
$H$ [ $A \cdot m^{-1}$ ].....	Intenzita magnetického pole
$F_m$ [A] .....	Magnetomotorické napětí
$B$ [T].....	Magnetická indukce
$\mu$ [ $H \cdot m^{-1}$ ].....	Permeabilita
$\mu_0$ [ $H \cdot m^{-1}$ ].....	Permeabilita vakua
$\mu_r$ [-].....	Poměrná permeabilita

# 1 Parametry magnetických prvků

Tyto pojmy se týkají magnetování feromagnetik, tj. stavu, kdy působení vnějšího magnetického pole vyvolá polarizaci  $J$  feromagnetického vzorku. Parametry měřené při stejnosměrném magnetování lze považovat za materiálové konstanty, neboť závisí pouze na složení a zpracování materiálu (feromagnetika). Parametry měřené při střídavém magnetování závisí na tloušťce plechu a izolaci mezi jednotlivými plechy, a jsou to proto parametry vzorku nebo určité skupiny vzorků.

## 1.1 Základní veličiny magnetického pole

- **Magnetický tok ( $\Phi$ )** – vektorová fyzikální veličina, vyjadřující počet (indukčních) siločar magnetického pole procházejících danou plochou, kolmou na směr orientace siločar.

Fyzikální jednotka magnetického toku v mezinárodní soustavě jednotek SI je:

$$1 \text{ Weber} \quad [\text{Wb}]$$

$$1 \text{ voltsekunda} \quad [\text{Vs}]$$

Základní matematický vztah pro výpočet je:

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \quad [\text{Wb}; \text{T}, \text{m}^2]$$

$$\Phi = \mathbf{U}_i \cdot \mathbf{t} \quad [\text{Vs}; \text{V}, \text{s}]$$

- **Intenzita magnetického pole ( $\mathbf{H}$ )** - vektorová fyzikální veličina, vyjadřující „mohutnost“ magnetického pole v závislosti na faktorech, které pole vytvářejí (např. velikost elektrického proudu, tekoucího vodičem cívky) a nezávisle na parametrech prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.

Fyzikální jednotka intenzity magnetického pole v mezinárodní soustavě jednotek SI je:

$$1 \text{ ampér na metr} \quad [\text{Am}^{-1}]$$

Základní matematický vztah pro výpočet:

$$\mathbf{H} = \mathbf{F}_m / l \quad [\text{Am}^{-1}; \text{A}, \text{m}]$$

$F_m$  - magnetomotorické napětí

$l$  - střední délka siločáry magnetického pole

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu \quad [\text{Am}^{-1}; \text{T}, \text{Hm}^{-1}]$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} / (\mu_0 \cdot \mu_r) \quad [\text{Am}^{-1}; \text{T}, \text{Hm}^{-1}, -]$$

- **Magnetická indukce ( $\mathbf{B}$ )** - vektorová fyzikální veličina, vyjadřující počet (indukčních) siločar magnetického pole procházejících jednotkovou plochou ( $1\text{m}^2$ ), kolmou na směr siločar - tj. hustotu (indukčních) siločar daného magnetického pole. Fyzikální jednotka magnetické indukce v mezinárodně soustavě jednotek SI je:

$$1 \text{ tesla} \quad [\text{T}]$$

$$1 \text{ voltsekunda/m}^2 \quad [\text{Vs.m}^{-2}]$$

Základní matematický vztah pro výpočet:

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{H} \quad [\text{T}; \text{Hm}^{-1}, \text{Am}^{-1}]$$

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\Phi} / \mathbf{S} \quad [\text{Vs.m}^{-2}; \text{Vs}, \text{m}^2]$$

- **Permeabilita ( $\boldsymbol{\mu}$ )** neboli **prostupnost prostředí** - skalární fyzikální veličina, vyjadřující magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“, prostupnost pro magnetické pole) prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno. Čím vyšší je hodnota permeability, tím větší indukce se vybudí v materiálu magnetickým polem stejné intenzity.

Fyzikální jednotka permeability prostředí v mezinárodní soustavě jednotek SI je:

$$1 \text{ henry na metr} \quad [\text{Hm}^{-1}]$$

$$1 \text{ tesla/ampér na metr} \quad [\text{T/Am}^{-1}]$$

Vzájemný přepočtení fyzikálních jednotek:

$$1 \text{ H.m}^{-1} = 1 \text{ T/Am}^{-1}$$

Základní matematický vztah pro výpočet:

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{B} / \mathbf{H} \quad [\text{Hm}^{-1}; \text{T}, \text{Am}^{-1}]$$

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{B} / \mathbf{H} \quad [\text{T/Am}^{-1}; \text{T}, \text{Am}^{-1}]$$

- **Permeabilita ( $\boldsymbol{\mu}_0$ )** neboli **prostupnost vakua** čili magnetická indukční konstanta vakua - skalární fyzikální veličina, vyjadřující magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“, prostupnost pro magnetické pole) vakua:

$$\boldsymbol{\mu}_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1,256637 \cdot 10^{-6} \text{ T/Am}^{-1}$$

- **Relativní (poměrná) permeabilita ( $\boldsymbol{\mu}_r$ )** - skalární fyzikální veličina, popisující relativní magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“, prostupnost pro magnetické pole) prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno. Tato fyzikální veličina tedy vyjadřuje, kolikrát je dané prostředí magneticky polarizovatelnější

(magneticky „vodivější“, prostupnější pro magnetické pole), než vakuum - je to veličina bezrozměrná.

Základní matematický vztah pro výpočet:

$$\mu_r = \mathbf{B} / (\mu_0 \cdot \mathbf{H}) = \mu / \mu_0 \quad [-; \text{T}, \text{Hm}^{-1}, \text{Am}^{-1}; \text{Hm}^{-1}, \text{Hm}^{-1}]$$

## 1.2 Magnetické vlastnosti materiálů

Magnetické pole může být vytvořeno v jakémkoli prostředí. Experimentálně však bylo ověřeno, že magnetické pole určité intenzity vyvolá v různých prostředích odlišné účinky. Protože intenzita magnetického pole je nezávislá na prostředí, mění se v závislosti na magnetických vlastnostech prostředí magnetická indukce, což vyjadřuje vztah:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H} \quad [\text{T}; \text{Hm}^{-1}, \text{Am}^{-1}; \text{Hm}^{-1}, -, \text{Am}^{-1}]$$

Rozdílné magnetické vlastnosti prostředí vyjadřuje zejména **relativní** (poměrná) **permeabilita prostředí**, podle jejíž hodnoty rozlišujeme materiály diamagnetické, paramagnetické, feromagnetické.

### 1.2.1 Diamagnetické materiály ( $\mu_r > 1$ )

Vnější magnetické pole je tímto prostředím mírně zeslabováno. Mezi diamagnetické látky jsou zařazovány inertní plyny, bromid draselný, voda ( $\mu_r = 0,999\ 991$ ), kuchyňská sůl ( $\mu_r = 0,999\ 9984$ ), měď ( $\mu_r = 0,999\ 990$ ), bizmut ( $\mu_r = 0,999\ 848$ ), rtuť, zinek, olovo, stříbro, zlato, některé plasty, organické látky, supravodiče a další látky.

### 1.2.2 Paramagnetické materiály ( $\mu_r > 1$ )

Jejich atomy mají ve valenční sféře elektronového obalu zpravidla méně než 4 elektrony a vnější magnetické pole je tímto prostředím mírně zesilováno. Do skupiny paramagnetických látek je řazen např. plyný kyslík ( $\mu_r = 1,000\ 001\ 86$ ), kapalný kyslík ( $\mu_r = 1,003\ 620$ ), hliník ( $\mu_r = 1,000\ 023$ ), platina ( $\mu_r = 1,000\ 264$ ), paládium, vanad, chrom, titan, ebonit, hořčík, sodík, draslík, vzduch, různé přechodné kovy, kovy vzácných zemin, aktinidy a jiné látky.

### 1.2.3 Feromagnetické materiály ( $\mu_r \gg 1$ )

Jejich atomy mají částečně neobsazené některé vnitřní sféry elektronového obalu a současně splňují požadavek na určitý interval hodnot poměru mezi meziatomovou vzdáleností a poloměrem atomu. Vnější magnetické pole je tímto prostředím velmi zesilováno. Jsou to vlastně paramagnetické látky obsahující v pevném stavu skupiny atomů (tzv. domény neboli Weissovy oblasti o objemu  $0,001 \div 1 \text{ mm}^3$ , které „oddělují“ od okolí tzv. Blochovy stěny o tloušťce  $10^{-6} \div 10^{-8} \text{ mm}$ ), jejichž magnetické momenty jsou spontánně (tj. i bez působení vnějšího magnetického pole) shodně orientovány (tzv. nasycený stav). Výsledné magnetické momenty jednotlivých domén jsou však opět orientovány neuspořádaně („náhodně“) a navzájem se vykompenzovávají – materiál je nemagnetický. Vlivem vnějšího magnetického pole se natáčí magnetické momenty celých domén, což se projeví velkým zesílením magnetického pole a zpravidla i zmagnetováním těchto materiálů. Překročíme-li při ohřívání určitou hodnotu teploty (tzv. Curieova teplota, např. pro železo  $770^\circ\text{C}$ ), změní se feromagnetická látka v paramagnetickou a pokud je zmagnetována, dojde k jejímu odsmagnetování. Mezi feromagnetické látky je řazeno železo, kobalt, nikl, gadolinium a jejich slitiny. Zvláštními druhy feromagnetických materiálů jsou:

a) **antiferomagnetické materiály** - jednotlivé atomy mají stejně velké a opačně orientované magnetické momenty. Příkladem těchto látek je např. chrom a mangan.

b) **ferimagnetické materiály** – jednotlivé atomy mají nesejně velké a opačně orientované magnetické momenty (zvláštní případ antiferomagnetik). Příkladem těchto látek jsou zejména ferity, vyráběné práškovou technologií z oxidu železa  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a sloučenin jiných kovů případně vzácných zemin (mangan, neodym, barium, stroncium, atd.). Kromě velké hodnoty poměrné permeability ( $\mu_r = 102 \div 105$ ) mají mnohem větší měrný elektrický odpor, než feromagnetické látky a používají se proto např. pro výrobu jader cívek vysokofrekvenčních obvodů.

## 1.3 Feromagnetické materiály používané v elektrotechnice

Magnetické materiály můžeme rozdělit kvůli jejich vlastnostem na materiály:

- Magneticky měkké
- Magneticky tvrdé

### 1.3.1 Magneticky měkké materiály

Mají úzkou a strmou hysterézní smyčku, tj. mají malé předmagnetizační ztráty a velkou permeabilitu počáteční i maximální. Používají se převážně při stavbě elektrických točivých strojů a transformátorů, kde se žádá, aby byla zajištěna vysoká hodnota indukce.

Do těchto materiálů patří např.: čisté Fe, slitiny Fe + Si (křemíkové oceli), slitiny Fe + Ni (permalloye).

### 1.3.2 Magneticky tvrdé materiály

Vyznačují se širokou hysterézní smyčkou. Kromě vysoké hodnoty  $H_c$  se u těchto materiálů požaduje i vysoká remanence  $B_r$ . Kvalitu těchto materiálů posuzujeme podle tzv. „faktoru kvality“, což je energetický součin  $(B \cdot H)_{\max}$ . Jejich magnetizace musí zůstat i po zrušení vnějšího magnetického pole neměnná, díky čemuž jsou předurčeny k výrobě permanentních magnetů. Dají se těžko přemagnetovat.

Patří sem zejména: zakalené oceli s vyšším obsahem uhlíku (martenzitické), legované obvykle až 6 % wolframu, popř. dalšími přísadami; vytvrditelné slitiny FeCoW, FeCoMo, dále slitiny NiCo, např. CuNiCo nebo AlNiCo; tvrdé ferity, např. plumbitové ferity.

## 1.4 Přehled parametrů feromagnetických materiálů

### 1.4.1 Magnetizační charakteristiky

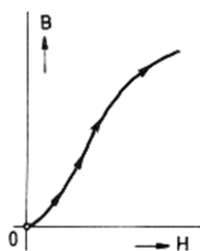
Magnetizační charakteristika je grafické znázornění závislosti magnetické indukce  $B$  feromagnetického materiálu na intenzitě magnetického pole  $H$ . Tato závislost je nejen nelineární, ale vzniká zde navíc hysterese. O stejnosměrném magnetování mluvíme tehdy, když se indukce a intenzita pole v měřeném vzorku mění tak pomalu, že se neuplatňují vlivy vířivých proudů a další zpomalování magnetování nemá již vliv na tvar měřené charakteristiky  $B = f(H)$ . V tomto případě určují tvar charakteristiky výhradně magnetické

vlastnosti materiálu. Při rychlejších změnách magnetovacího proudu dochází vlivem vířivých proudů k deformaci hysterezní smyčky a to tím více, čím je kmitočet magnetování vyšší.

### Křivka prvotní magnetizace

Křivka prvotní magnetizace (tzv. panenská křivka viz) vyjadřuje závislost

$B = f(H)$  pro případ, že se vychází ze stavu dokonalého odmagnetování a intenzita pole  $H$  se pomalu zvyšuje. Po křivce prvotní magnetizace lze postupovat jen jedním směrem, nesmí nastat změna intenzity  $H$  opačného směru, jinak se přejde na jinou magnetizační charakteristiku.

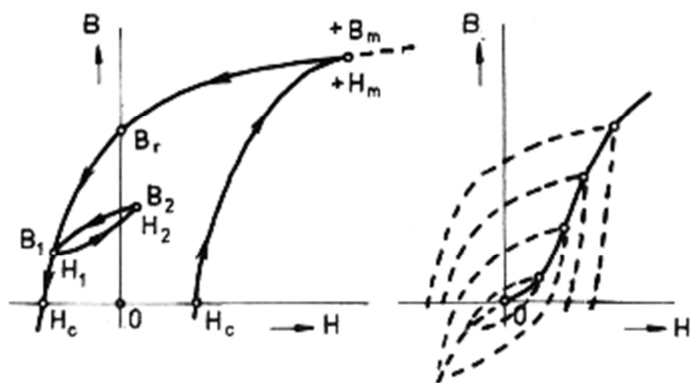


obrázek 1.1 - Křivka prvotní magnetizace

### Hysterézní smyčka

Hysterézní smyčka (obrázek 1.2a) je křivka vyjadřující závislost  $B = f(H)$  pro magnetizační cykly, při změnách intenzity magnetického pole  $H$  od kladné hodnoty  $+H$  do záporné hodnoty  $-H$  a zpět. Hysterezní smyčka má sestupnou a vzestupnou větev a její průsečík s osou magnetické indukce vymezuje hodnotu remanentní indukce  $B_r$  a průsečík s osou intenzity magnetického pole vymezuje hodnotu koercitivity  $H_c$ . Při intenzitě magnetického pole  $H_m$  dosáhneme magnetické indukce nasycení  $B_m$ . Při dalším zvyšování intenzity magnetického pole se hodnoty  $B_r$  a  $H_c$  dále nemění a hysterezní smyčku označujeme jako hraniční. Při snižování intenzity magnetického pole pod hodnotu  $H_m$  při přemagnetování se hysterezní smyčky zmenšují, při čemž jejich vrcholy leží na tzv. komutační křivce (obrázek 1.2b). Pokud se v kterémkoliv bodě změni znaménko změny intenzity magnetického pole např. v bodě  $[H_1; B_1]$ , neodpovídá u většiny feromagnetických materiálů změna magnetické indukce původní křivce, ale funkční závislost se pohybuje po tzv. malé neboli inkrementální hysterezní smyčce.





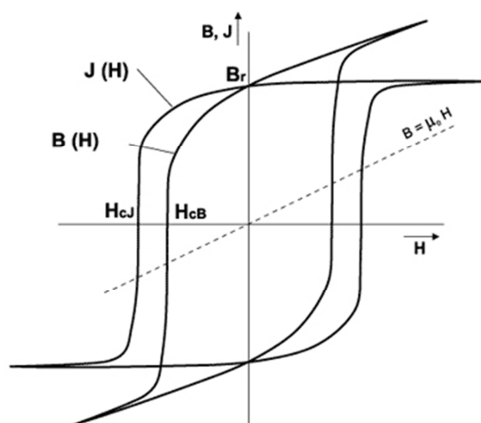
obrázek 1.2a  
Hysterézní smyčka

obrázek 1.2b  
Komutační křivka

Hysterézní smyčka je jedním z nejdůležitějších z parametrů feromagnetických materiálů. Její plocha a tvar poskytují informace potřebné k návrhu a aplikaci materiálu pro zvolený účel.

#### 1.4.2 Koercitivita a remanence

Podle [1]: Koercivita  $H_c$  [A/m] je taková intenzita mag. pole, která působí proti směru spontánní magnetizace, až dosáhne celkové indukce v materiálu  $B = 0$ . Parametr  $H_c$  je mírou odolnosti magnetu proti odsmagnetování (vnějším polem i vlastní demagnetizací). Remanence  $B_r$  [T] je hodnota mag. indukce, která se ustálí po zmagnetování v uzavřeném obvodu magnetu bez působení vnějšího magnetického pole. Z obrázku 1.3 vyplývá, že zatímco parametr  $B_r$  je pro oba typy křivek  $B(H)$ ,  $J(H)$  shodný, neplatí totéž pro parametr  $H_c$ . Proto rozlišujeme koercivitu  $H_{cJ}$  a koercivitu  $H_{cB}$ . Toto rozlišení má technický význam u všech magnetů s velkou koercivitou a menší remanencí.



obrázek 1.3 - Hysterézní smyčka  $B(H)$  a  $J(H)$

### 1.4.3 Energetický součín

Stanoví se jako maximum funkce  $B.H = f(B)$  ve II. kvadrantu, tj. na demagnetovací části hysterezní smyčky (viz obrázek 1.2a). Tento parametr slouží k hodnocení magneticky tvrdých materiálů a představuje dvojnásobek maximální hodnoty hustoty energie  $w$  daného feromagnetika. Proto je také v některé literatuře uváděn jako maximální energetický součín. [2]

Čím vyšší je hodnota  $(B.H)_{\max}$  materiálu, tím menší pak může být při jinak stejných podmínkách objem magnetu, potřebného pro určitou aplikaci. [3]

### 1.4.4 Ztráty v magnetickém obvodu

Ztráty v magnetickém obvodu se projevují zahříváním materiálu. Rozlišujeme ztráty hysterezní (značí se  $P_h$ ) a ztráty vířivými proudy (značí se  $P_e$ ). Celkové ztráty se tedy rovnají součtu jednotlivých ztrát. Hysterezní ztráty závisí na ploše hysterezní smyčky a platí pro ně vztah:  $P_h = f \cdot B_{\max}$ , kde  $f$  je frekvence budícího proudu a  $B_{\max}$  je maximální indukce. Ztráty vířivými proudy vznikají, protože feromagnetický materiál je vodivý a magnetický tok kolem sebe indukuje elektrický proud a tento proud opět vytváří magnetické pole, které zeslabuje budící magnetické pole. Pro ztráty vířivými proudy platí vztah:

$$P_e = \frac{(f \cdot B_{\max} \cdot r)^2}{\rho} \quad [\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}],$$

kde  $f$  je frekvence budícího proudu,

$B_{\max}$  je maximální indukce,

$r$  je tloušťka materiálu,

$\rho$  je rezistivita materiálu. [4]

Ztráty vířivými proudy lze omezit použitím navzájem izolovaných plechů (zmenšuje se celková vodivost jádra), použitím materiálu s vysokým odporem (např. přidáním malého množství křemíku do základního materiálu) a snížením indukovaného napětí (nebude tak velký magnetický tok a indukovaný proud bude menší). Na velikost ztrát je třeba brát ohled např. při návrhu transformátorů.

Podstatnou vlastností jsou také měrné ztráty, které vycházejí z celkových ztrát. Tato vlastnost udává energii spotřebovanou na magnetizaci 1 kg materiálu při sinusové magnetické indukci. [4]

### 1.4.5 Curieova teplota

Ve feromagnetické látce jsou elementární dipóly uspořádány do tzv. domén a domény svým uspořádáním tvoří vlastní magnetické pole látky - magnetizaci. Při teplotě vyšší než Curieova je pravidelnost uspořádání narušena a při chaotickém rozložení magnetických momentů již látka nevykazuje feromagnetické vlastnosti. K této změně dochází skokově, analogicky se změnou skupenství, jde tedy o příklad fázového přechodu. Např. železo má Curieovu teplotu 768 °C. [5]

Curieova teplota  $T_C$  silně závisí na složení, u feromagnetik ji lze na základě složení s dostatečnou přesností předem spočítat. Maximální pracovní teplota magnetika se volí  $\leq 0,4 \cdot T_C$ .

### 1.4.6 Součinitel magnetostrikce

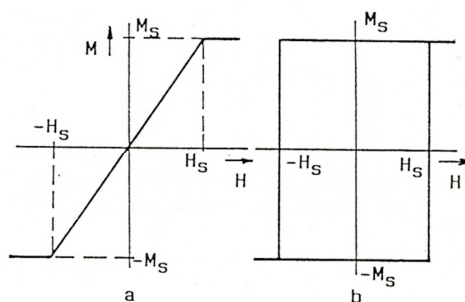
Součinitel magnetostrikce udávající poměrné prodloužení či zkrácení materiálu po vložení do magnetického pole, záporný součinitel znamená zkrácení materiálu a kladný součinitel značí prodloužení materiálu. Je dán poměrem změny délky a původní délky materiálu. Součinitel magnetostrikce je závislý na intenzitě magnetického pole. [4]

Magnetostrikce se výrazněji projevuje u materiálů typu FeNi.

### 1.4.7 Anizotropie

Magnetickou anizotropií rozumíme závislost magnetických vlastností feromagnetik na směru magnetování. Příčinou je, že u anizotropních materiálů má vektor magnetizace tendenci udržovat jistou orientaci, nazývanou "směr snadného magnetování". Ve směru snadného magnetování má materiál vysokou permeabilitu, ve směru nesnadného magnetování je permeabilita nižší. Předpokládejme, že v nejjednodušším případě je celý objem vzorku tvořen jedinou doménou. Magnetujeme-li takový vzorek ve směru kolmém ke směru snadného magnetování, bude se vektor magnetizace  $M$  postupně přetáčet do směru pole s intenzitou  $H$ . Při hodnotě se dosáhne úplného sesouhlasení směru  $M$  a  $H$ , čemuž odpovídá saturace  $M_s$ , charakteristiky  $M = f(H)$ , jak je patrné z obr. 1.4a. V případě, že vnější pole působí ve směru rovnoběžném se směrem snadného magnetování, dojde pro hodnotu  $H = H_s$  k překlopení

vektoru magnetizace do opačného směru, čemuž odpovídá obdélníková charakteristika podle obr. 1.4b. [2]



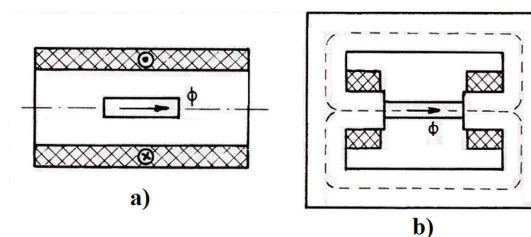
obrázek 1.4

### Základní druhy anizotropie:

- Magnetokrystalická - obvykle dominantní, je však nízká u permalloyů s obsahem kolem 80 % Ni a nulovou amorfních materiálů, které nemají krystalickou mřížku
- Napěťová - dočasně vyvolaná mechanickým napětím
- Jednoosá indukovaná - trvale vyvolaná žíháním v magnetickém poli nebo pod mechanickým napětím
- Tvarová - způsobená demagnetizací
- Jednoosá, víceosá - podle počtu směrů snadné magnetizace [2]

## 2 Měření na otevřených vzorcích

Otevřené vzorky netvoří samy o sobě uzavřený magnetický obvod. To znamená, že část dráhy toku probíhá mimo vzorek odlišným prostředím (vzduchem nebo pomocným feromagnetickým jhem měřicího zařízení). Příkladem otevřených vzorků jsou tyčové a pásové vzorky magnetované ve vzduchové cívce (obr.2.1a), nebo v magnetovacím jhu (obr. 2.1b). U otevřených vzorků není intenzita pole vzorku přímo úměrná magnetovacímu proudu a lze těžko dosáhnout toho, aby vzorek byl v celém objemu homogenně magnetován. [6]



obrázek 2.1 - Otevřené vzorky

Na různá úskalí, na která si musíme dávat během měření na magnetických materiálech pozor, poukazuje [6] :

- Obtížné stanovení přesné dráhy magnetického toku a také plochy, kterou magnetické toky prostupují.
- Magnetická vodivost feromagnetických obvodů je jen o 2 až 4 řády větší než okolní prostředí (vzduch), takže magnetické toky se uzavírají i mimo magnetické obvody (rozptyl), což nepříznivě ovlivňuje přesnost měření.
- Tvar magnetického obvodu, případně přítomnost feromagnetického materiálu v blízkosti měřeného pole, má značný vliv na získané výsledky.
- Nehomogenita magnetizace a anizotropie (nestejně fyzikálně-mechanické vlastnosti v různých souřadnicových směrech) zkoušeného materiálu mohou být příčinou malé reprodukovatelnosti měření.
- Magnetická remanence vzniklá předchozí magnetizací způsobuje často chybné měření. Proto je třeba každý vzorek před měřením pečlivě odmagnetovat.
- Vlivem nelineární závislosti  $B(H)$  nebo  $J(H)$  se chová magnetický obvod jako nelineární prvek a jeho vlastnosti je nutné definovat v daném pracovním bodě.
- Střídavé magnetování vzorku způsobuje vždy jeho ohřev a to vlivem:
  - hysterezních ztrát, které jsou úměrné ploše hysterezní smyčky a kmitočtu,
  - vířivých proudů indukovaných ve vlastním vzorku; ty jsou úměrné druhé mocnině kmitočtu, měrnému odporu materiálu a ploše, ve které se mohou uzavírat.
- U některých magneticky měkkých materiálů (např. permalloy) může mechanické namáhání ovlivnit magnetické vlastnosti.
- Střídavé magnetování feromagnetických obvodů má v důsledku jejich nelineárních vlastností za následek zkreslení proudu a tím intenzity magnetického pole nebo magnetické indukce podle toho, zda zdroj má charakter zdroje napětí nebo zdroje proudu. Použití různého typu budicího zdroje dává proto odlišné výsledky měření.
- Výsledky magnetických měření mohou být ovlivněny vnějšími rušnými magnetickými poli. Při měření magneticky měkkých materiálů může dokonce vadit přítomnost zemského magnetického pole.

## 2.1 Přístroje používané při měření na otevřených vzorcích

### 2.1.1 Hallova sonda

Kolmo k rovině destičky působí magnetické pole s indukcí  $B$ , které vychyluje nosiče z podélného směru a způsobuje, že se při obvodu destičky ve směru kolmého na směr proudu objeví rozdíl potenciálů zvaný Hallovo napětí. :

$$U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d},$$

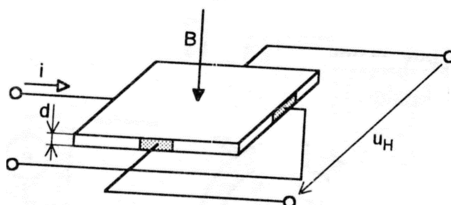
kde  $d$  je tloušťka vzorku [m],

$R_H$  Hallova konstanta [W.m/T],

$I$  pomocný proud [A],

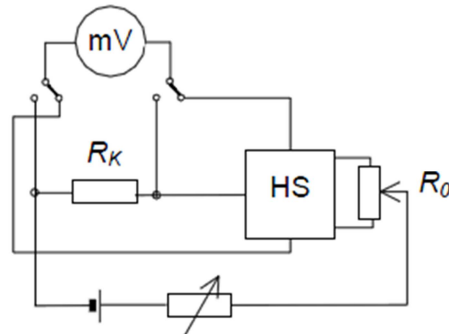
$B$  indukce měřeného pole [T].

Ke snímání Hallova napětí slouží elektrody boční elektrody (obrázek 2.2). Hallova konstanta je nepřímo úměrná hustotě nosičů proudu, je tedy u polovodičů značně vyšší než u vodičů: při stejné velikosti proudu se totiž musí nosiče proudu pohybovat rychleji u materiálu s nižší hustotou nosičů, Lorenzova síla pak je větší. Křemíkové senzory jsou použitelné pro měření polí v rozsahu asi od 1 mT do 1 T. Pro měření polí slabších (od 100 nT) se hodí čidla z antimonidu india. Velikost aktivní plochy sahá od 0,5 x 1 mm u bodových čidel až po několik mm<sup>2</sup> u sond pro měření slabých polí. Hallovy sondy mohou pracovat v širokém rozsahu teplot (omezením je většinou odolnost pouzdra a přívodů). Frekvenční limit je typicky 1 MHz; nejvíce se ovšem používají k měření polí stejnosměrných. Hlavní nevýhodou je teplotní závislost citlivosti (tu lze částečně kompenzovat), offset a jeho teplotní drift a šum. Výhodou je, že sondy neobsahují feromagnetikum, lze s nimi měřit i v těsné blízkosti feromagnetik. [7]



obrázek 2.2 - Hallova sonda

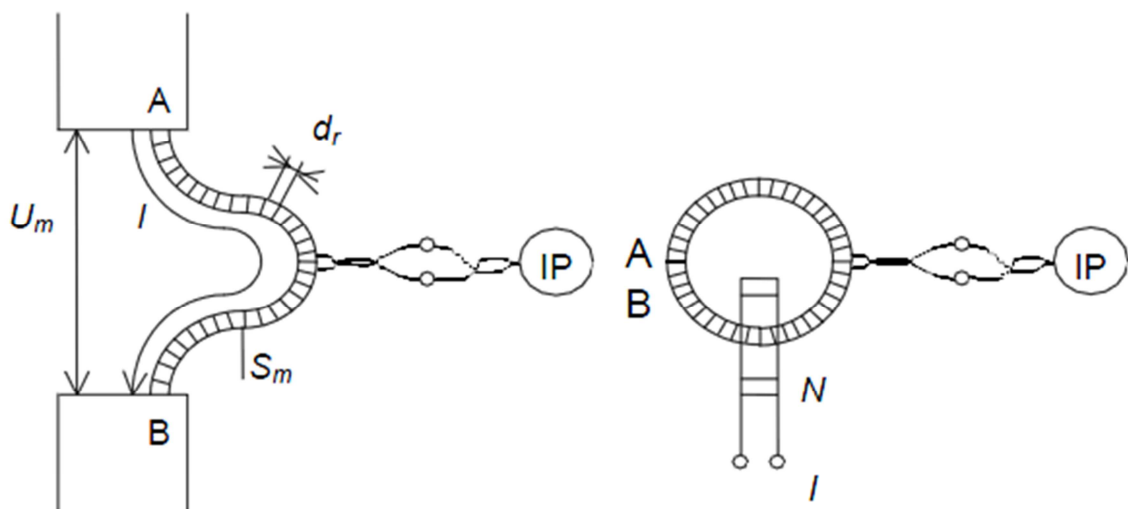
Napětí  $U_H$  je při konstantním proudu  $I$  přímo úměrné magnetické indukci  $B$  a lze je měřit citlivým milivoltmetrem, kalibrováný pro určitou sondu přímo v jednotkách magnetické indukce  $B$  nebo magnetické intenzity  $H$ . Základní zapojení měřice (gaussmetru Metra) popisuje obrázek 2.3.



obrázek 2.3 - Zapojení Hallovy sondy do obvodu

### 2.1.2 Rogowski-Chattockův potenciometr

Rogowskiho - Chattockova potenciometru se používá k měření změn magnetického napětí  $U_m$ . Potenciometr je zvláštní úpravou měřicí cívky pro integrační měření. Je to ohebný pásěk z nemagnetického a nevodivého materiálu s konstantním průřezem, rovnoměrně ovinutý po celé délce vodičem (obrázek 2.4).



obrázek 2.4 - Rogowskiho - Chattockův potenciometr

Při změně magnetického toku protékajícího cívku se v ní indukuje impuls napětí  $Q_u$ , který

změříme integračním přístrojem IP. Změna magnetického napětí mezi konci A a B je:

$$\Delta U_m = K_p \cdot Q_u$$

Konstantu potenciometru  $K_p$  nemůžeme stanovit s postačující přesností z rozměrů a počtu závitů cívky, ale musíme potenciometr kalibrovat ve známém magnetickém poli. Při použití slabého drátu Rogowskiho - Chattockova potenciometru je nutno vzít v úvahu, že má velký počet závitů zpravidla a tím tedy i velký vnitřní odpor.

Kromě popsané úpravy se používá také potenciometr vinutý na pevném jádru tvaru poloviny toroidu. Tato úprava se používá k měření intenzity magnetického pole  $H$  na povrchu otevřených feromagnetických vzorků. [6]

### 2.1.3 Ferometr

Jedná se o metodu pro rychlé zjištění měrných ztrát. Používá se zejména pro určení, zda se jedná o plech orientovaný či neorientovaný. Plechy pro magnetické obvody se vyrábějí buď válcováním za tepla (označení  $E_t$ ) nebo za studena. Válcováním za studena lze vyrábět jak plechy neorientované (označení  $E_i$ ) tak i orientované (označení  $E_o$ ). Jestliže jsou plechy orientované, znamená to, že magnetické domény jsou zorientovány jedním směrem a v tomto směru pak jsou ztráty menší než ve směru kolmém. Energie potřebná k natočení je v jednom směru podstatně nižší než ve druhém. Plechy jsou tedy anizotropní. Oproti tomu plechy neorientované mají ve všech směrech přibližně stejné vlastnosti, jsou tedy izotropní, stejně tak jako plechy válcované za tepla. Pro magnetické obvody používáme plechy orientované, pokud je využit převážně jeden směr, pokud využíváme oba směry, je nutné použít plechy neorientované. [8]

V dnešní době se již začal používat tzv. kompenzovaný ferometr, jež byl vyvinut na ČVUT v Praze a který zaručuje definované podmínky magnetování i měření a přitom umožňuje měřit na jednotlivém svazku nebo pouze jednom pásku. [2]

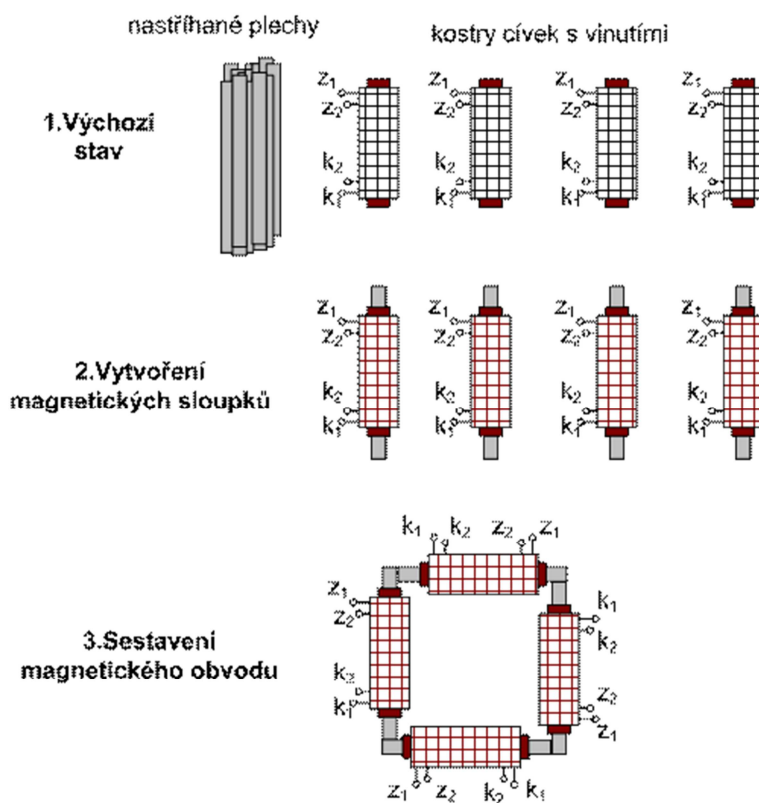


obrázek 2.5 - Ferometr Tesla



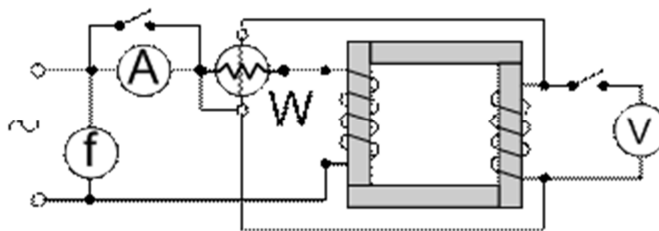
## 2.1.4 Epsteinův přístroj

Epsteinův přístroj není žádný elektrický měřicí přístroj, ale jen definované uspořádání magnetického obvodu složeného z přesně dané hmotnosti plechů ve tvaru pásků určených rozměrů. Součástí přístroje jsou 4 válcové cívky, do nichž se zasunou sloupky vytvořené z plechových pásků. Ty se srazí těsně k sobě, čímž vznikne magnetický obvod ve tvaru čtvercového rámu. Každá z cívek má pro toto měření dvě oddělená vinutí. Odpovídající části vinutí všech čtyř cívek se po sestavení magnetického obvodu zapojí do série (obrázek 2.6).



obrázek 2.6 - Epsteinův rám [12]

Tak vznikne obvod magnetizační (můžeme ho považovat za primární) a obvod měřicí (sekundární). Po zapojení wattmetru, dvou voltmetrů a ampérmetru vznikne pracoviště, na němž lze změřit magnetické ztráty přesně (obrázek 2.7). Na měření se spotřebuje velké množství vzorků (plech) - 10 kg pro tzv. velký Epstein a 0,5 až 1,5 kg pro malý Epstein. Metoda původně určená pro měření ztrát elektrotechnických plechů, nyní se používá i pro měření charakteristik. [10]



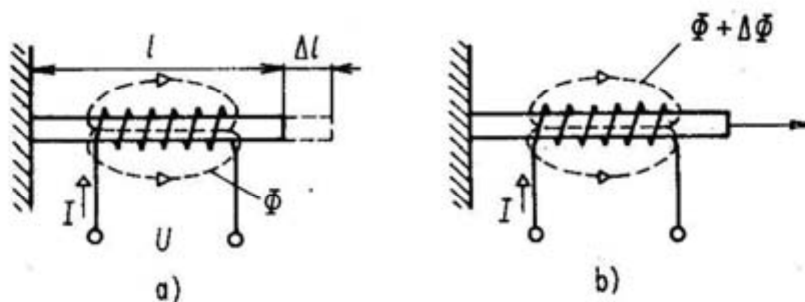
obrázek 2.7 - Schéma pracoviště [12]

### 2.1.5 Koercimetr

Přístroj pro měření koercivity feromagnetik. Koercitometry závislé na magnetizaci  $jH_C$  nebo  $H_{C1}$  jsou nejčastější, díky tomu že metoda měření je jednoduchá.

### 2.1.6 Magnetostrikční tenzometr

Magnetické tenzometry využívají magnetoelasticitu, která úzce s magnetostrikcí. Princip je uveden na obrázku 2.8. Zmagnetujeme-li feromagnetickou tyč, prodlouží se o délku úměrnou magnetickému toku. Namáháme-li feromagnetickou tyč silou  $F$ , zvětší se magnetický tok, úměrně mechanickému namáhání. Příčinou změny magnetického toku je změna magnetické vodivosti (permutivity) feromagnetické tyče. Tento jev se nazývá megnetoelasticita. [9]

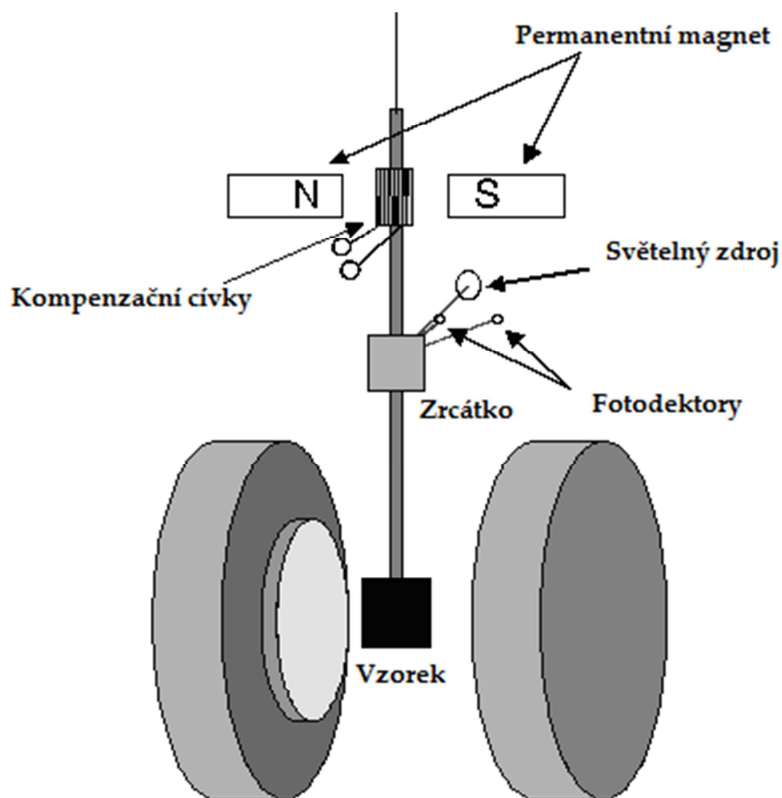


obrázek 2.8 - Magnetostrikční tenzometr - a) princip magnetostricke  
b) princip magnetoelasticity

### 2.1.7 Torzní magnetometr

Magnetický moment magnetometru (obrázek 2.9) je určující pro stanovení anizotropie konstant magnetického materiálu. Jeho funkční princip je založen na měření krouticího momentu, působícího na vzorek pod úhlem, jenž vychyluje magnetizaci jednoduché osy ze směru magnetického pole. Anizotropie konstant jsou vypočteny z experimentálních dat získaných pomocí známé rovnice. Změna vzájemné orientace mezi magnetizací jednoduché osy vzorku a směrem magnetického pole se provádí otáčením permanentního magnetu magnetického pole zdroje (intenzita magnetického pole 3T). Měření je možné provádět v rozsahu teplot 100 až 370 K. V současné době dražší a přesná metoda se používající se ve většině laboratoří. [10]

Významným výrobcem těchto přístrojů je japonská firma TOEI. [2]

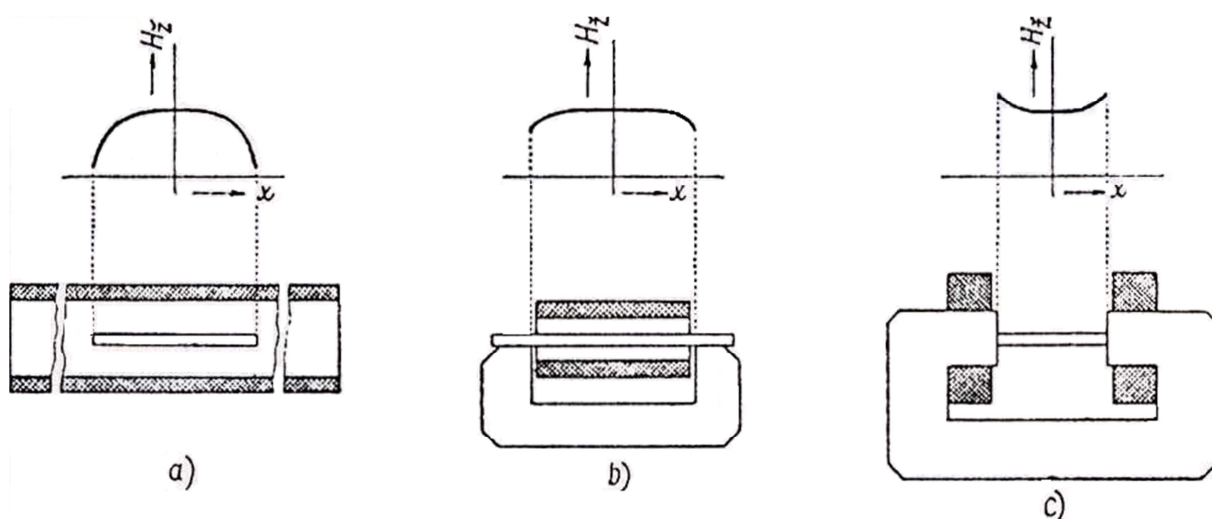


obrázek 2.9 - Torzní magnetometr

## 2.2 Metody měření na otevřených vzorcích

### 2.2.1 Magnetování

Jak zdroj uvádí [2] obrázek 2.10 znázorňuje rozložení intenzity magnetického pole podél tyčových vzorků magnetovaných ve vzduchové cívce a ve jhu. Při magnetování vzduchovou cívkou (a) je největší intenzita uprostřed vzorku. Rovnoměrného magnetování lze dosáhnout úpravou vzorku do tvaru rotačního elipsoidu. Tento způsob magnetování se používá především v koercimetrech. Je-li při magnetování ve jhu magnetovací cívka umístěna na vzorku (b), klesá intenzita směrem ke koncům vzorku, jsou-li cívky umístěny na nástavcích jha (c), je naopak intenzita na koncích vzorku největší. Kombinací obou způsobů magnetování ve jhu lze dosáhnout přibližně homogenního pole vzorku.



obrázek 2.10 - Magnetování otevřených vzorků

### 2.2.2 Určení intenzity při měření otevřených vzorků

Dle [2] až na ojedinělé výjimky (kompenzované permeametry) nelze u otevřených vzorků určit s dostatečnou přesností intenzitu magnetického pole z magnetovacího proudu. Pouze přibližně lze stanovit intenzitu z magnetovacího proudu při magnetování ve jhu dle obrázek 2.10 b), je-li reluktance jha a vzduchových mezer mezi vzorkem a jhem vůči reluktanci vzorku zanedbatelná. Potom počítáme intenzitu stejně jako u uzavřeného vzorku, délka siločáry odpovídá délce vzorku. Metodu nelze použít pro vzorky magneticky měkkých mate-

riálů s velkou permeabilitou, kde jsou přídatné reluktance nezanedbatelné. Magneticky tvrdé materiály zase nelze cívku nasunutou na vzorku dostatečně zmagnetovat. Přibližně lze rovněž určit intenzitu ve feromagnetickém vzorku při magnetování ve vzduchové cívce (obrázek 2.10 a) s využitím vztahu:

$$H_z = H_0 - \frac{DJ_z}{\mu_0} \quad [\text{A.m}^{-1}; \text{A.m}^{-1}; \text{T}; \text{H.m}^{-1}]$$

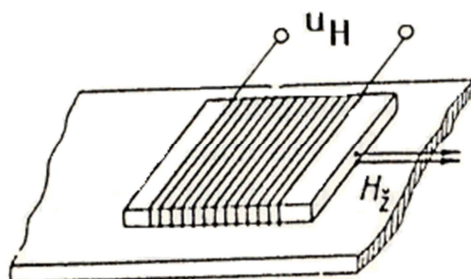
kde  $H_0$  je intenzita pole před vložením vzorku,

$D$  demagnetizačním činitelem daným tvarem tělesa a jeho polohou vzhledem ke směru pole,

$J_z$  magnetická polarizace tělesa.

Chyby zde vznikají nepřesným určením demagnetizačního činitele, který je navíc konstantní jen u elipsoidních vzorků, a tím, že intenzita je dána rozdílem dvou málo odlišných členů  $H_0$  a  $DJ_z/\mu_0$ . Zejména u vzorků s velkou permeabilitou může i malá chyba určení jednoho ze členů způsobit podstatné chyby v určení  $H_z$ . Proto se těmito přibližnými metodami nebudeme dále zabývat a intenzitu pole ve vzorku budeme určovat měřením. Při měření je využívána skutečnost, že tečná složka intenzity na rozhraní se mění spojitě. Měřením tečné složky intenzity těsně na povrchu vzorku tedy určíme intenzitu magnetického pole ve vzorku. K měření jsou použitelné všechny metody měření intenzity magnetického pole ve vzduchu, které splňují podmínku měření těsně při povrchu vzorku, neovlivňují měřený vzorek a kterým nevadí přítomnost feromagnetika. Nejpoužívanější je proto Hallova sonda, plochá cívka a Rogowskiho-Chattockův potenciometr (RCP). Hallova sonda měří lokální hodnotu intenzity, může měřit jak stejnosměrné, tak časově proměnné magnetické pole.

**Plochá cívka** (obrázek 2.11) měří v úseku své délky průměrnou hodnotu tečné složky intenzity  $H_t$ . Je vhodná tam, kde je alespoň v oblasti cívky zajištěno homogenní pole.



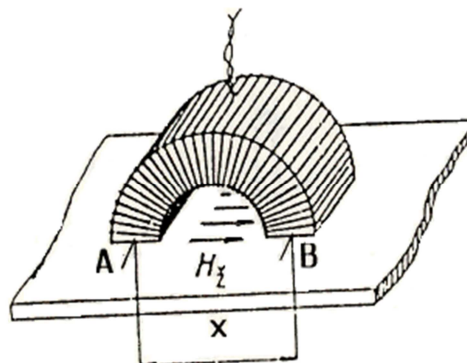
obrázek 2.11 - Plochá cívka

Ve vinutí cívky se indukuje napětí  $U_H$ , dané změnou toku spřaženého s cívkou:  $U_H = N d\Phi/dt = N S n_0 dH/dt$ . Je-li plochá cívka použita k měření intenzity střídavého magnetického pole, platí vztah:

$$H_{tm} = \frac{1}{\mu_0 \cdot K_H} \cdot \frac{U_{Hs}}{4 \cdot f},$$

kde  $U_{Hs}$  je střední hodnota napětí indukovaného v ploché cívce.

Další možností pro měření  $H_t$  je využití **RCP**. Pro tyto účely je zpravidla používán pevný RCP ve tvaru části kruhu (obrázek 2.12).



obrázek 2.12 - Rogowski-Chattockův potenciometr

Pro průměrnou hodnotu tečné složky intenzity (za předpokladu konstantní intenzity pod konci RCP) platí  $H_t = H_z = U_{mAB}/x$ . Změnu magnetického napětí  $\Delta U_{mAB}$  určíme integrací napěťového impulsu vyvolaného ve vinutí RCP změnou toku  $\Delta \Phi_{RCP}$ .

$$\text{Platí vztahy: } \Delta U_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot N \cdot A} \Delta \Phi_{RCP} = K_{RCP} \Delta \Phi_c,$$

odtud

$$\Delta H_t = \frac{K_{RCP}}{x} \cdot K_i \cdot \Delta U_2,$$

kde  $x$  je vzdálenost mezi středy koncových ploch RCP [m],

$l$  rozvinutá délka RCP [m],

$N$  počet závitů RCP,

$A$  průřez RCP [m<sup>2</sup>],

$K_{RCP} = l / (\mu_0 \cdot N \cdot A)$  je konstanta RCP [A/Vs],

$K_i$  konstanta integrátoru [Vs/V],

$\Delta U_2$  změna výstupního napětí integrátoru [V], vyvolána změnou měřené intenzity  $\Delta H_t$

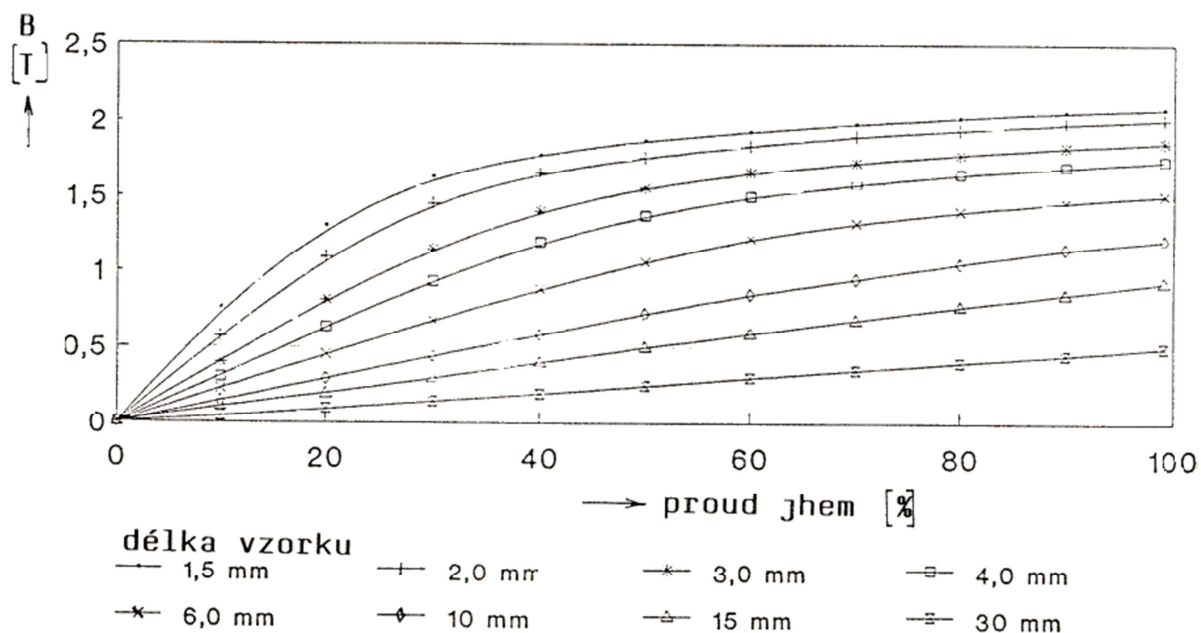
### 2.2.3 Měření magnetizačních charakteristik magneticky tvrdých materiálů

U magneticky tvrdých materiálů (MTM) se určují následující parametry: Koercivita  $H_{cb}$  [A/m] na křivce  $B = f(H)$ , koercivita  $H_{CJ}$  [A/m] na křivce  $J = f(H)$ , remanence  $B_r$  [T] (je totožná s remanencí  $J_r$ , toto označení se však neuvádí), měrná energie  $BH$  [ $J/m^3$ ], někdy se ve 2. kvadrantu hysterezní smyčky proměřují malé hysterezní smyčky. Informace o nich je velmi důležitá pro návrh obvodů s permanentními magnety. Všechny uvedené parametry musí být měřeny na hraniční (maximální) hysterezní smyčce, při měření tedy musí být dosaženo nasycení materiálu. U MTM lze orientačně předpokládat, že dostatečné zmagnetování nastává asi při  $H > 5 \cdot H_C$ . Toho lze při koercivitách současných MTM dosáhnout pouze v magnetovacím jhu s uspořádáním dle obrázku 2.10 c). Materiály obsahující kovy vzácných zemin (např. SmCo a NdFeB) dokonce nelze nasytit ani ve jhu a je třeba je impulsně magnetovat ve vzduchové cívce nebo v supravodivém solenoidu. [2]

#### 2.2.3.1 Magnetizační jho pro měření MTM

Magnetizační jho musí splnit následující požadavky: Dosažení požadované intenzity mezi pólovými nástavci, zachycení mechanických sil, kterými jsou pólové nástavce k sobě přitahovány (řádově až 1000 N), plynulá nastavitelnost vzdálenosti mezi pólovými nástavci. Čelní plochy pólových nástavců musí být dokonale rovnoběžné a hladké. Minimální průměr pólových nástavců stanovuje ČSN 34 5885 (Měření magneticky tvrdých materiálů) na hodnotu  $D > d + 1,2 l$ , resp.  $D > 2,5 l$ , kde  $d$  je průměr vzorku,  $l$  je vzdálenost pólových nástavců. Pro dosažení maximální hodnoty indukce a intenzity se používají pólové nástavce ve tvaru komolého kužele. Ve velkém magnetovacím jhu lze dosáhnout indukce ve vzduchové mezeře (pro  $l \sim 1$  cm) až 3,5 T (odpovídá intenzitě 2,8 MA/m). Při tak velkých hodnotách indukce jsou již pólové nástavce přesyceny a přispívají svou polarizací jen částečně. Proto jsou pólové nástavce u nejsilnějších elektromagnetů vyráběny ze slitin s kobaltem.

Na obrázku 2.12 je závislost dosažitelné indukce ve vzduchové mezeře různé délky na magnetovacím proudu malého magnetovacího jha s max. příkonem 600 W firmy Magnet - Messtechnik J.Ballanyi. [2]



obrázek 2.12 - Závislost dosažitelné indukce ve vzduchové mezeře různé délky na magnetovacím proudu

Vzorky magneticky tvrdých materiálů jsou obvykle ve tvaru hranolku nebo válce s malým poměrem  $l/d$ . Tento malý poměr sice vyvolává velký demagnetizační činitel ( $D = 0,1$  až  $0,2$ ), malá permeabilita magneticky tvrdých materiálů však způsobuje velmi malou demagnetizaci. Jsou-li plochy pólových nástavců  $j_{ha}$  podstatně větší než průřez vzorku, lze (nejsou-li přesyceny pólové nástavce) dosáhnout nejen ve vzorku, ale i v jeho okolí natolik homogenního pole, že je možné pro běžné provozní měření intenzity použít cívky s větším průřezem, které nesplňují podmínku měření těsně při povrchu vzorku, a pro měření  $B$  cívku v pólovém nástavci. [2]

### 2.2.3.2 Určení indukce $B$ a magnetické polarizace $J$ při měření MTM

Zdroj uvádí [2]: Při laboratorních měřeních sloužících ke stanovení vlastností MTM je indukce měřena výhradně integračně pomocí měřicí cívky navinuté buď těsně na vzorek, nebo cívku navinutou na tuhé kostřičce, nasunutou na vzorek. V důsledku malé permeability MTM není tok vzduchem cívky nedokonale obepínající vzorek nikdy zanedbatelný. Dokonce i při těsně navinuté cívce musíme počítat s průměrem vodiče, není-li tento vůči průměru vzorku zanedbatelný. Místo indukce ve vzorku měříme



$$\mathbf{B}' = \mathbf{B}_Z + \mu_0 \cdot \mathbf{H}_V \cdot \frac{S_m - S_z}{S_z} = \mathbf{B}_Z + \Delta \mathbf{B}$$

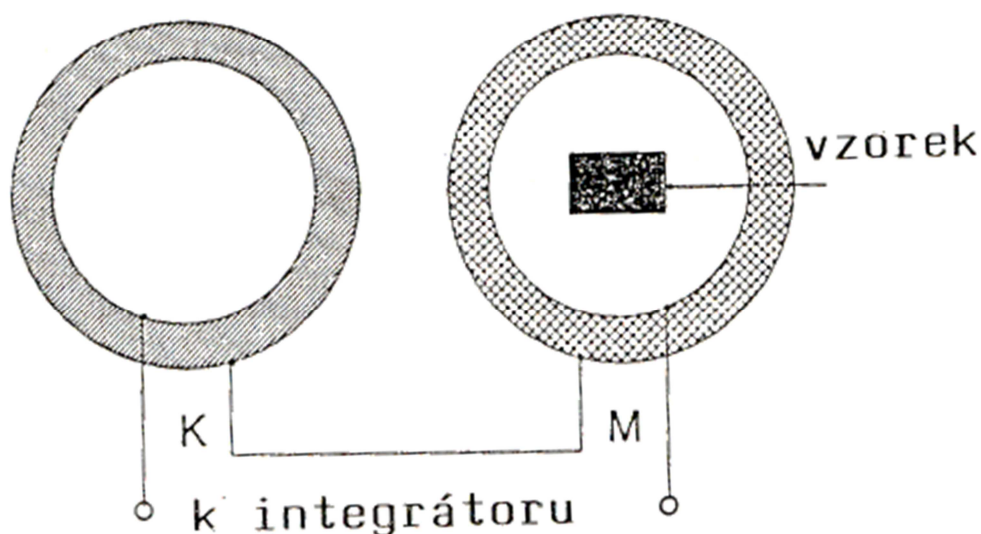
kde  $S_m$  je plocha měřicí cívky [ $\text{m}^2$ ],

$S_z$  průřez vzorku [ $\text{m}^2$ ],

$H_v$  intenzita ve vzduchu, přibližně rovná intenzitě  $H_z$  ve vzorku [ $\text{m}^2$ ].

Chybovou složku  $\Delta \mathbf{B}$  lze korigovat buď softwarově u systémů využívajících výpočetní techniku, nebo obvodově, kdy je v kanále B (Y) zařazen sumátor a odečítána hodnota  $\mu_0 \cdot H_z (S_m - S_z) / S_z$ . Podobně lze odečtením složky  $\mu_0 \cdot H_z \cdot S_m$  získat hodnotu magnetické polarizace  $\mathbf{J} = \mathbf{B}_z - \mu_0 \cdot \mathbf{H}_z$ .

Korekce toku vzduchem je zahrnuta do kompenzací při přímém měření  $\mathbf{J}$ . Nejjednodušším způsobem kompenzace je měření dvěma shodnými měřicími cívkami zapojenými antisériově a umístěnými dle obrázku 2.13.



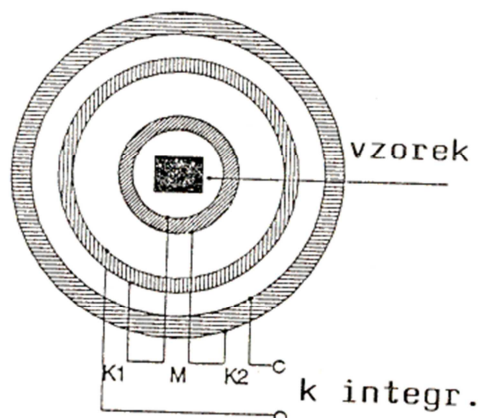
obrázek 2.13 - Kompenzace 2 shodnými měřicími cívkami

Platí-li  $N_K S_K = N_M S_M$ , indukuje se v soustavě cívek při změně magnetického pole napětí

$$u_i = u_M - u_K = N_M \cdot S_z \frac{dJ}{dt}$$

Integrací napětí  $u_i$  odtud získáme hodnotu  $\Delta \mathbf{J}$ .

Umístění cívek vedle sebe předpokládá homogenní pole i ve velké vzdálenosti od vzorku. To zpravidla není dokonale splněno. Proto se používá uspořádání dle obrázku 2.14, které je na oblast homogenity méně náročné.



obrázek 2.14 - Uspořádání pro lepší homogenitu

Při změně pole se v jednotlivých cívkách indukují následující napětí:

$$M: u_{iM} = N_M \cdot (S_M \cdot \mu_0 \cdot \frac{dH}{dt} + S_Z \cdot \frac{dJ}{dt})$$

$$K_1: u_{iK_1} = N_{K_1} \cdot (S_{K_1} \cdot \mu_0 \cdot \frac{dH}{dt} + S_Z \cdot \frac{dJ}{dt})$$

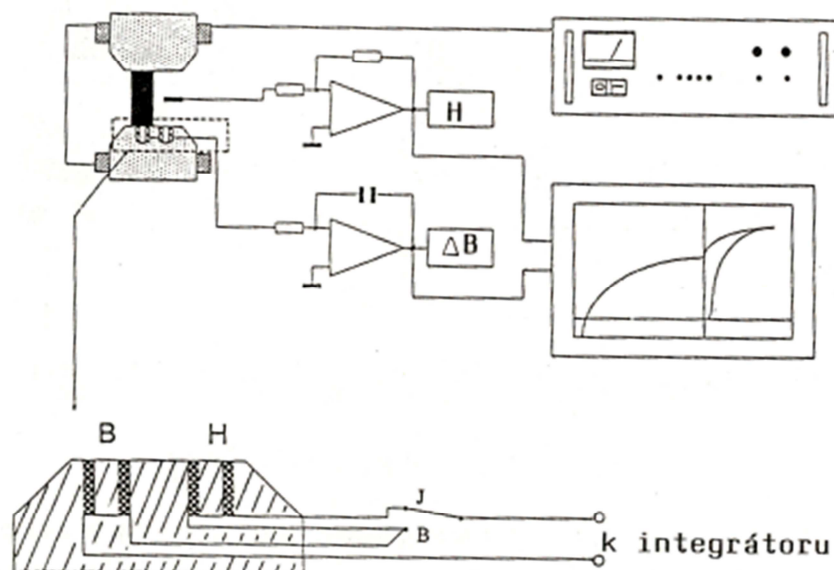
$$K_2: u_{iK_2} = N_{K_2} \cdot (S_{K_2} \cdot \mu_0 \cdot \frac{dH}{dt} + S_Z \cdot \frac{dJ}{dt})$$

Při splnění podmínky  $N_{K_1} = N_{K_2}$ ;  $N_{K_2}S_{K_2} - N_{K_1}S_{K_1} = N_M S_M$  platí:

$$u_i = u_{iM} - u_{iK_1} - u_{iK_2} = N_M \cdot S_Z \cdot \frac{dJ}{dt}$$

Integrací napětí  $u_k$  z obrázku 2.13 a napětí  $u_{iK_1} - u_{iK_2}$  z obrázku 2.14 může být určena hodnota intenzity magnetického pole. Uvedené cívky s vnitřním průměrem 10 až 66 mm (J - compensated surrounding coils) nabízí firma Magnet - Messtechnik J. Ballanyi.

Zajímavý způsob měření indukce umožňuje měřicí cívka se známou konstantou  $NS$ , umístěná v pólovém nastavci pod vzorkem (obrázek 2.15).



obrázek 2.15

V tomto uspořádání nemusí být znám průřez vzorku, vzorek musí měřicí cívku pouze celou pokrývat. Opakovaným měřením s různě umístěným vzorkem lze zjistit jeho případné nehomogenity. To je důležité zejména u feritových permanentních magnetů. (Pomocí měřicí cívky navinuté na vzorek měříme vždy průměrnou hodnotu indukce v celém průřezu vzorku.) Je-li pólový nástavec vybaven ještě měřicí cívkou "H", nad kterou vzorek nezasahuje, lze při antisériovém zapojení cívek "B" a "H" přímo měřit magnetickou polarizaci  $J$ . Velkou nevýhodou uspořádání jsou v podstatě nekorigovatelné chyby při přesycení pólových nástavců. Proto jsou pro tento způsob měření používány převážně nástavce s kobaltem. I tak je nutno měřicí metodu považovat za provozní, výhodnou zejména pro srovnávací měření většího počtu vzorků stejných rozměrů a podobných vlastností. Zde se příznivě uplatní rychlost výměny vzorku, který nemusí být opatřen žádnou měřicí cívkou. Uvedené pólové nástavce nabízejí ve svém výrobním programu např. firmy Magnet-Messtechnik Jürgen Ballanyi a Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH.

### 2.2.3.3 Stanovení počáteční podmínky integrace při měření $B$ a $J$

Pokud lze měřený vzorek ve jhu nasytit, měříme zpravidla celou hraniční hysterezní smyčku a hodnoty  $\pm B_m$  ( $\pm J_m$ ) určíme s využitím její symetrie.

Ve vztahu

$$B_m = \frac{B_{MAX} - B_{MIN}}{2}$$

kde  $B_m$  je maximální hodnota indukce ve vzorku,

$B_{MAX}$  maximální naměřená hodnota indukce,

$B_{MIN}$  minimální naměřená hodnota indukce,

jsou hodnoty  $B_{MAX}$  i  $B_{MIN}$  zatíženy stejnou počáteční podmínkou, která se po odečtení vyruší.

Pro měření indukce může být použita jak násuvná cívka, tak cívka vinutá na vzorek nebo v pólovém nástavci.

Jedná-li se o měření vzorku, který v magnetovacím jhu zmagnetovat nelze a musí být pulsně zmagnetován před měřením, nebo z jiných důvodů nechceme měřit celou hysterezní smyčku, používáme pro měření zpravidla násuvnou cívku a postupujeme následovně: Cívka (bez vzorku) je umístěna do přibližně nulového pole a integrátor je vynulován. Do cívky je vložen vzorek a ten je upnut do jha. Údaj integrátoru po vynásobení  $1/NS$  v tomto případě odpovídá přímo hodnotě indukce ve vzorku. Nevýhodou je manipulace se vzorkem, která měření prodlužuje a zvyšuje nároky na minimální drift integrátoru. [2]

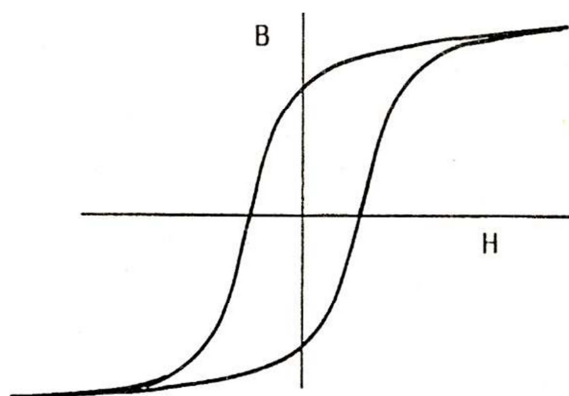
#### 2.2.3.4 Záznam charakteristiky MTM se změnou měřítka intenzity v 1. kvadrantu

Pro návrh obvodu s permanentním magnetem je důležitá jeho charakteristika ve 2. kvadrantu hysterezní smyčky, kde při využívání permanentního magnetu leží jeho pracovní bod. Protože při měření celé hraniční hysterezní smyčky zaujímá 2. kvadrant v měřítku intenzity pouze asi 10 % charakteristiky (obrázek 2.16a), je často jako výsledná charakteristika materiálu zakreslován pouze 1. a 2. kvadrant, přičemž je měřítko intenzity v 1. kvadrantu změněno vůči 2. kvadrantu v poměru 1:5 až 1:10 (obrázek 2.16b).

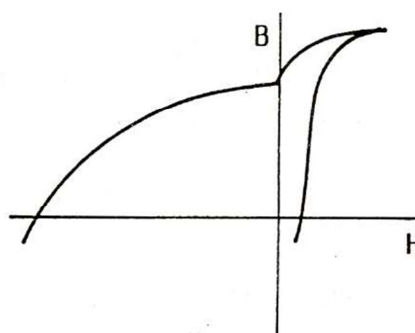
Záznam 1. kvadrantu v tomto případě zpravidla slouží pouze ke kontrole, zda bylo při magnetování dosaženo nasycení vzorku. V nasycení je charakteristika  $B = f(H)$  rovnoběžná s přímkou  $\mu_0 H$  a charakteristika  $J = f(H)$  je rovnoběžná s osou intenzity.

I při měření MTM jsou v současnosti čistě analogové měřicí obvody se zapisovačem

nahrazovány měřicími systémy s využitím PC podobně jako u uzavřených vzorků. Rozdílné je pouze měření intenzity magnetického pole (není určována z magnetovacího proudu). Pro dynamiku magnetovacího procesu je určující převážně časová konstanta magnetovacího jha, která je zejména u velkých elektromagnetů velmi dlouhá (jednotky až desítky sekund). Při automatizovaných měřeních musí být nárůst intenzity před dosažením požadované hodnoty zpomalen natolik, aby časová konstanta jha nezpůsobila nežádoucí růst intenzity i po zastavení změn magnetovacího zdroje. To je obzvláště důležité při záznamu malých hysterezních smyček, vycházejících z definovaných bodů hraniční hysterezní smyčky. [2]



obrázek 2.16a



obrázek 2.16b

#### 2.2.4 Stejnoseměrná měření otevřených vzorků magneticky měkkých materiálů

Přístroje sloužící k měření stejnosměrných magnetizačních charakteristik otevřených vzorků jsou nazývány permeametry. Historicky vznikla celá řada permeametrů, a to nekompensovaných (Hopkinsonův, Fahyho, MEI, AEG) a nekompensovaných bez integračního měření (Kópselův, Fetterův), které v současnosti nemají podstatný význam, dále kompenzační permeametry (Ilioviciho, Burrowsův, NBS - MH, Sanfordův - Bennetův, NPL) a kompenzační permeametry bez integračního měření (Brožův, Trnkův).

Měření masivních otevřených vzorků magneticky měkkých materiálů není v praxi příliš časté, protože je spojeno s určitými komplikacemi a masivní magneticky měkké materiály jsou používány jen ve zvláštních případech - pólové nástavce obvodů s permanentními magnety, stínící kryty pro stejnosměrné magnetické pole, magnetické obvody elektromagnetů.

Při upnutí měřeného vzorku do jha podobně jako při měření MTM jsou v důsledku vysoké

permeability měřeného vzorku rozptylové toky nezanedbatelné a pole vzorku je nehomogenní. Při měření musí být dodrženy zásady měření tečné složky  $H$  těsně při povrchu a v bezprostřední blízkosti cívky pro měření  $B$ . Měříme tak jen místní vlastnosti nehomogenně magnetovaného vzorku a různá zařízení měřící v různých úsecích poskytují potom různé výsledky měření. Další obtíže přináší potřeba měření malých intenzit pole. Dostatečně homogenního magnetování lze u otevřených vzorků magneticky měkkých materiálů dosáhnout pouze kompenzací úbytků magnetických napětí na vzduchových mezerách. [2]

### 2.2.4.1 Princip kompenzace úbytků magnetických napětí na vzduchových mezerách

Opatříme-li původně uzavřený magnetický obvod vzduchovou mezerou (obrázek 2.17), vznikne rozptylové demagnetizační pole a intenzitu již nelze počítat z magnetovacího proudu  $I$ . V důsledku rozptylu bude intenzita v různých místech obvodu různá. Zavedeme-li pomocné kompenzační magnetické napětí  $U_{mk} = N_k \cdot I_k$  tak, že magnetické napětí  $U_m = \Phi_v R_{mv} - N_k \cdot I_k$  zanikne, spotřebuje se magnetické napětí  $N_1 I_1$  jen k magnetování feromagnetické části délky  $l_z$ , vzorek je magnetován rovnoměrně a intenzitu můžeme určit z magnetovacího proudu stejně jako u uzavřeného vzorku  $H_z = \frac{N_1 \cdot I_1}{l_s}$

kde  $N_1$  je počet závitů magnetovacího vinutí,  
 $I_1$  magnetovací proud,  
 $l_s$  střední délka siločáry.

Ve vykompenzovaném stavu platí:

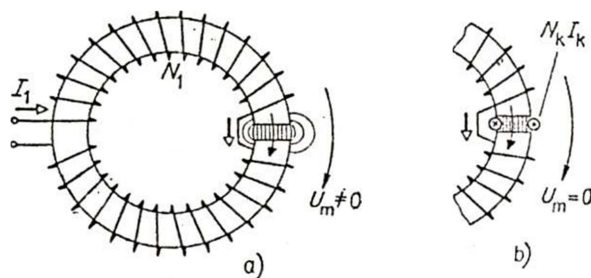
$$\Phi_z = \Phi_v \Rightarrow \frac{U_{mv}}{R_{mv}} = \frac{U_{mz}}{R_{mz}} \Rightarrow N_K \cdot I_K = \frac{R_{mv}}{R_{mz}} \cdot U_{mz}$$

Po dosazení za  $R_{mv} = l_v / (\mu_0 \cdot S_v)$ ,  $R_{mz} = l_z / (\mu \cdot \mu_0 \cdot S_z)$ ,  $S_v = S_z$  dostaneme:

$$N_K \cdot I_K = \frac{\mu \cdot l_v}{l_z} \cdot N_1 \cdot I_1 \quad ,$$

kde  $U_{mv}$  je magnetické napětí na vzduchové mezeře, vyvolané proudem  $I_1$  [A],

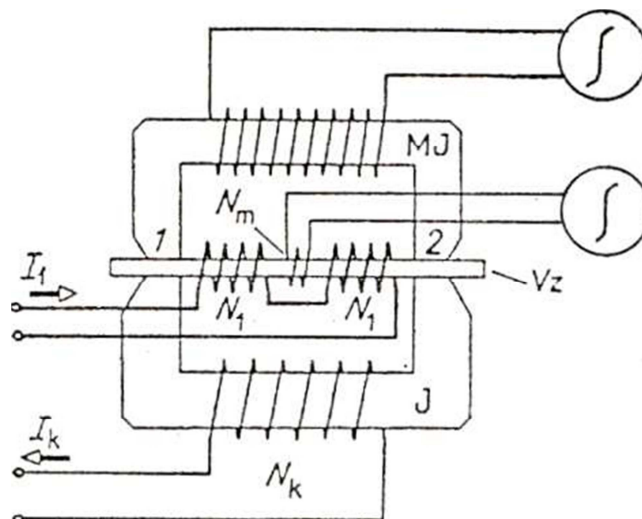
- $U_{mz}$  magnetické napětí na feromagnetiku [A],  
 $S_v$  plocha vzduchové mezery [ $m^2$ ],  
 $S_z$  průřez feromagnetika [ $m^2$ ],  
 $\mu$  relativní permeabilita feromagnetika [-].



obrázek 2.17

Ze přechozího vztahu vyplývá, že poměr  $N_K \cdot I_K / N_1 \cdot I_1$ , je úměrný permeabilitě feromagnetika a není tudíž konstantní. Proto musí být stav vykompenzování ( $U_m = 0$ ) v každém pracovním bodě indikován měřením. To je při stejnosměrných měřeních komplikované, protože základní metoda měření magnetického napětí (RCP) je integrační a vyžaduje proto jeho změnu. Spojité měření proto většina permeametrů neumožňuje. Měření jsou komutační, resp. se skokovými změnami intenzity magnetického pole. Při současné komutaci magnetovacího i kompenzačního proudu je kompenzační proud nastaven tak, aby integrační přístroj vyhodnocující změnu magnetického napětí  $U_m$  ukázal nulovou hodnotu.

Jako příklad je popsána konstrukce a činnost Iliviciho kompenzačního permeamtru (obrázek 2.18). Vzorek je magnetován cívku umístěnou na vzorek, magnetický obvod je uzavřen jhem J, na kterém je navinuto kompenzační vinutí  $N_k$ . K indikaci vykompenzovaného stavu - nulového magnetického napětí mezi konci vzorku - je zde využito feromagnetické měřicí jho MJ, které je podstatně citlivější než RCP bez feromagnetického jádra. Přítomnost feromagnetika však obvod ovlivňuje nepříznivě, neboť soustřeďuje i rozptylové toky ze vzduchu. U tohoto permeamtru není podmínka přesné kompenzace splněna rovněž proto, že rozložení kompenzačního magnetického napětí neodpovídá prostorovému rozložení vzduchových mezer. Proto i ve stavu vykompenzování existují určité rozptylové toky a magnetování vzorku není dokonale homogenní.

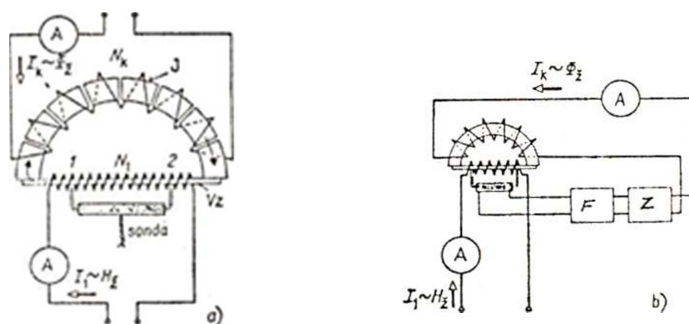


obrázek 2.18 - Iliviciho kompenzační permeametr

Použití různých typů kompenzovaných permeametrů pro měření magnetických vlastností masivních ocelí upravuje ČSN 34 5881.

Zejména z teoretického hlediska je velmi zajímavý Trnkův kompenzační D-permeametr bez integračního měření, který s využitím automatické kompenzace umožňuje dokonce spojitý záznam magnetizačních charakteristik. Otevřený vzorek je zde uzavřen magnetickým obvodem ve tvaru písmene D (odtud D-permeametr). Obvod je složen ze segmentů magneticky měkkého materiálu rozděleného vzduchovými mezerami na 7 částí (obrázek 2.19). Tím je dosaženo v podstatě konstantní reluktance nezávislé na toku. Rozptylové toky jsou minimalizovány rovnoměrným rozložením kompenzačního vinutí i vzduchových mezer po celé délce obvodu. Vliv rozptylových toků je rovněž omezen tím, že nulové magnetické napětí není indikováno mezi konci vzorku s nekontrolovatelnými rozptyly, ale až dále od jeho krajů. Magnetické napětí je měřeno feromagnetickou sondou, která i přes své feromagnetické jádro ovlivňuje obvod jen velmi málo, neboť je umístěna v oblasti slabých rozptylových polí. Podstatou své funkce umožňuje sonda činnost i bez změny magnetického napětí mezi svými konci. Hodnota kompenzačního proudu tedy může být nastavována bez komutací či skokových změn.





obrázek 2.19 - Trnkův kompenzační D-permeametr

Protože v důsledku konstantní reluktance je ve vykompenzovaném stavu hodnota kompenzačního proudu  $I_k$  úměrná toku  $\Phi_z$  vzorkem, je konstanta přístroje  $K = \Phi_z/I_k$  [Wb/A] stanovena jednou provždy integračním měřením  $\Phi_z$  a tok vzorkem (resp. indukce) je dále určován přímo z kompenzačního proudu. V automatizované verzi je kompenzační proud odvozen ze signálu sondy pomocí zesilovače se silnou integrační složkou, který (bez překývnutí) nastaví hodnotu  $I_k$  tak, aby magnetické napětí mezi konci feromagnetické sondy bylo nulové.

Zejména permeametry bez integračního měření dovolují v některých případech poměrně rychlé a snadné měření otevřených vzorků. Permeametry však vesměs nevyhovují při měření magneticky nejměkčích materiálů typu Permalloy. To je dáno rušivými vlivy vnějších polí (včetně zemského) a vlivem mechanického namáhání při upínání vzorků. [2]

### 2.3 Měření otevřených vzorků při střídavém magnetování

Otevřené vzorky pro střídavé magnetování jsou zpravidla tvořeny jednotlivými pásky plechu nebo jejich svazky. Zajištění homogenního střídavého magnetování otevřeného vzorku je velmi nesnadné. Další komplikací při střídavém měření otevřených vzorků je obtížné dosažení definovaného způsobu magnetování, zejména sinusového B.

Magnetovací jho, vytvářející spolu se vzorkem uzavřený magnetický obvod, musí být rovněž skládáno z plechů. Jho se zanedbatelnou reluktancí je prakticky nerealizovatelné, jeho vliv na průměrnou hodnotu intenzity se proto vyjadřuje tzv. smluvní délkou siločáry (SRN, Velká Británie). Přesný výpočet intenzity magnetického pole z magnetovacího proudu je možný jen u kompenzovaných ferometrů nebo tehdy, je-li definovaný uzavřený magnetický obvod

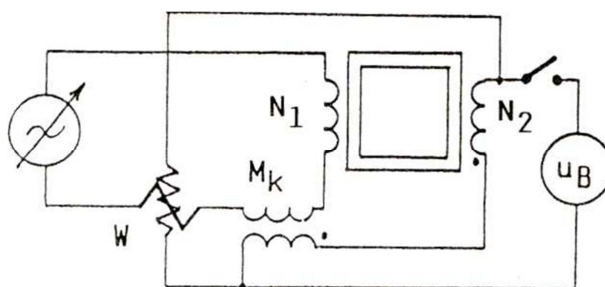
poskládán přímo z měřených plechů. Ve všech ostatních případech je třeba měřit tečnou složku střídavé intenzity pole na povrchu vzorku podobně jako při stejnosměrném magnetování. Napětí z ploché cívky nebo RCP se měří voltmetrem a pro maximální hodnotu intenzity  $H_{tm}$  platí vztahy :

$$H_{tm} = \frac{1}{\mu_0 \cdot K_H} \cdot \frac{U_{HS}}{4 \cdot f} \quad \text{resp.} \quad H_{tm} = \frac{K_{RCP}}{x} \cdot \frac{U_{HS}}{4 \cdot f}$$

Střídavá indukce  $B_z$  se určuje z napětí indukovaného v měřicím vinutí, obepínajícím vzorek, stejně jako u vzorků uzavřených. [2]

### 2.3.1 Epsteinův přístroj

Podstata spočívá ve vytvoření uzavřeného vzorku poskládáním pásků plechů přesně stanovených rozměrů do čtverce. Protože vzorek nevyplňuje dutinu cívek dokonale, je třeba kompenzovat při měření indukce tok uzavírající se vzduchem mimo vzorek. To lze provést pomocí etalonu vzájemné indukčnosti  $M_k$ , jehož primární cívku protéká magnetovací proud a sekundární cívka je zapojena antisériově se snímacím vinutím. Pro měření ztrát  $P_z$  se používá zapojení dle obrázku 2.20.



obrázek 2.20

Připojením napěťové cívky wattmetru na snímací vinutí jsou vyloučeny ztráty na ohmickém odporu magnetovací cívky a platí:

$$P_z = \frac{N_1}{N_2} \cdot P_W - \frac{U_B^2}{R_W}$$

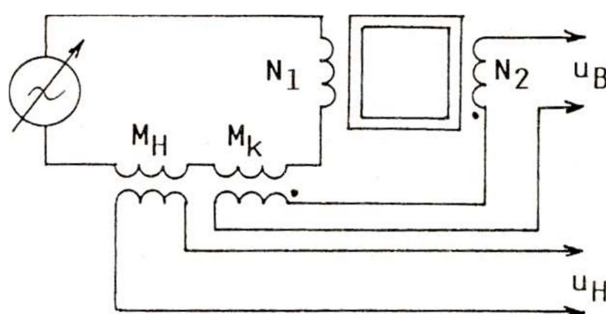
kde  $N_1$  je počet závitů magnetovacího vinutí,

$N_2$  počet závitů snímacího vinutí cívky,

- $P_W$  výkon změřený wattmetrem,
- $U_B$  napětí na snímacím vinutí,
- $R_W$  odpor napěťové cívky wattmetru.

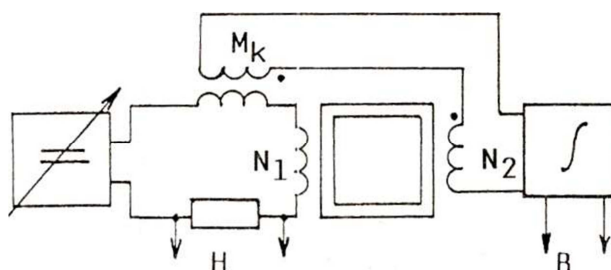
Ztráty se měří při napěťovém magnetování, požadovaná hodnota  $B_m$  je nastavena velikostí napětí  $U_B$  podle transformátorové rovnice  $U_{ef} = 4,44 \cdot B_m \cdot f \cdot N \cdot S$ .

V zapojení dle obrázku 2.21 lze měřit amplitudovou charakteristiku  $B_m = f(H)$ , případně jednotlivé typy permeabilit jako u toroidního vzorku.



obrázek 2.21

Použití Epsteinova rámu pro měření charakteristik při stejnosměrném magnetování je rovněž zcela analogické jako u uzavřeného (toroidního) vzorku – obrázku 2.22.

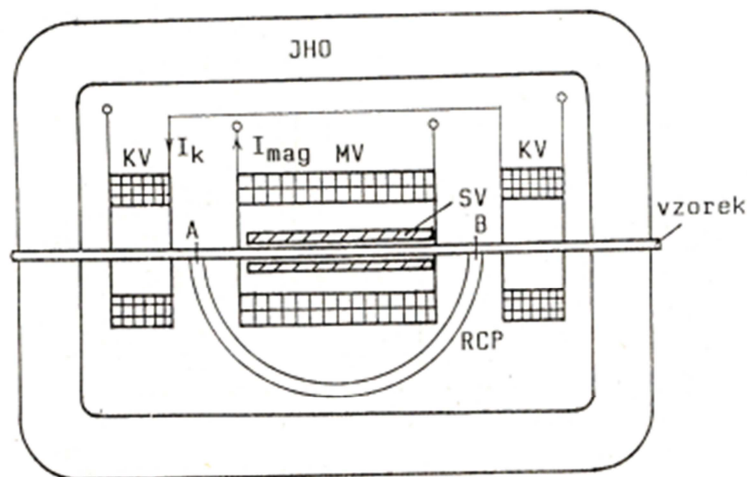


obrázek 2.22

Protože skládání vzorků do Epsteinova přístroje je velmi pracné, je metoda pro průběžná měření nepoužitelná. Způsob, který zaručuje definované podmínky magnetování i měření a přitom umožňuje měřit na jednotlivém svazku nebo pouze jednom pásku, nutně vede na princip složitější - tzv. kompenzovaný ferometr. [2]

### 2.3.2 Měření ztrát a magnetovacích charakteristik otevřených vzorků kompenzovaným ferometrem

Uspořádání magnetického obvodu kompenzovaného ferometru (dále jen ferometru) je na obrázku 2.23. Jedná se o původní metodu prof. Mikulce z ČVUT v Praze, navrženou pro normalizaci měřicího zařízení a publikovanou IEC.



obrázek 2.23 - Kompenzovaný ferometr

Magnetovací jho je symetrické na krajích vzorku jsou umístěny kompenzační cívky KV, ve střední části magnetovací cívka MV a snímací cívka SV. RCP obepíná magnetovací cívku. Pro uzavřenou křivku tvořenou drahou  $l'$  (RCP) a  $l$  (vzorek mezi konci RCP) platí

$$\oint \mathbf{H} \, dl = \int_{A(l)}^B \mathbf{H} \, dl + \int_{B(l')}^A \mathbf{H} \, dl = N_{MV} \cdot I$$

Dosáhneme-li zavedením kompenzačního proudu  $I_K$  nulového magnetického napětí mezi konci RCP, tedy

$$\int_{B(l')}^A \mathbf{H} \, dl = 0$$

platí  $H = N_{MV} \cdot I_{\text{mag}} / l$  a intenzita pole ve vzorku je úměrná magnetovacímu proudu.

Potřebný kompenzační proud  $I_K$  zajišťuje zesilovač  $Z_3$  tak, aby napětí z RCP bylo nulové (obrázek 2.24 - elektrické blokové schéma ferometru).

Zajímavým způsobem je řešeno nastavení požadované indukce. Zesilovač  $Z_1$  je derivační  $u_g = k \, dU_v/dt$ . Protože při  $u_p = 0$  (zajistí zesilovač  $Z_2$ )  $u_e = N_{SV} S_z dB/dt$ , platí pro okamžité hodnoty indukce rovnice

$$\mathbf{B} = \frac{k}{N_{SV} S_z} \cdot \mathbf{u}_v .$$

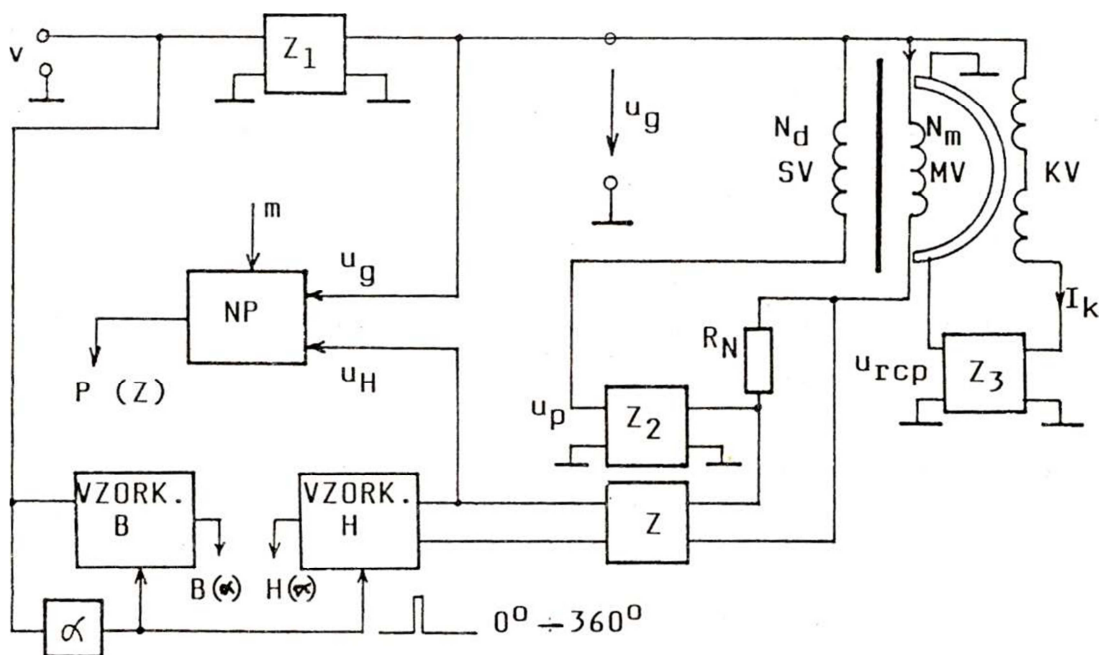
Vhodným nastavením derivační konstanty  $k$  lze nastavit shodnou velikost  $u_v$  a  $B$ .

Většinu výkonu pro magnetování feromagnetika dodává zesilovač  $Z_1$ ; zesilovač  $Z_2$  hradí jen úbytky na ohmickém odporu a rozptylové indukčnosti magnetovací cívky.

Zavedením signálů  $u_g = N_d S_z dB/dt$  a  $u_H = H_z l R_N / N_m$  do wattmetrického převodníku NP (násobička + obvod střední hodnoty) získáme celkové ztráty  $P$  a po vydělení hmotností ztrátové číslo  $Z$ .

$$\begin{aligned} R_N \frac{1}{T} \int_0^T \frac{H_z l}{N_m} N_d S_z \frac{dB}{dt} dt &= R_N \frac{1}{T} l S_z \frac{N_d}{N_m} \int_0^T H_z \frac{dB}{dt} dt = R_N f V_z \frac{N_d}{N_m} W_z \\ &= P \frac{N_d}{N_m} R_N \end{aligned}$$

kde  $R_n$  je snímací odpor magnetovacího proudu [Q],  
 $l$  délka vzorku mezi konci RCP [m],  
 $S_z$  průřez vzorku [m<sup>2</sup>],  
 $N_d$  počet závitů snímací cívky,  
 $N_m$  počet závitů magnetovací cívky,  
 $V_z = l S_z$  objem feromagnetika [m<sup>3</sup>],  
 $W_z$  energie daná plochou hysterezní smyčky [J/m<sup>3</sup>].



obrázek 2.24 - Blokové schéma ferometru

Na obrázku 2.24 jsou signály  $u_v$  a  $u_H$  zpracovány vzorkovači, které jsou synchronně řízeny impulsem s periodou generátoru  $u_v$ . Posuvem impulsů v rozmezí  $\varphi = 0$  až  $360^\circ$  získáme na výstupu vzorkovačů napětí úměrná  $B(\varphi)$  a  $H(\varphi)$ , vhodná pro spojitý záznam hysterezní smyčky. Signály  $u_v$  a  $u_H$  lze samozřejmě digitalizovat a další operace provést softwarově. [2]

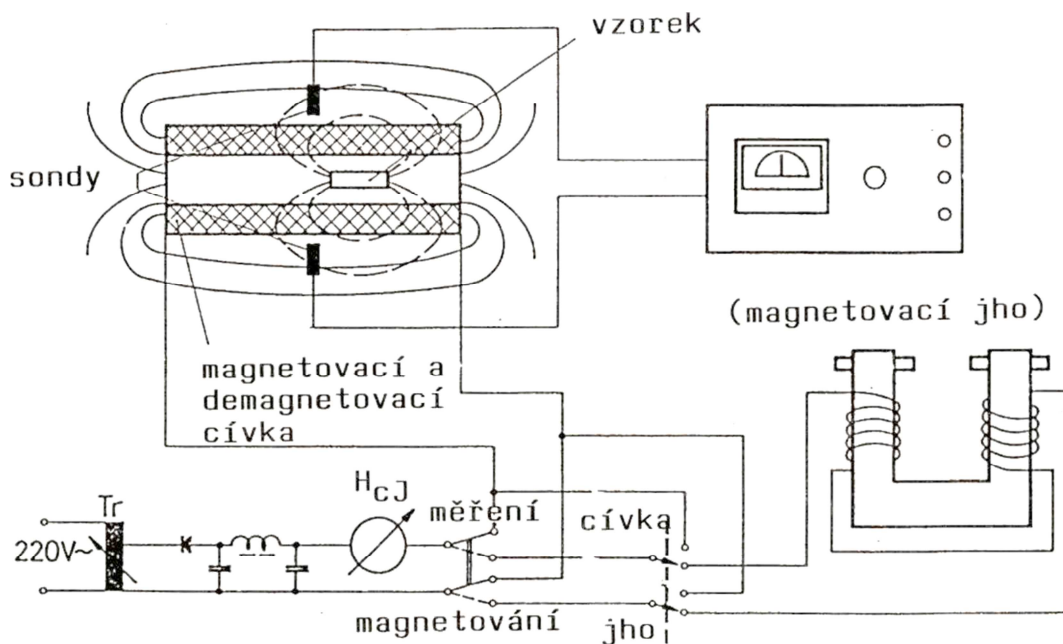
### 2.3.3 Měření dalších parametrů otevřených vzorků

#### 2.3.3.1 Měření koercivity

Nejběžnější uspořádání koercimetru je na obrázku 2.25 (koercimetr Forster 1.093). Vzorek je do nasycení zmagetován ve vzduchové cívce, po vypnutí magnetovacího proudu je posunut tak, aby kolmo umístěné feromagnetické sondy zaznamenaly maximum kolmé složky rozptylového pole vzorku. Sondy jsou umístěny přesně kolmo na osu solenoidu, protože v této poloze nereagují na jeho vlastní magnetické pole. Po komutaci je proud v cívce opět postupně zvyšován, až pole vzorku zanikne a ten se chová jako nemagnetické těleso (feromagnetické sondy indikují nulovou hodnotu kolmé složky rozptylového pole). Intenzitu pole  $H_{cJ}$ , která odpovídá tomuto stavu, lze určit přímo z proudu cívky bez zřetele na demagnetizační činitel vzorku:

$$H_{cJ} = K_C \cdot I \quad [A/m; m^{-1}, A],$$

kde  $K_c$  je známá konstanta cívky C.

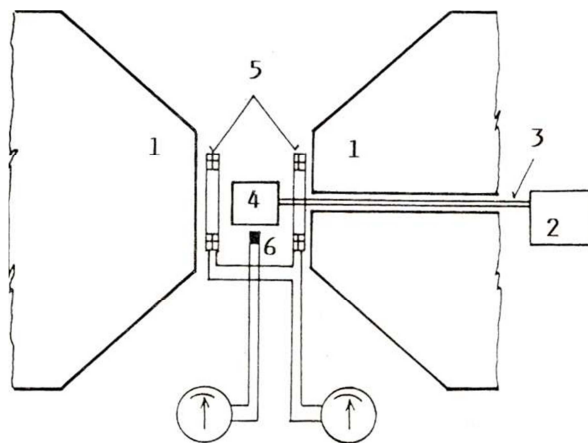


obrázek 2.25 - Koercimetr

Při měření koercivity magneticky velmi měkkých materiálů (permalloy, amorfní materiály) je měření podstatně ovlivněno již zemským magnetickým polem, jehož velikost může i několikanásobně převýšit měřené  $H_{cJ}$ . Proto musí být rušivé magnetické pole odstíněno (např. u KORZIMATu Forster 1.095), nebo se měřicí cívka umísťuje do oblasti "magnetického vakua" vytvořeného vhodnou orientací v rušivém poli a jeho kompenzací soustavou permanentních magnetů.

Jiné komplikace jsou spojeny s měřením koercivity magneticky velmi tvrdých materiálů. Pokud nelze vzorek ve vzduchové cívce koercimetru dostatečně nasytit, může být vzorek zmagetován ve jhu a další postup měření je stejný. Materiály typu SmCo nebo NdFeB s koercivitou řádově MA/m však nelze ve vzduchové cívce ani odmagnetovat. V tomto případě lze určit  $H_{cJ}$  z charakteristiky (což je při pouhém měření  $H_{cJ}$  pracné), nebo metodou umožňující odmagnetování ve jhu. Mezi pólovými nástavci jha nemohou být sondy, snímající kolmou složku pole, u konců vzorku, neboť pole mezi pólovými nástavci obsahuje (zejména při jejich přesycení) i radiální složku. V měřicím zařízení na obrázku 2.26 je vzorek demagnetován mezi pólovými nástavci jha (1), pole vzorku (4) je indikováno dvojicí symetricky umístěných cívek (5), do kterých se při jeho pohybu indukuje napětí. Cívky jsou zapo-

jeny tak, že se napětí vyvolaná pohybem vzorku sčítají, zatímco signál vyvolaný změnou demagnetovacího pole se ruší. Intenzita magnetického pole je měřena Hallovoou sondou (6). Pohyb je vyvolán vibrátorem (2) a na vzorek se přenáší neferomagnetickým táhlem (3) dutinou v pólovém nástavci. [2]



obrázek 2.26

### 2.3.3.2 Měření magnetostrikce

Při měření délkové (nebo objemové) magnetostrikce je možno přímo měřit změnu délky (nebo objemu) vzorku při působení magnetického pole, nebo využít některých nepřímých metod. Přímé metody měření objemové magnetostrikce používají např. hydrostatického převodu: vzorek je umístěn v nádobce naplněné kapalinou až do hrdla tvořeného tenkou kapilárou. I nepatrné změny objemu vzorku pak vedou k pozorovatelné změně hladiny kapaliny v kapiláře. Častěji se měří délková magnetostrikce. K měření délkového prodloužení se používá např. tenzometrů nalepených přímo na vzorek, důmyslných mechanických nebo hydraulických převodů ke zvětšení výchylky nebo nověji různých optoelektronických metod. Společnou nevýhodou přímých metod měření magnetostrikce je velká citlivost aparatury na teplotní změny (změny délky způsobené změnami teploty vzorku během měření mohou výrazně převyšovat měřené prodloužení). Nepřímé metody měření magnetostrikce jsou založeny na existenci magnetoelastické energie  $E_{\sigma}$ , jejíž hustotu pro případ anizotropní konstanty nasycené lineární magnetostrikce  $\lambda_S$  a jednoosého napětí  $\sigma$  můžeme vyjádřit:

$$E_{\sigma} = -\frac{3}{2} \cdot \lambda_S \cdot \sigma \cdot \cos^2 \vartheta$$

kde  $\vartheta$  je úhly mezi směrem magnetizace a napětí.

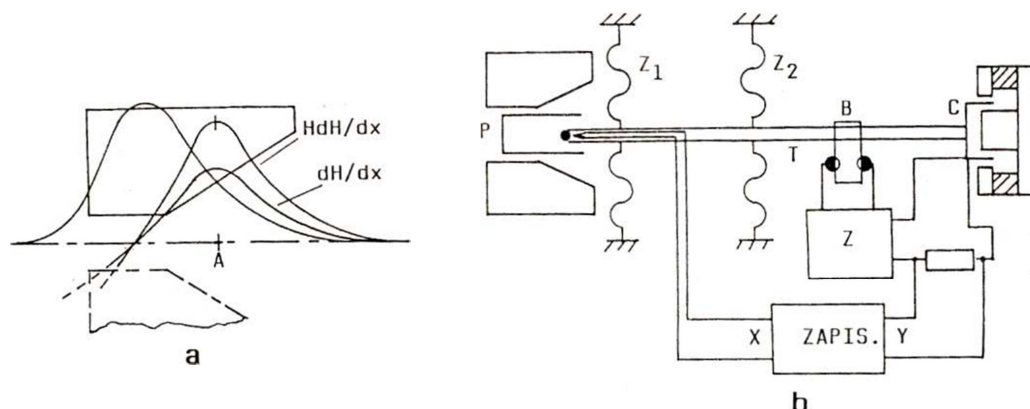


### 2.3.3.3 Měření Curieovy teploty

Podle obecné fyzikální definice (feromagnetická) Curieova teplota  $T_c$  je teplota, při které materiál přechází z feromagnetického do paramagnetického stavu, a spontánní magnetická polarizace  $J_s$  (magnetická polarizace uvnitř domén v nulovém vnějším poli) tedy právě klesne na nulu. Obtíže při měření  $T_c$  jsou způsobeny tím, že zmíněný přechod nenastává obvykle v celém objemu vzorku současně za stejné teploty a hodnotu  $J_s$  nelze většinou určit přímým měřením. V technické praxi se proto používá  $T_c$  definované na průběhu teplotní závislosti susceptibility.

Nejjednodušší způsob určení  $T_c$  tedy vychází z měření teplotní závislosti susceptibility. K tomu se používá jak silových metod (magnetické váhy, torzní magnetometr), tak metod indukčních (přesné, obvykle komparační měření indukčnosti cívky s měřeným vzorkem).

Schéma aparatury pro měření  $T_c$ , je na obrázku 2.27a,b.



obrázek 2.27 - Aparatura pro měření

Funkce přístroje je založena na tzv. neintegrované diferenciální rovnici pro sílu působící na bodové těleso v magnetickém nehomogenním poli  $H$  s gradientem  $dH/dx$ , kde směr  $x$  souhlasí se směrem pohybu vzorku. Můžeme-li považovat intenzitu  $i$  a gradient v celém objemu vzorku za konstantní, platí

$$Fx = \mu_0 \cdot \kappa \cdot H \cdot \frac{dH}{dx} \cdot V = J \cdot \frac{dH}{dx} \cdot V$$

kde  $\kappa$  je magnetická susceptibilita [-],

$V$  objem vzorku [ $m^3$ ],

$J$  magnetická polarizace [T],

$H$  intenzita magnetického pole uvnitř vzorku [A/m].

Při konstantních hodnotách intenzity magnetického pole je síla působící na vzorek úměrná jeho susceptibilitě. U vzorků feromagnetických se ale intenzita uvnitř vzorku od vnějšího pole liší (demagnetizace). Pro určení  $T_c$  však není určení skutečné hodnoty susceptibility důležité, postačí pouze její teplotní závislost. Měřený vzorek je umístěn do oblasti maximálního silového působení (bod A - maximum součinu  $H \, dH/dx$  – obrázek 2.27a). Vzorek je tak vystaven síle, která se jej snaží vtáhnout mezi pólové nástavce. Zároveň je vzorek umístěn v pícce P, těsně k němu doléhá termočlánek z neferomagnetických materiálů (chromel - copel). Membránové závěsy  $Z_1$  a  $Z_2$  umožňují pohyb vahadla T, nesoucího vzorek, jen ve směru x. Síla působící na vzorek je kompenzována na druhé straně vahadla silou, kterou je vtahována cívka C do dutiny magnetického obvodu. Mírou změny síly působící na vzorek (jeho susceptibilitě) je proud procházející cívkou C. Tento proud dodává diferenciální zesilovač, na jehož vstupu jsou dva fototranzistory, zakrývané clonkou B spojenou s vahadlem. Proud cívkou udržuje vahadlo se vzorkem v konstantní poloze a je výstupní veličinou úměrnou susceptibilitě v ose Y zapisovače. Napětí z termočláneku úměrné teplotě vzorku je přiváděno na osu X zapisovače.

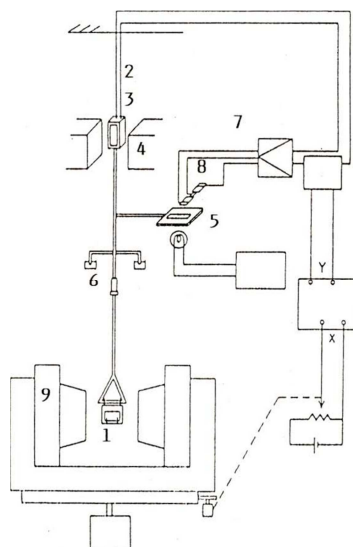
Protože řada nemagnetických parametrů látky má v okolí  $T_c$  extrém, používá se i nepřímých metod určení  $T_c$ , např. z polohy skoku měrného tepla (který souvisí s fázovým přechodem látky) nebo z polohy lokálního minima teplotního koeficientu elektrického odporu.

Určení Curieova bodu je jedno z nejméně jednoznačných měření. Jednotlivé výsledky se při použití různých měřicích metod, definic a tvaru vzorků mohou od sebe lišit o více než 10 K.

#### 2.3.3.4 Měření anizotropie

Nejpoužívanějším přístrojem pro měření anizotropie všech druhů magnetických materiálů je torzní magnetometr. Tento přístroj měří torzní (otočnou) sílu působící na měřený vzorek, zavěšený na vlákně v magnetickém poli, a snažící se natočit snadnou osu magnetizace vzorku do směru působícího magnetického pole.

Významným výrobcem těchto přístrojů je japonská firma TOEI. Torzní magnetometry řady TRT pracují na principu momentové kompenzace a umožňují měřit mimo anizotropie magneticky tvrdých i měkkých feromagnetik i susceptibilitu para- a diamagnetických materiálů. Výhodou je možnost měřit i malé vzorky tenkých vrstev materiálů, např. záznamových medií. Principiální schéma kompenzovaného torzního magnetometru je na obrázku 2.28.



obrázek 2.28 - Torzní magnetometr

Vzorek je připevněn na konci křemenné tyče (1) v prostoru mezi pólovými nástavci elektromagnetu (9). Na stejné křemenné tyči je ještě umístěno stínítka (5) se štěrbinou a zpětnovazební cívka (3). Celá sestava je zavěšena na torzním vlákně (2), proti horizontálním vibracím je tlumena tlumičem (6). Elektromagnet (9) je otočný pomocí podstavce s přenosem úhlové polohy do řídicí jednotky. Úhlová poloha vzorku je snímána dvojicí fotočlánků (8) osvětlených přes štěrbinu stínítka. Otočný mechanický moment, který se snaží natočit závěs se vzorkem, je kompenzován momentem vyvolaným proudem do zpětnovazební cívky (3) umístěné v poli permanentních magnetů (4). Indikátorem vyvážení obou momentů je právě poloha stínítka (5). Při správném nastavení regulátoru (7) je systém plně kompenzován a vzorek se při změnách velikosti a směru magnetického pole vyvolaného elektromagnetem (9) prakticky nepohybuje. Zpětnovazební proud do cívky (3) je potom mírou měřeného momentu.

Uvažujme nejjednodušší případ vzorku s jednoosou anizotropií se směrem snadného magnetování ležícím v rovině kolmé k závěsu. Závislost specifické anizotropní energie na úhlu a mezi směrem snadného magnetování a směrem působícího pole lze vyjádřit řadou

$$E_K = K_1 \cdot \sin^2 \alpha + K_2 \cdot \sin^4 \alpha + \dots ,$$

kde první dvě konstanty jednoosé anizotropie  $K_1$  a  $K_2$  obvykle postačí k dostatečně přesnému popisu.

Protože pro velikost mechanického momentu působícího na vzorek platí

$$M_m(\alpha) = \frac{dE_K}{d\alpha},$$

lze ze závislosti momentu na natočení působícího magnetického pole určit obě konstanty  $K_1$  i  $K_2$ .

Vzhledem k tomu, že anizotropie má vliv na tvar magnetizační charakteristiky, lze anizotropní konstanty přibližně určit i z tvaru magnetizačních charakteristik vzorku při různých směrech magnetování.

### 2.3.3.5 Měření magnetického napětí a potenciálu

K integračnímu měření změn magnetického napětí  $\Delta U_M$  se používá zvláštní úpravy měřicí cívky, tzv. Rogowskiho - Chattockova potenciometru. Jedná se o dlouhý, ohebný pásek z nemagnetického a nevodivého materiálu, který má v celé délce stejný průřez a rovnoměrně rozložené vinutí.

Uvažujme úsek délky  $\Delta s$ . Je-li průřez tohoto úseku  $A_m$  i jeho délka  $\Delta s$  dostatečně malé, lze v objemu úseku  $A_m \Delta s$  považovat pole za homogenní a závity úseku obepínají tok  $\Phi = B_s A_m = \mu_0 H_s A_m$ , kde  $B_s$  a  $H_s$  jsou průměty vektorů  $\mathbf{B}$  a  $\mathbf{H}$  do směru osy úseku  $\Delta s$ , který je tak krátký, že lze zanedbat jeho křivost. Potenciometr má rozvinutou délku  $l$  a celkový počet závitů  $N_m$ . Úsek délky  $\Delta s$  má tedy  $N_m \Delta s / l$  závitů a jeho cívkový tok je  $\Delta \Phi_c = \Phi N_m \Delta s / l = \mu_0 N_m A_m H_s \Delta s / l$ . Při velké hustotě vinutí potenciometru platí

$$\Phi_c = \mu_0 \cdot \frac{N_m \cdot A_m}{l} \int_1^2 H_s ds = \frac{\mu_0 N_m \cdot A_m}{l} \cdot U_m$$

kde  $U_m$  je magnetické napětí mezi koncovými body potenciometru 1 a 2, měřené po dráze  $c$ ,

kteřá odpovídá křivce tvořené středním vláknem jádra potenciometru. Změnu magnetického napětí  $\Delta U_m$  určíme integrací napěťového impulsu vyvolaného ve vinutí RCP změnou toku  $\Delta \Phi_c$  :

$$\Delta U_m = \frac{l}{\mu_0 N_m A_m} \cdot \Delta \Phi_c = K_{RCP} \cdot \Delta \Phi_c = K_{RCP} \cdot K_i \cdot \Delta U_2 \quad ,$$

kde  $K_{RCP} = l/(\mu_0 N_m A_m)$  je konstanta RCP [A/Vs] ,

$K_i$  konstanta integrátoru [Vs/V] ,

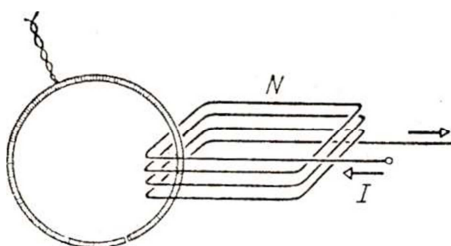
$\Delta U_2$  změna výstupního napětí integrátoru [V], vyvolaná změnou měřeného magnetického napětí  $U_m$ .

Odvozené vztahy platí pro velmi tenký potenciometr. Ve skutečnosti není měřeno magnetické napětí mezi body 1 a 2, ale mezi koncovými plochami potenciometru. Koncové průřezy tedy musí přiléhat k ekvipotenciálním plochám.

### Stanovení konstanty potenciometru

Konstantu potenciometru nelze zpravidla s dostatečnou přesností určit z rozměrů. Nejjednodušší je stanovení konstanty měřením známého magnetického napětí NI, které RCP se spojenými konci obepíná (obrázek 2.29).

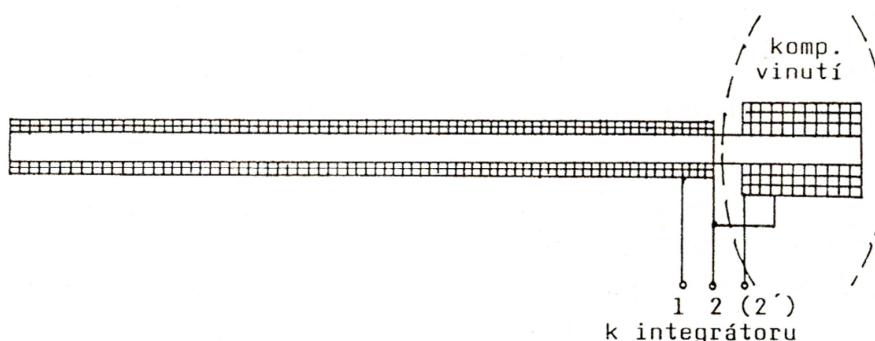
Při komutaci proudu I v cívce s N závitů zaznamená integrátor připojený k RCP změnu toku  $\Delta \Phi$  . Konstanta potenciometru  $K_{RCP} = 2NI/\Delta \Phi$  [A/Vs],



obrázek 2.29

### Přímý RCP - měření magnetického potenciálu

Přímý RCP je tvořen dlouhou, tuhou, tenkou cívkou s nevodivým a neferomagnetickým jádrem a rovnoměrným vinutím (obrázek 2.30).



obrázek 2.30

Je-li cívka dostatečně dlouhá, můžeme uvažovat, že se jeden její konec nachází v oblasti s nulovým polem (nulovým magnetickým potenciálem) a z údaje připojeného integrátoru lze určit přímo potenciál, do kterého je z původně rovněž nulového pole umístěn konec druhý. Nalezením drah, na kterých je údaj integrátoru konstantní, lze určit ekvipotenciály a vyšetřit tak tvar rozptylového pole. Přímým RCP lze rovněž měřit magnetické napětí mezi dvěma body. V tomto případě se "měřicí" konec přemístí mezi těmito body a  $U_m$  se stanoví z rozdílu údajů integrátoru. Potenciometrem přitom pohybujeme tak, aby "nulový" konec zůstal na stejném místě. Tím je eliminována chyba, která by vznikla případným pohybem "nulového" konce v nenulovém magnetickém poli.

Při měření velmi slabých rozptylových polí může ke zkreslení údaje vést vliv zemského magnetického pole, které má na našem území hodnotu cca 40 A/m. Otočení potenciometru dlouhého 25 cm, umístěného ve směru tohoto pole, o  $180^\circ$  odpovídá změně  $U_m$  mezi konci o hodnotu  $2 \times 0,25 \times 40 = 20$  A. Vliv zemského magnetického pole lze vyloučit krátkou kompenzační cívkou umístěnou na "nulovém" konci RCP. Cívka má stejnou hodnotu  $NA$  (závitovou plochu) jako RCP a je s ním spojena antisériově. Na pohyb v homogenním magnetickém poli kompenzovaný RCPP nereaguje.

Protože je třeba u RCP dodržet malý průřez, nebývá jejich citlivost příliš vysoká ( $K_{RCP}$  je velká). Např. pro průřez  $A = 3,6 \text{ mm}^2$ , délku  $l = 25 \text{ cm}$ ,  $N_m = 7\,500$  a konstantu integrátoru  $10^{-3} \text{ Vs/V}$  vychází ze vztahu pro měření magnetického potenciálu konstanta

$$\Delta U_m / \Delta U_2 = 7,4 \text{ A/mV}.$$

### 3 Shrnutí výhod, nevýhod pro otevřené a uzavřené vzorky

Při měření uzavřených vzorků byly měřicí metody rozděleny pouze podle kmitočtu na měření stejnosměrná a střídavá. Dělení měřících metod podle magnetických vlastností nemělo smysl, neboť uzavřené magneticky tvrdé vzorky nemají fyzikální význam. U vzorků otevřených je tomu jinak. Jako prvotní je dělení měřících metod z hlediska magnetických vlastností - měření magneticky tvrdých a magneticky měkkých materiálů. U magneticky tvrdých materiálů přicházejí v úvahu pouze měření stejnosměrná, u otevřených vzorků materiálů magneticky měkkých dále měřicí metody dělíme na stejnosměrné a střídavé. Správné měření vlastností materiálu je u otevřených vzorků obtížnější než u uzavřených.

Chyby u otevřených vzorků vznikají nerovnoměrným rozložením intenzity pole podél vzorku (nehomogenitou pole). Tomu lze při měření čelit tím, že se měření omezí jen na malou část vzorku, kde je intenzita pole přibližně konstantní, nebo (při měření ve jhu) kompenzací úbytků magnetického napětí na reluktancích vzduchových mezer.

Až na ojedinělé výjimky (kompenzované permeametry) nelze u otevřených vzorků určit s dostatečnou přesností intenzitu magnetického pole z magnetovacího proudu. Zatímco u toroidních vzorků se dala intenzita magnetického pole odvodit z proudu. Pouze přibližně lze stanovit intenzitu z magnetovacího proudu při magnetování ve jhu z magneticky měkkého materiálu, je-li reluktance jha a vzduchových mezer mezi vzorkem a jhem vůči reluktanci vzorku zanedbatelná. Potom počítáme intenzitu stejně jako u uzavřeného vzorku, délka siločáry odpovídá délce vzorku. Magnetická indukce na otevřeném se měří stejným způsobem jako v případě měření na uzavřených vzorcích. Použití Epsteinova rámu pro měření charakteristik otevřených vzorků při stejnosměrném magnetování je rovněž zcela analogické jako u uzavřeného (toroidního) vzorku.

Hlavní výhodou uzavřených vzorků je to, že intenzitu pole vzorku lze jednoduše stanovit z magnetizačního proudu procházejícího cívkou navinutou na vzorek. Další výhodou uzavřených vzorků je to, že lze dosáhnout homogenního pole a skutečnost, že se při měření takřka neuplatní rušivé rozptylové toky. Určitá nevýhoda je však v tom, že se poměrně obtížně (pokud nejde o rozebíratelný uzavřený obvod) opatřují magnetizačním a měřícím vinutím.

## **Závěr**

Cílem práce bylo zaměřit se na problematiku měření na otevřených vzorcích z hlediska teoretických možností, což si myslím, že se mi i podařilo. Co se týká první části, zde bylo poukázáno na hlavní veličiny a pojmy z oblasti magnetických polí, kvůli objasnění následujících kapitol. Aby si člověk mohl udělat představu při daném měření jak vlastně použité přístroje fungují, ve druhé části jsou vypsány ty nejdůležitější pro všechny typy měření na otevřených vzorcích. Měl jsem v plánu mít tuto část doplněnou o poznatky firem zabývajících se jejich výrobou nebo jejich používáním, ale z jejich strany mi prakticky nebylo vyhověno. Se stejným problémem jsem se potýkal i v kapitole následující (používané metody), firmy své informace chrání, tudíž jsem se musel spokojit s knižními publikacemi případně internetovými zdroji.



## Použitá literatura:

1. Základní pojmy. [Online] Elidis s.r.o. <http://www.elidis.cz/index.php?menu=15>.
2. **DRAXLER K.; KAŠPAR P.; RIPKA P.** *Magnetické prvky a měření*. Praha : ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01080-5.
3. O magnetech - slovník. [Online] [www.sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni\\_magnety.pdf](http://www.sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf).
4. Rozdělení materiálů podle magnetických vlastností. [Online] [www.vesi-elt.wz.cz/rp/ete\\_dok.doc](http://www.vesi-elt.wz.cz/rp/ete_dok.doc).
5. **Wikipedia**. Curieova teplota. *Wikipedia*. [Online] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Curieova\\_teploata](http://cs.wikipedia.org/wiki/Curieova_teploata).
6. **FAJT V.; HAASZ V.; SEDLÁČEK M.** *Elektrická měření*. Praha : ČVUT, 1996. ISBN 80-01-00751-0.
7. **BEJČEK L.; ČEJKA M.; REZ J.; GESCHIEDTOVÁ E.; STEIBAUER M.** [Online] [vkafa.wz.cz/eltech/Mereni\\_v\\_elektrotechnice.pdf](http://vkafa.wz.cz/eltech/Mereni_v_elektrotechnice.pdf).
8. **Stibor, Pavel.** *Měření stacionárního magnetického pole*. České Budějovice : Jihočeská univerzita, 2009. Diplomová práce.
9. Magnetické materiály. ZČU. [Online] <http://vyuka.fel.zcu.cz/ket/ETM/Cviceni/4.%20cviceni/Magnetika.pdf>.
10. <http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV.htm>. *E – learningová podpora výuky*. Praha : ČVUT.
11. Snímače polohy. *Střední průmyslová škola Zlín*. [Online] [www.spszl.cz/modules/wfdownloads/visit.php?cid=8&lid=42](http://www.spszl.cz/modules/wfdownloads/visit.php?cid=8&lid=42).
12. The torque magnetometer. [Online] <http://www.microsense.net/Collateral/Documents/English-US/The%20Torque%20Magnetometer.pdf>.
13. **HAASZ V.; SEDLÁČEK M.** *ELEKTRICKÁ MĚŘENÍ - Přístroje a metody*. Praha : ČVUT, 2005. ISBN 80-01-02731-7.
14. **KÁRA M.** *Magnetická měření materiálů pro elektrotechniku*. Plzeň : VŠSE, 1982.