

## LUCRAREA 5

# PROPRIETĂȚI ALE MATERIALELOR FEROMAGNETICE ȘI FERIMAGNETICE LA SEMNAL MARE

### 1.Scopul lucrării

Scopul acestei lucrări de laborator este determinarea dependenței permeabilității complexe relative magnetice a materialelor feromagnetice în funcție de frecvență, evidențierea curbei de histerezis care caracterizează aceste materiale și influența întrefierului asupra proprietăților de material.

### 2.Conspectul platformei

Câteva metale (Fe, Ni, Co) sau aliajele lor sunt materiale reprezentative pentru clasa materialelor feromagnetice. Acestea se caracterizează (la temperaturi inferioare temperaturii Curie) prin domenii (Weiss) magnetizate spontan la saturație, dar orientate dezordonat în absența unui câmp magnetic exterior. Plasarea acestor materiale în câmp magnetic are ca rezultat orientarea momentelor dipolare ale domeniilor în direcția câmpului exterior. În medii magnetice se pot scrie relațiile (ec. Maxwell):

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}, \quad \text{div} \vec{B} = 0, \quad \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

unde  $\vec{H}$  este intensitatea câmpului magnetic;  $\vec{J}$  este polarizarea magnetică;  $\vec{B}$  este inducția magnetică; și  $\vec{M}$  este magnetizarea materialului.

Caracteristicile cele mai importante ale materialelor feromagnetice sunt curbele de magnetizare  $B = f(H)$  obținute prin aplicarea unui câmp progresiv crescător unui material inițial demagnetizat.

În cazul câmpurilor alternative se disting în general două regimuri tipice de funcționare:

- regimul de “semnal mic” cu amplitudine redusă a câmpului alternativ  $H_m$  aplicat, suprapus sau nu, peste un câmp continuu  $H_0$ ;
- regimul de “semnal mare” în care valoarea câmpului  $H$  este suficientă pentru ca materialul să descrie un ciclu de histerezis.

Permeabilitățile uzuale:

- inițială (I) – caracterizează materialul în primul domeniu de reversibilitate; este mai mult teoretică și depinde de cât de aproape de zero poate ajunge intensitatea câmpului magnetic  $H$ ;

- reversibilă (II) – este proporțională cu panta ciclului reversibil descris de material în jurul stării  $H=H_0$ ,  $B=B_0$

- de amplitudine (III) – este mai practică fiind dată de panta ciclului de histerezis în zona III.

Dependența dintre permeabilitatea de amplitudine  $\mu_a$  și intensitatea câmpului  $H$  este descrisă de curba Rayleigh, care se poate aproxima printr-o dreaptă pentru valori reduse ale câmpului de vârf.

În câmpuri alternative materialul parcurge diverse cicluri de histerezis date de dependența neliniară dintre inducția magnetică și câmp.

Datorită pierderilor de energie prin curenți induși (Foucault), histerezis, magnetizare, permeabilitatea magnetică a materialului se definește (în complex simplificat) ca fiind:

$$\underline{\mu} = \mu' - j\mu'' = \frac{\underline{B}}{\mu_0 \underline{H}} = \frac{B}{\mu_0 H} e^{-j\delta_m}$$

unde  $\underline{B}$  și  $\underline{H}$  sunt fazorii inducției și câmpului alternativ aplicat, iar  $\delta_m$  este unghiul de pierderi.

Pentru un miez toroidal cu întrefier având parametri  $A$  (aria miezului),  $l_m$  (lungimea miezului), respectiv  $\delta$  (lungimea întrefierului),  $A_\delta$  (aria întrefierului) - putem considera un miez echivalent fără întrefier cu parametri  $l_e$ ,  $A_e$  (Fig. 5-4) și permeabilitatea echivalentă (efectivă) dată de relația:

$$\underline{\mu}_e = \mu'_e - j\mu''_e = \frac{\mu'}{1 + \sigma\mu'} - j \frac{\mu''}{(1 + \sigma\mu')^2}$$

$$\underline{\mu}_e \cong \frac{\underline{\mu}}{1 + \sigma\underline{\mu}}; \text{ unde } \sigma = \frac{\delta}{l_m + \delta} \cdot \frac{A}{A_\delta} \text{ este factorul de demagnetizare}$$

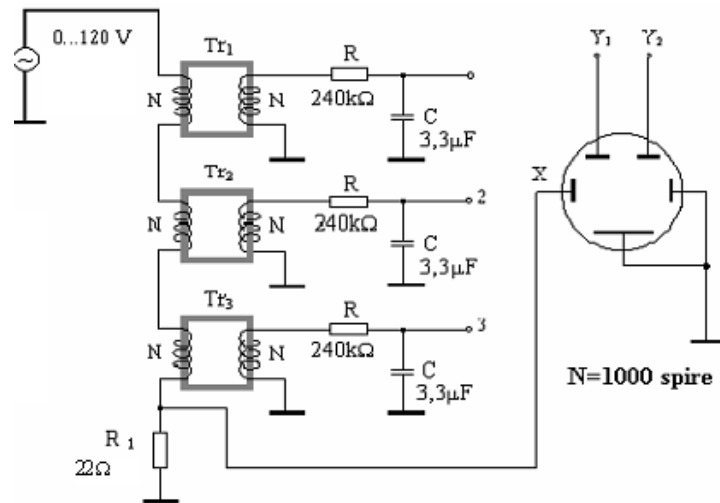
Așadar, întrefierul duce la scăderea permeabilității complexe, în special a pierderilor (date de partea imaginară), rezultând o creștere a factorului de calitate al materialului echivalent.

În materiale ferice și feromagnetice putem avea pierderi prin histerezis, pierderi prin curenți turbionari (Foucault), distorsiuni de armonica a-III-a datorită neliniarității miezului și pierderi reziduale. Pierderile prin histerezis sunt pierderi sub formă de energie care apar la deplasarea ireversibilă a pereților dintre domeniile de magnetizare spontană și sunt proporționale cu suprafața ciclului de histerezis.

În cazul pierderilor prin curenți turbionari se demonstrează că puterea și factorul de pierderi scad proporțional cu rezistivitatea. Din acest motiv, miezurile feromagnetice (mai ales cele utilizate la frecvențe mai mari) se realizează din tole cât mai subțiri, izolate între ele (prin lăcuire, oxidare etc.) sau se folosesc materiale ferimagnetice de mare rezistivitate (ferite). Acesta este și motivul pentru care la frecvența de 1kHz se vor compara materialele ferimagnetice în circuit închis, respectiv cu întrefier.

### 3.Desfasurarea lucrarii

- generator de semnal 33220A, 20MHz, Agilent, pct. 8.3 din Capitolul 8 (Materiale pentru Electronică. Îndrumar)
- amplificator de putere (handmade in laboratorul de Materiale), pct. 8.3.3.4 Capitolul 8 (Materiale pentru Electronică. Îndrumar);
- osciloscop Instek GOS 635G (35MHz) sau osciloscop numeric DSO 3102 A, 100 MHz, Agilent, punctele 8.4 și 8.5 Capitolul 8 (Materiale pentru Electronică. Îndrumar);
- platforma de laborator;



$N=1000$  de spire

$R_1=22\Omega$

$R=240k\Omega$

$C=3.3\mu F$

$l_e = 190 \text{ mm}; A_e = 190 \text{ mm}^2$

$\mu_0=4\pi*10^{-7} \text{ N}\cdot\text{A}^{-2}$

**Tabelul 5-2.**

	Tensiunea generatorului [mV]	100	120	140	160	180	200	220	250
Tr 1 Fe-Si	$H_{\max}$ [mV]	160	160	170	204	236	266	310	378
	$H$ [A/m]*	38.278	38.278	40.670	48.804	56.459	63.636	74.163	90.431
	$H_c$ [mV]	78	78	88	98	104	120	120	130
	$H_c$ [A/m]*	18.660	18.660	21.053	23.445	24.880	28.708	28.708	31.100
	$B_{\max}$ [mV]	54	66	73	85	95	102	113	125
	$B_{\max}$ [T]*	0.225	0.275	0.304	0.354	0.396	0.425	0.471	0.521
	$B_{\text{rem}}$ [mV]	32	40	47	51	57	62	68	72
	$B_{\text{rem}}$ [T]*	0.133	0.167	0.196	0.213	0.238	0.258	0.283	0.300
	$\mu_1 = \frac{B_{\max}}{\mu_0 H_{\max}}$	$4.682*10^3$	$5.722*10^3$	$5.957*10^3$	$5.780*10^3$	$5.584*10^3$	$5.319*10^3$	$5.056*10^3$	$4.587*10^3$
Tr 2 Ferita Mn-Zn fara intrefier	Tensiunea generatorului [mV]								
	$H_{\max}$ [div]	126	152	172	190	230	266	278	368
	$H$ [A/m]*	30.144	36.364	41.148	45.455	55.024	63.636	66.507	88.038
	$H_c$ [mV]	42	44	50	54	54	52	56	60
	$H_c$ [A/m]*	10.048	10.526	11.962	12.919	12.919	12.440	13.397	14.354
	$B_{\max}$ [mV]	34	39	45	50	57	64	68	74
	$B_{\max}$ [T]*	0.142	0.163	0.188	0.208	0.238	0.267	0.283	0.308
	$B_{\text{rem}}$ [mV]	14	15	19	19	21	25	27	27
	$B_{\text{rem}}$ [T]*	0.058	0.063	0.079	0.079	0.088	0.104	0.113	0.113
	$\mu_2 = \frac{B_{\max}}{\mu_0 H_{\max}}$	$3.743*10^3$	$3.559*10^3$	$3.629*10^3$	$3.650*10^3$	$3.437*10^3$	$3.337*10^3$	$3.393*10^3$	$2.789*10^3$

	Tensiunea generato- rului [mV]	100	120	140	160	180	200	220	250
Tr 3 Ferita Mn-Zn cu intrefier	Tensiunea generatorului [mV]								
	H <sub>max</sub> [mV]	120	148	176	200	224	268	304	360
	H [A/m]*	28.708	35.407	42.105	47.847	53.589	64.115	72.727	86.124
	H <sub>c</sub> [mV]	18	26	32	32	44	28	42	50
	H <sub>c</sub> [A/m]*	4.306	6.220	7.656	7.656	10.526	6.699	10.048	11.962
	B <sub>max</sub> [mV]	13	18	21	26	28	34	39	45
	B <sub>max</sub> [T]*	0.054	0.075	0.088	0.108	0.117	0.142	0.163	0.188
	B <sub>rem</sub> [mV]	3	2	6	6	8	11	8	10
	B <sub>rem</sub> [T]*	0.013	0.008	0.025	0.025	0.033	0.046	0.033	0.042
	$\mu_3 = \frac{B_{max}}{\mu_0 H_{max}}$	1.502*10 <sup>3</sup>	1.687*10 <sup>3</sup>	1.655*10 <sup>3</sup>	1.803*10 <sup>3</sup>	1.734*10 <sup>3</sup>	1.759*10 <sup>3</sup>	1.779*10 <sup>3</sup>	1.734*10 <sup>3</sup>

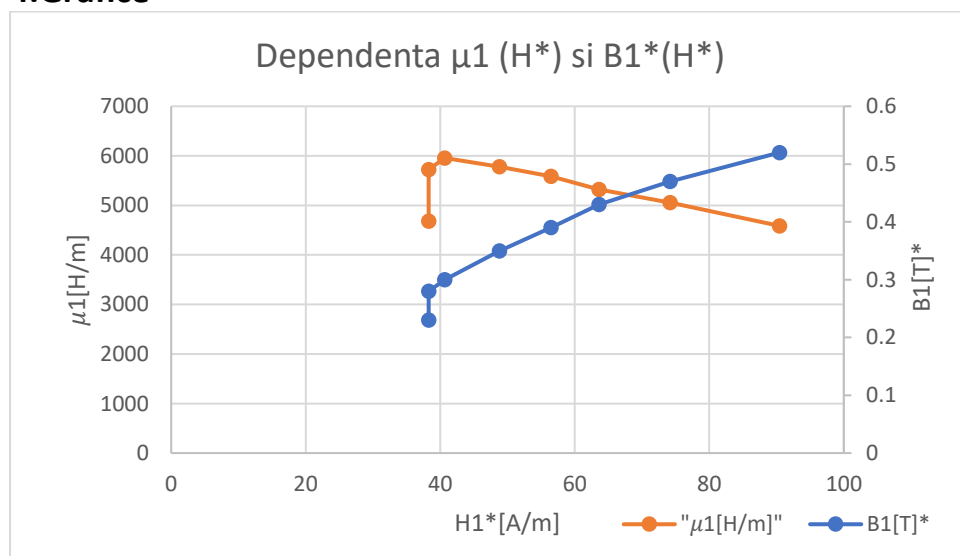
Relații de conversie pentru H și B:

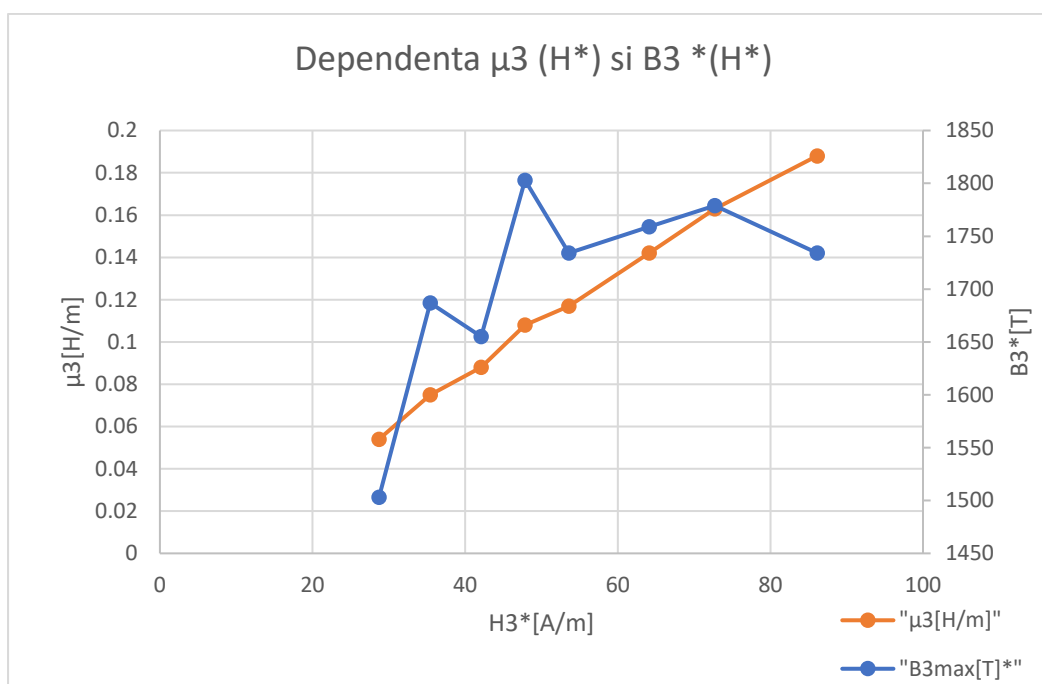
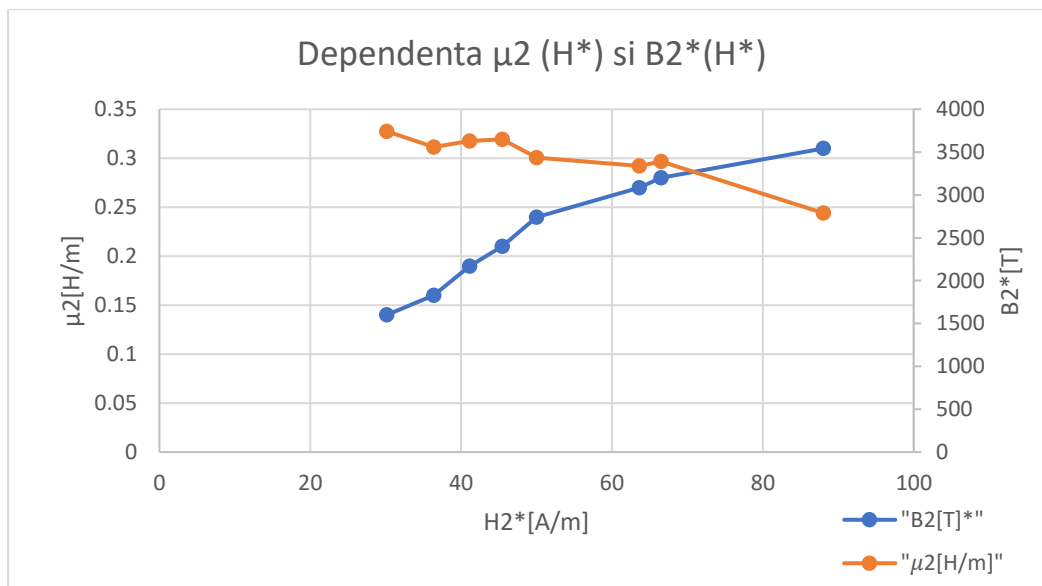
$$H = \frac{N_1 \cdot U_x}{R_1 \cdot l}$$

$$B = \frac{R \cdot C \cdot U_y}{N_2 \cdot A_e}$$

$U_x$ :  $H_{max}$ ,  $H_c$  măsurate în mV;  
 $U_y$ :  $B_{max}$ ,  $B_{rem}$  măsurate în mV.

#### 4.Grafice





Calculul grosimii intrefierului:

Calculăm grosimea interfeței:

$$\mu_e = \frac{\mu'}{1 + \sigma \mu'} \quad , \quad \sigma = \frac{\delta}{l}$$

$$\mu_e l = 1,003 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{A}^2 \cdot \text{H}_e = 190 \text{ mm}$$

$$\mu' = 3,443 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$$

$$\mu_e = \frac{\mu'}{1 + \sigma \mu'} \Rightarrow \sigma \mu' = \frac{\mu'}{\mu_e l} - 1 \Rightarrow \sigma = \frac{\frac{\mu'}{\mu_e l} - 1}{\mu'} =$$

$$= \frac{\frac{3,443 \cdot 10^3}{1,003 \cdot 10^3} - 1}{1,003 \cdot 10^3} = \frac{2,075 - 1}{1,003 \cdot 10^3} = \frac{1,075}{1,003 \cdot 10^3} = 0,596 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma = \frac{\delta}{l} \Rightarrow \delta = \sigma \cdot l = 0,596 \cdot 10^{-3} \cdot 190 = 113,384 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \\ = 0,113384 \text{ mm}$$

## 5. Concluzii

În cazul materialului feromagnetic (Fe-Si) inducția magnetică (B) și permeabilitatea magnetică ( $\mu$ ) sunt mai mari, decât în cazul materialului



ferimagnetic (Mn-Zn). In cazul metrialului ferimagnetic (Mn-Zn) inductia magnetica (B) si permeabilitatea magnetica ( $\mu$ ), sunt mai mari decat in cazul materialului ferimagnetic care are intrefier, si implicit materialul feromagnetic are inductia magnetica (B) si permeabilitatea magnetica ( $\mu$ ) sunt mai mari decat materialul ferimagnetic care contine intrefier.

## 6.Probleme și întrebări

### 1. Asemănări și deosebiri între materialele feromagnetice și ferimagnetice.

Asemanarile dintre cele doua materiale sunt:

- ➔ În materiale feri și feromagnetice putem avea pierderi prin histerezis, pierderi prin curenți turbionari (Foucault), distorsiuni de armonica a-III-a datorită neliniarității miezului și pierderi reziduale
- ➔ Au proprietati puternice de magnetizare
- ➔ Magnetizarea exista atata timp cat campul magnetic exista
- ➔ Campul magnetic ordoneaza momentele magnetice

Iar deosebirile sunt :

- ➔ Materialele feromagnetice sunt susceptibile la camp, maomentele se ordoneaza spontan in absenta campului, nu e aceeași in tot materialul
- ➔ Materialele ferimagnetice au momente de magnetizare, momentele se magnetizeaza pe aceeași directie in sensuri opuse, au rezistenta mai amre la factori exteriori si au magnetizare mai slaba

### 2. Să se deducă relația care definește permeabilitatea efectivă a unui miez cu întrefier (ec. 5.3).

Handwritten derivation of the effective permeability formula for a magnetic core with an air gap. The derivation starts with the formula for effective permeability  $\mu_e$  and the magnetic field strength  $H$  in a core with length  $l_m$  and air gap length  $l$ .

$$\mu_e = \frac{\mu}{1 + \frac{l}{l_m} \frac{\mu}{\mu_0}} ; \quad H = \frac{I}{l_m + l} \cdot \frac{A}{A_0}$$
$$\Rightarrow \mu_e = \frac{\mu}{1 + \frac{l}{l_m} \frac{A}{A_0} \frac{\mu}{\mu_0}}$$

Legend:

- $A$  - aria miezului
- $l_m$  - lungimea miezului
- $l$  - grosimea întrefierului
- $A_0$  - aria întrefierului
- $\sigma$  - factorul de demagnetizare

### 3. Descrieți permeabilitatea de amplitudine și domeniul Rayleigh pentru un material feromagnetic.

Permeabilitatea de amplitudine este mai practică fiind dată de panta ciclului de histerezis în zona III. Dependența dintre permeabilitatea de amplitudine  $\mu_a$  și intensitatea câmpului  $H$  este descrisă de curba Rayleigh, care se poate aproxima printr-o dreaptă pentru valori reduse ale câmpului de vârf.

Curba Rayleigh descrie dependența dintre permeabilitatea de amplitudine și intensitatea câmpului  $H$ . Această curbă se poate aproxima printr-o dreaptă în cazul valorilor reduse ale câmpului de vârf.

### 4. Cum influențează frecvența alura ciclurilor de histerezis?

Frecvența influențează alura ciclurilor de histerezis, deoarece odată cu creșterea frecvenței crește și alura ciclurilor. Rezultă pierderi mai mari.

### 5. Comentați ce rol are întrefierul asupra permeabilității dinamice și a inducției pentru materialele feromagnetice.

Așadar, întrefierul duce la scăderea permeabilității complexe, în special a pierderilor (date de partea imaginară), rezultând o creștere a factorului de calitate al materialului echivalent.

### 6. Influențează întrefierul asupra pierderilor dintr-un material magnetic?

Prezența întrefierului determină pierderi mai mici prin histerezis.

### 7. Ce semnificație are semnul minus de la exponentul ec. (5.2)?

$$\underline{\mu} = \mu' - j\mu'' = \frac{\underline{B}}{\mu_0 \underline{H}} = \frac{B}{\mu_0 H} e^{-j\delta_m}$$
 - semnul minus apare în urma transformării permeabilității din complex

### 8. Să se calculeze pierderile într-o bobină cu miez de fier ce realizează un circuit magnetic închis cunoscând inductanța bobinei fără miez ( $L_0$ ), permeabilitatea complexă relativă $\underline{\mu} = \mu' - j\mu''$ și rezistența înfășurării ( $r$ )



3.  $\tan \delta = \frac{R}{\omega L}$  - tangenta unghiului de pierdere  
 $L = L_0 \quad R = r$

$\tan \delta = \frac{r}{\omega L_0} \Rightarrow \delta = \arctan \left( \frac{r}{\omega L_0} \right)$

$\mu = \mu' - j\mu'' \Rightarrow \mu = \frac{\mu}{1 + \frac{\delta}{\tan \delta}} \cdot \frac{A}{A_0} \mu = \frac{\mu}{1 + \frac{\arctan \left( \frac{r}{\omega L_0} \right)}{\tan \delta}} \cdot \frac{A}{A_0} \mu$

### 9. Pierderi prin histerezis în materiale magnetice la inducții mici.

La inducții mici, pierderile prin histerezis în materiale magnetice sunt, de asemenea, mici, fapt datorat dependenței neliniare dintre B și H.

### 10. Comentări pierderile prin curenți turbionari în materiale magnetice la frecvențe joase și inducții mici.

Când pierderile au loc prin curenți turbionari, puterea și factorul de pierdere scad direct proporțional cu rezistivitatea. La frecvențe joase și inducții mari, pierderile sunt mari.