

Datum měření: 14.4.2014

Skupina: 7

Jméno: David Roesel

Kroužek: ZS 7

Spolupracovala: Hystereza Schönfeldová Klasifikace:

1 Pracovní úkoly

1. Změřte hysterezní smyčku toroidu z dané feromagnetické látky a graficky ji znázorněte.
2. Určete koeritivní sílu H_K a remanenci B_R .
3. Diskutujte, jak magnetické pole země ovlivňuje měření a zda-li je možné jej s danou aparaturou měřit.

2 Vypracování

2.1 Použité přístroje

Balistický galvanometr, odporová dekáda, aparatura s toroidem, vypínačem a nastavitelným odporem, 2 přepínače, komutátor, digitální multimetr, stabilizovaný zdroj, normál vzájemné indukčnosti, vodiče.

2.2 Teoretický úvod

Pomocí hysterezní křivky vyjadřujeme závislost magnetické indukce B ve studovaném feromagnetiku na intenzitě vnějšího magnetického pole H . Během úlohy budeme používat pro měření této křivky balistického galvanometru (schéma převzaté z [1] je na Obr. 1).

Měřit budeme toroid z feromagnetického materiálu, na kterém je navinuta cívka. Bude-li touto cívkou procházet proud, bude tím vytvářet magnetické pole H . Magnetickou indukci B ve zkoumaném vzorku můžeme zkoumat pomocí měrné cívky v obvodu za pomoci balistického galvanometru.

Za jistých předpokladů můžeme jinak složitě popsatelný průběh magnetického pole uvnitř vzorku aproximovat. Používáme-li hustě vinutý toroid, budou magnetické siločáry nabývat tvaru kružnic, které budou ležet v rovinách kolmých k rotační ose toroidu a jejich středy budou ležet v této ose. Intenzita magnetického pole bude mít stejnou velikost podél celé siločáry. Jako další z předpokladů bereme, že šířka toroidu bude mnohem menší, než poloměr jeho střední kružnice, což nám dovoluje uvažovat v toroidu magnetické pole homogenní. Platit pro něj potom bude

$$H = \frac{n_1 I}{2\pi r}, \quad (1)$$

kde n_1 je počet závitů magnetizační cívky, I je proud v ní procházející a r je poloměr střední kružnice toroidu.

Pro magnetickou indukci v toroidu platí

$$B = \frac{\Phi}{N_2 S}, \quad (2)$$

kde Φ je magnetický tok procházející cívkou, N_2 je počet závitů cívky a S její průřez. Vzhledem k tomu, že měříme magnetizační tok toroidu, nevznikají žádné póly a nemusíme uvažovat jejich demagnetizační vliv.

Změna magnetické indukce se tím pádem rovná

$$\Delta B = B_1 - B_2 = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{N_2 S}. \quad (3)$$

Faradayův zákon nám dává vztah

$$-\frac{d\Phi}{dt} = U = R \cdot I, \quad (4)$$

kde U a I jsou napětí a proud v měřené cívce a R je odpor obvodu s galvanometrem.

Jde o rovnici, která se dá řešit separací. Pro časový interval $t_1 - t_2$ za změny magnetického indukčního toku v intervalu $\Phi_1 - \Phi_2$ dostáváme

$$\int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi = -R \int_{t_1}^{t_2} i dt. \quad (5)$$

V případě, že je $Q = \int_{t_1}^{t_2} i dt$ celkový náboj, který projde balistickým galvanometrem, bude platit

$$\Phi_1 - \Phi_2 = RQ. \quad (6)$$

Pro tento náboj dále platí

$$Q = K_b \lambda s_1, \quad (7)$$

kde K_b je balistická konstanta, λ činitel závislý na tlumení galvanometru a s_1 balistická výchylka redukovaná na délku kruhového oblouku.

Pro změnu magnetické indukce ΔB tedy celkově dostáváme

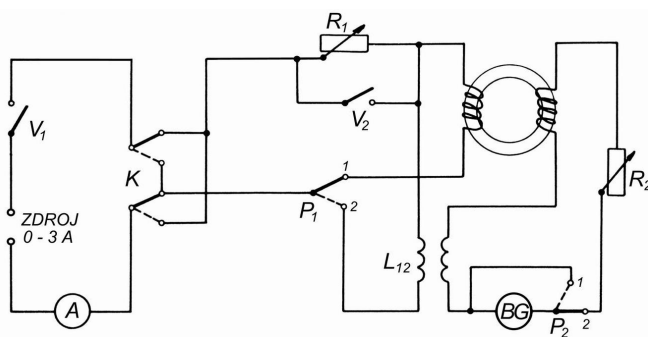
$$\Delta B = \frac{RK_b \lambda s_1}{N_2 S}. \quad (8)$$

Pro výpočet ale potřebujeme zjistit členy K_b a λ , což provedeme cejchováním galvanometru. Budeme-li komutovat proud I_1 , který prochází primární cívkou normálu vzájemné indukčnosti, bude před komutací magnetický indukční tok sekundární cívkou roven $\Phi_1 = L_{12}I_1$ a po komutaci $\Phi_2 = -L_{12}I_1$. Celkovou změnu indukčního toku, která v galvanometru kumuluje náboj Q_1 , můžeme zapsat ve tvaru $\Delta\Phi = 2L_{12}I_1$. Pro tento náboj tím pádem dostáváme dva vztahy

$$2L_{12}I_1 = RQ_1, \quad Q_1 = K_b \lambda s_1^* \quad (9)$$

a celkem

$$RK_b \lambda = \frac{2L_{12}I_1}{s_1^*}. \quad (10)$$



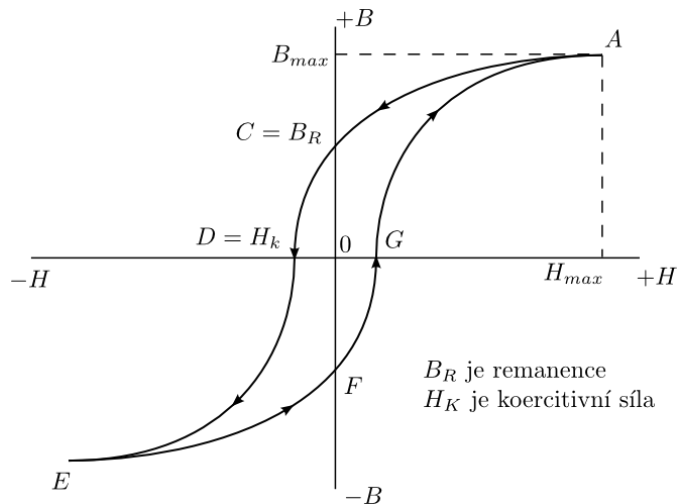
Obr. 1: Schéma zapojení. Převzato z [1].

2.3 Postup měření

Vzhledem k nefunkční aparatuře jsme dostali referenční naměřené hodnoty. Úlohu jsme se však snažili usilovně měřit celé praktikum a postupovali jsme podle následujícího postupu.

Aparaturu jsme zapojili podle zadání, tedy dle Obr. 1. Zdroj napětí jsme nastavili tak, abychom dosahovali maximálně 600 mA. V našem nastavení aparatury se nepovedlo dostat na nižší hodnotu než 15 mA. Jako odpor

R_2 jsme dle zadání zapojili dekádu a nastavili na ní takový odpor, aby při proudu I_{max} , zapnutém vypínači V_2 a přepínači P_1 v poloze 1 byla značka balistického galvanometru stále na stupnici. V našem případě se jednalo o $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$, což ale nemusí odpovídat námi zpracovávaným datům. Proud I_{max} jsme podle zadání volili 600 mA a během měření jsme se ujistovali, že se hodnota nezměnila, abychom proměřovali stále stejnou hysterezní smyčku.



Obr. 2: Teoretická podoba hysterezní smyčky. Převzato z [1]

Nejprve jsme provedli cejchování balistického galvanometru. Přepínač P_1 jsme nechali v poloze 2 a na zdroji jsme nastavili nějaký proud v rozsahu 0 – 600 mA. Poté jsme několikrát komutovali proud a zaznamenávali jsme výchylky na galvanometru s_1^* a s_1^{**} v obou směrech. Aritmetickým průměrem pak spočítáme závěrečnou hodnotu výchylky (výchylky s_1^* i s_1^{**} by měly být při každém měření téměř stejné).

Měření jsme dále prováděli podle následujících kroků (za používání značení z Obr. 2).

- *Proměření úseku A–C*: Přepínač P_1 dáme do polohy 1. Vypínač V_2 vypneme a skrze změny odporu R_1 nastavíme určitou hodnotu proudu od 0 do I_{max} . Poté vypínač V_2 zapneme a několikrát komutujeme proud pomocí komutátoru K , čímž pokaždé proběhneme hysterezní smyčku. Jednu z poloh komutátoru "nahore" určíme jako odpovídající bodu A (opačná tím pádem bude odpovídat bodu E) a tu nastavíme. Vypnutím vypínače V_2 rychle změním hodnotu proudu z I_{max} na předem stanovené I . To nám dá možnost změřit výchylku na galvanometru s_1 , kterou odečteme a zaznamenáme. Před každým vypnutím V_2 počkáme, než se ukazatel galvanometru ustálí na nulové pozici. Celý postup opakujeme pro více hodnot stanoveného proudu I (tedy bodů křivky).
- *V bodě C*: Místo V_2 vypneme přímo vypínač V_1 a vůbec nenastavujeme odpor R_1 .
- *Proměření úseku C–E*: Postupujeme analogicky, jen při vypínání V_2 zároveň komutujeme.
- *Proměření úseku E–F*: Postup identický s tím pro úsek $A–C$, jen se změní počáteční poloha komutátoru na polohu "dole".
- *V bodě F*: Postup identický jako u C , jen se změní počáteční poloha komutátoru na polohu "dole".
- *Proměření úseku F–A*: Opět postupujeme stejně jako na úseku $C–E$, jen bude komutátor nastaven na polohu "dole" a během vypínání V_2 budeme komutovat na polohu "nahore".

V průběhu celého měření neměníme odpor R_2 , závisí na něm totiž absolutní výchylka galvanometru (tedy to, kterou hysterezní křivku proměřujeme).

K zapojení galvanometru do obvodu využíváme přepínače P_2 . Pokud zrovna chceme nastavovat proud, případně komutovat před vlastním měřením, můžeme díky němu regulovat tlumení galvanometru.

2.4 Naměřené hodnoty

Vzhledem k tomu, že námi naměřené hodnoty nestačily ke kompletnímu vypracování úlohy, uvádíme pouze obdržená referenční data. Konstanty vystupující v našich výpočtech jsme brali v úvahu následovně: $r = 17,1$ mm, $N_1 = 62$, $N_2 = 400$, $L_{12} = 7,27$ mH a $S = 24,3$ mm².

Naměřené hodnoty z cejchování balistického galvanometru jsou uvedeny v Tab. 2. Z nich jsme pomocí vztahu (10) dopočítali veličinu $RK_b^{(\rho)}\lambda$ a určili její velikost i s chybou spočítanou podle (6.2) na

$$RK_b^{(\rho)}\lambda = (0,3 \pm 0,1) \frac{\text{HA}}{\text{m}}. \quad (11)$$

Zbytek naměřených hodnot, které uvádíme v Tab. 2, jsme zpracovali a vynesli do grafu na Obr. 3. Z nastavovaných proudů I jsme pomocí vztahu (1) spočítali hodnoty intenzity magnetického pole H . Pomocí vztahu (8) jsme ze spočítaného $RK_b^{(\rho)}\lambda$ dopočítali finální hodnoty změny magnetické indukce ΔB , čímž jsme získali body námi studované závislosti. Přímou z naměřených hodnot jsme mohli odečíst remanenci, kterou jsme určili i s chybou podle (6.4) jako

$$B_R = (1,0 \pm 0,4) \text{ T}, \quad (12)$$

přičemž jsme uvažovali chybu změření výchylky $\sigma_s = 0,1$ cm. K zjištění koercitivní síly jsme určili lineární extrapolaci dvou nejbližších hodnot k ose x přibližný průsečík hysterezní křivky s touto osou. Finální hodnotu koercitivní síly tedy odhadujeme i s chybou na

$$H_K = (15 \pm 5) \text{ A/m}. \quad (13)$$

2.5 Diskuse

Vzhledem k tomu, že jsme zpracovávaná data neměřili my, nemůžeme dost dobře diskutovat jejich přesnost, případně možné chyby měření. Z námi provedených měření však bylo patrné, že jádrem celé úlohy je relativně nestabilní zdroj napětí, které značně kolísalo. Některé ze součástí v obvodu už byly trochu starší a není jisté, jak moc se na ně dalo spolehnout. Z časových důvodů také při měření není možné čekat na dokonalé ustálení ukazatele balistického galvanometru a to do měření zanáší, ač malou, další chybu. Balistický galvanometr se také měl tendenci sám od sebe vychylovat z rovnovážné polohy a ta se v průběhu našeho měření změnila až o centimetr.

Jak v námi naměřených hodnotách, tak ve zpracovávaných datech byl znatelný rozdíl v hodnotách $RK_b^{(\rho)}\lambda$ určených při cejchování galvanometru. Finální hodnotu by šlo zpřesnit provedením více měření a tím pádem průměrováním většího počtu hodnot. Chyba při určování této konstanty však nezmění nic než sklon hysterezní smyčky, takže by na číselné výsledky neměla mít velký vliv.

Hodnota remanence se dá určit poměrně přesně, avšak velikost koercitivní síly je opravdu pouze odhadem z lineárního propojení nejbližších bodů. Stejně tak je obtížné dobře odhadnout velikost chyby této hodnoty. Jak remanence, tak koercitivní síla při tomto experimentu navíc záleží na posunutí hysterezní smyčky ve směru osy y , které jsme prováděli čistě z aritmetických průměrů extrémů naměřených hodnot a z předpokladu, že musí být hodnoty extrémů hysterezní smyčky symetrické podle os x i y . Experiment nás však s hysterezní smyčkou dobře seznámil.

Teoreticky by naše měření mohlo ovlivňovat magnetické pole Země. Jeho povrchová intenzita se však pohybuje mezi 24 až 66 μT [4], což je zcela jistě pod rozlišovací schopnosti naší aparatury. Z tohoto důvodu není možné účinek magnetického pole Země změřit.

3 Závěr

Změřili jsme hysterezní smyčku toroidu z dané feromagnetické látky a graficky jsme ji znázornili.

Určili jsme koercitivní sílu H_K a remanenci B_R a buď vypočítali, nebo se pokusili odhadnout jejich chyby.

Diskutovali jsme, jak magnetické pole země ovlivňuje měření a zda-li je možné jej s danou aparaturou změřit.

4 Použitá literatura

- [1] Kolektiv KF, *Návod k úloze: Měření hysterezní smyčky balistickým galvanometrem* [Online], [cit. 27. dubna 2014] http://praktikum.fjfi.cvut.cz/pluginfile.php/415/mod_resource/content/3/HystSmycka_2012v2.pdf
- [2] Kolektiv KF, *Chyby měření* [Online], [cit. 27. dubna 2014] <http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/chybynav/chyby-o.pdf>
- [3] J. Mikulčák a kol., *Matematické, fyzikální a chemické tabulky & vzorce*. Prometheus, Praha 2009. ISBN 978-80-7196-264-9
- [4] geomag.bgs.ac.uk, *The Earth's Magnetic Field: An Overview* [Online], [cit. 27. dubna 2014] <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html>

Přílohy

5 Domácí příprava

Domácí příprava je přiložena k protokolu.

6 Statistické zpracování dat

Pro statistické zpracování využíváme aritmetického průměru:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (6.1)$$

jehož chybu spočítáme jako

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6.2)$$

kde x_i jsou jednotlivé naměřené hodnoty, n je počet měření, \bar{x} aritmetický průměr a σ_0 jeho chyba [2]. Při nepřímém měření počítáme hodnotu s chybou dle následujících vztahů:

$$u = f(x, y, z, \dots), \quad (6.3)$$

$$x = (\bar{x} \pm \sigma_x), \quad y = (\bar{y} \pm \sigma_y), \quad z = (\bar{z} \pm \sigma_z), \quad \dots,$$

kde u je veličina, kterou určujeme nepřímo z měřených veličin x, y, z, \dots

Pak

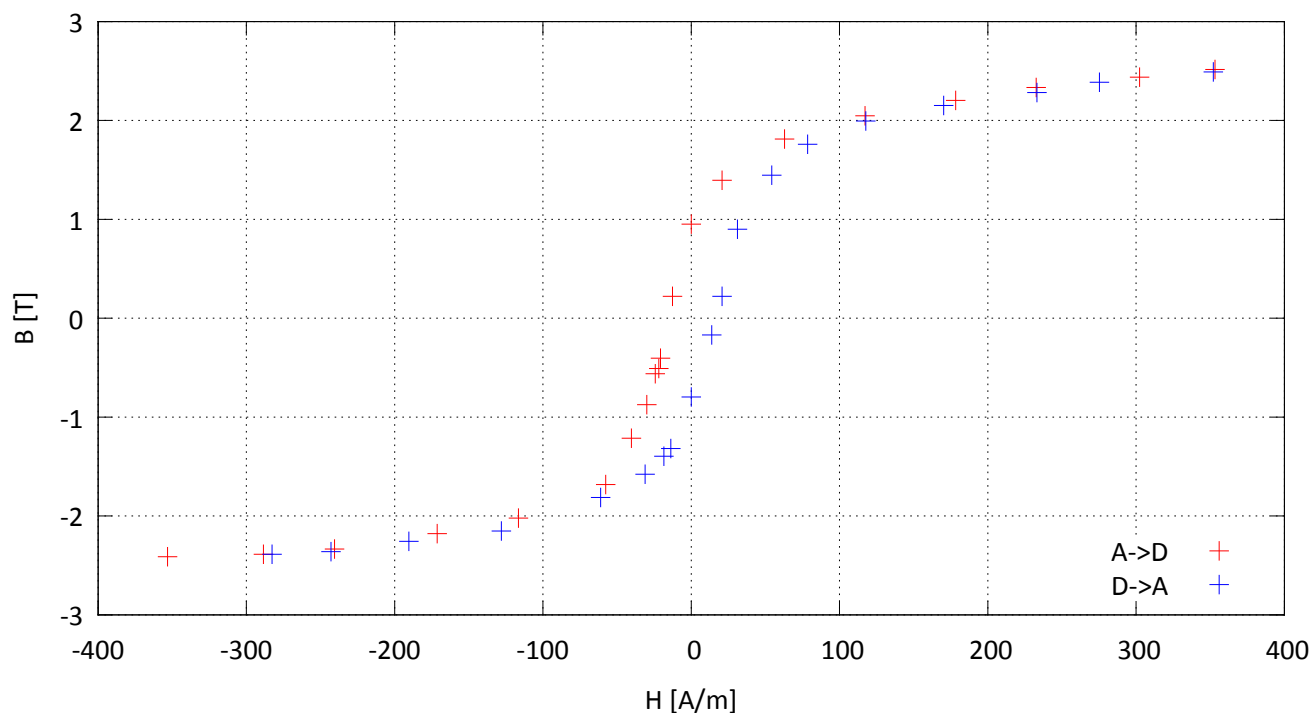
$$\bar{u} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots),$$

$$\sigma_u = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots}, \quad (6.4)$$
$$u = (\bar{u} \pm \sigma_u).$$

7 Tabulky a grafy

I [mA]	x [mm]	I [mA]	x [mm]	$RK_b^{(\rho)} \lambda_1$ [HA/m]	$RK_b^{(\rho)} \lambda_2$ [HA/m]
331	-9	351	8	-0,53	0,64
714	-142	718	145	-0,07	0,07
576	-82	576	83	-0,10	0,10

Tab. 1: Zpracovávané hodnoty cejchování balistického galvanometru; I je stanovený proud, x výchylka odečtená z galvanometru, $RK_b^{(\rho)} \lambda_{1,2}$ z jednotlivých měření dopočítávaný hledaný činitel.



Obr. 3: Hysterezní křivka sestavená ze zpracovávaných dat. Posunutí bylo určeno jako aritmetický průměr extrémů obou měření.

$A \rightarrow D$		$D \rightarrow A$		$A \rightarrow D$		$D \rightarrow A$	
I [mA]	x [cm]	I [mA]	x [cm]	H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]
612	0,0	610	19,2	353,16	2,52	352,00	2,49
-612	-18,9	-24	4,6	-353,16	-2,41	-13,85	-1,32
524	-0,3	-32	4,3	302,38	2,44	-18,47	-1,40
403	-0,7	-54	3,6	232,55	2,33	-31,16	-1,58
309	-1,2	-106	2,7	178,31	2,20	-61,17	-1,81
203	-1,8	-222	1,4	117,14	2,05	-128,11	-2,15
109	-2,7	-330	1,0	62,90	1,81	-190,43	-2,26
36	-4,3	-421	0,6	20,77	1,40	-242,94	-2,36
0	-6,0	-490	0,5	0,00	0,95	-282,76	-2,39
-36	-11,2	0	6,6	-20,77	-0,40	0,00	-0,80
-100	-16,1	477	18,8	-57,71	-1,68	275,25	2,39
-202	-17,4	404	18,4	-116,56	-2,02	233,13	2,28
-297	-18,0	295	17,9	-171,38	-2,18	170,23	2,15
-417	-18,6	204	17,3	-240,63	-2,33	117,72	1,99
-500	-18,8	54	13,1	-288,53	-2,39	31,16	0,90
-38	-11,6	24	9,0	-21,93	-0,51	13,85	-0,17
-42	-11,8	36	10,5	-24,24	-0,56	20,77	0,22
-52	-13,0	94	15,2	-30,01	-0,87	54,24	1,45
-70	-14,3	136	16,4	-40,39	-1,21	78,48	1,76
-22	-8,8			-12,70	0,22		

Tab. 2: Zpracovávané hodnoty; I jsou stanovené proudy, na které jsme přepínali, x jsou výchylky na balistickém galvanometru zaznamenané při přepnutí na každý z proudů. H jsou podle (1) dopočítané hodnoty intenzity magnetického pole a B hodnoty magnetické indukce spočítané podle (8). Data jsou vyneseny ve zvláštních sloupcích pro měření od teoretického bodu A směrem k bodu D a naopak.