

Lucrarea 6: CARACTERIZAREA MATERIALELOR FEROMAGNETICE LA SEMNAL MIC

Scopul lucrării:

Această lucrare evidențiază comportarea în frecvență a miezurilor magnetice din materiale feromagnetice și ferimagnetice, folosite în inductoare și supuse unui regim de „semnal mic”.

Conspectul platformei:

Când plasăm un material fero/ferimagnetic într-un câmp de intensitate H , cele două vor interacționa datorită fenomenelor complexe care apar, luând naștere inducția magnetică B . Relația care caracterizează această interacțiune este cea a permeabilității magnetice (în cazul nostru, complexe):

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

În cazul câmpurilor magnetice alternative aplicate unui material magnetic, se analizează tipic general două regimuri de funcționare:

- regimul în “semnal mic” are amplitudine redusă a câmpului alternativ H aplicat, suprapus sau nu, peste un câmp continuu H
- regimul de “semnal mare” este caracterizat de o valoare a câmpului magnetic care este suficientă pentru ca materialul să descrie un ciclu de histerezis.

Pentru a caracteriza un material feromagnetic la semnal mic ($B_m < 1 \text{ mT}$) se consideră 2 bobine cu aceeași geometrie a bobinajului (preferabil de formă toroidală, pentru a putea neglija câmpul de dispersie) și același număr de spire; prima bobină este construită pe un suport din material nemagnetic, a doua pe un miez magnetic de aceeași dimensiuni cu suportul folosit, din materialul feromagnetic propus a fi studiat.

Ca să caracterizăm matematic bobinele, trebuie să le scriem impedanțele:

- $\underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0$;
- $\underline{Z}_m = r_0 + j\omega L = r_0 + \omega \underbrace{\mu'' L_0 + j\omega \mu' L_0}_{r_m} = r + j\omega \mu' L_0$

Factorul de calitate al materialului feromagnetic Q_m este: $Q_m = \frac{\mu'}{\mu''} = \frac{\mu' Q_0 Q_b}{\mu' Q_0 - Q_b}$ unde Q_0 și Q_b sunt factorii

de calitate ai bobinelor fără miez, respectiv cu miez: $Q_0 = \frac{\omega L_0}{r_0}$; $Q_b = \frac{\omega L}{r_0 + r_m}$

Caracterizarea materialelor ferimagnetice la semnal mic

Materialele ferimagnetice sau feritele sunt materiale antiferomagnetice necompensate, ale căror proprietăți se datorează interacțiunilor dintre ionii metalici ce aparțin unor subrețele magnetice diferite, create de ionii de oxigen.

Pentru studierea materialelor ferimagnetice se vor măsura miezuri de formă toroidală, de tip „oală” și „bară” din ferită.

Pentru orice formă a unui miez magnetic este necesar să fie găsite mărimile „efective”, adică acele dimensiuni l_e , A_e și permeabilitate μ_e (μ'_{ef}) ale unui tor ipotetic (tor de substituție) cu aceleași proprietăți magnetice. Echivalența poate fi stabilită dacă se consideră tronsoane ale miezului omogene din punct de vedere al inducției magnetice; aceste tronsoane sunt caracterizate de parametrii lungime l_i și arie transversală A_i și permit definirea constantelor miezului C_1 și C_2 :

$$C_1 = \frac{l_e}{A_e} = \sum_i \frac{l_i}{A_i} \quad C_2 = \frac{l_e^2}{A_e^2} = \sum_i \frac{l_i^2}{A_i^2}$$

Se pot defini apoi mărimile echivalente l_e , A_e , și μ_e (μ'_{ef}), conform relațiilor:

$$l_e = \frac{C_1^2}{C_2}; \quad A_e = \frac{C_1}{C_2}; \quad \mu'_e = \frac{C_1}{\sum_i \frac{l_i}{\mu'_i A_i}};$$

unde μ'_i , l_i și A_i sunt parametrii permeabilitate magnetică, lungime și arie transversală a porțiunii omogene „i” a miezului considerat.

Inductanța înfășurării cu N spire pe miezul dat se poate estima pe baza parametrilor torului de substituție:

$$L_0 = \mu_0 \mu'_e \frac{N^2 A_e}{l_e} = \mu_0 \mu'_e \frac{N^2}{C_1} = A_L N^2 \cdot 10^{-9} [H] \quad \text{unde } A_L = \frac{\mu_0 \mu'_e}{C_1} \cdot 10^{+9} \left[\frac{nH}{sp^2} \right] \text{ este factorul de}$$

inductanță al miezului considerat.

Dacă circuitul magnetic toroidal sau cel al oalei de ferită nu au întrefier atunci $\underline{\mu'_e} = \underline{\mu}$ unde $\underline{\mu'_e}$ este permeabilitatea relativă complexă a torului de substituție, iar $\underline{\mu}$ cea a

materialului. În cazul existenței unui întrefier cu lățime $\delta \ll l_e$ atunci între părțile reale ale

permeabilităților μ'_e și μ' se poate scrie relația: $\mu'_e \approx \frac{C_1}{\frac{\delta}{A_\delta} + \frac{C_1}{\mu'}}$

unde A_δ este secțiunea întrefierului.

Desfășurarea lucrării:

Dependența de frecvență a permeabilității magnetice relative complexe a materialelor feromagnetice:

Pentru a caracteriza un material feromagnetic (Fe-Si), la semn mic ($B \sim 1$ mT) se utilizează 3 bobine cu aceeași geometrie a bobinajului și același număr de spire ($N=300$ spire).

-prima bobină este notată L_m și are miez magnetic format din tole Fe-Si, E+I, introduse întrețesut pentru a realiza un circuit magnetic închis.

-a doua bobină, notată cu L_{md} , diferă de prima numai prin modul în care au fost introduse tolele: astfel pe o parte a bobinei sunt introduse toate tolele E iar pe cealaltă se montează toate tolele I pentru a închide circuitul magnetic. Între tolele E și I se introduce un "întrefier" (adică un material nemagnetic, în cazul de față un strat de hârtie)

-a treia bobină, notată L_{m0} , este identică cu celelalte, dar nu are miez magnetic.

Se conectează, pe rând, bobina L_m , respectiv L_{md} și L_{m0} la bornele punții de măsură RLC, iar apoi modificăm frecvența de măsură conform valorilor din Tabelul 6-1. Datele obținute cu ajutorul formulelor, se completează, de asemenea, în Tabelul 6-1.

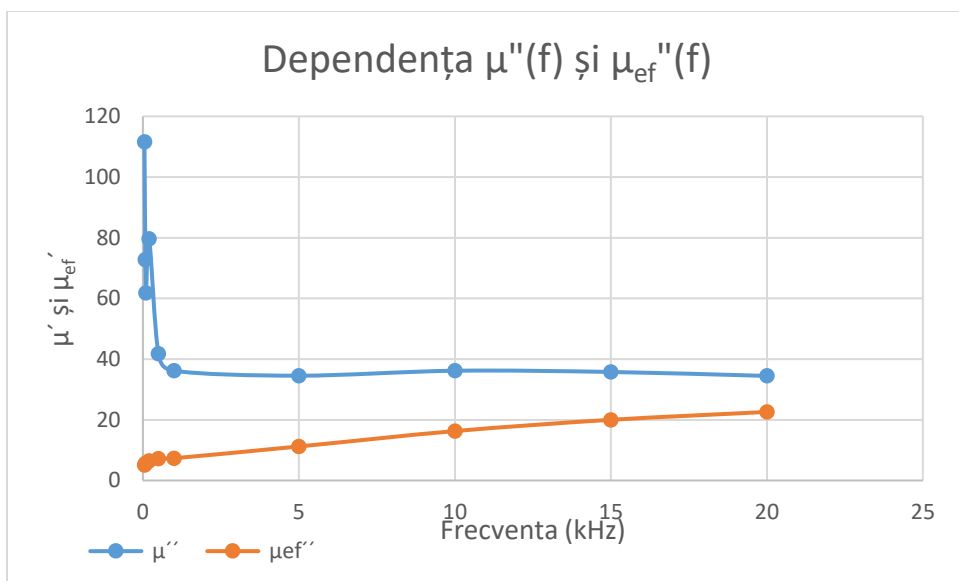
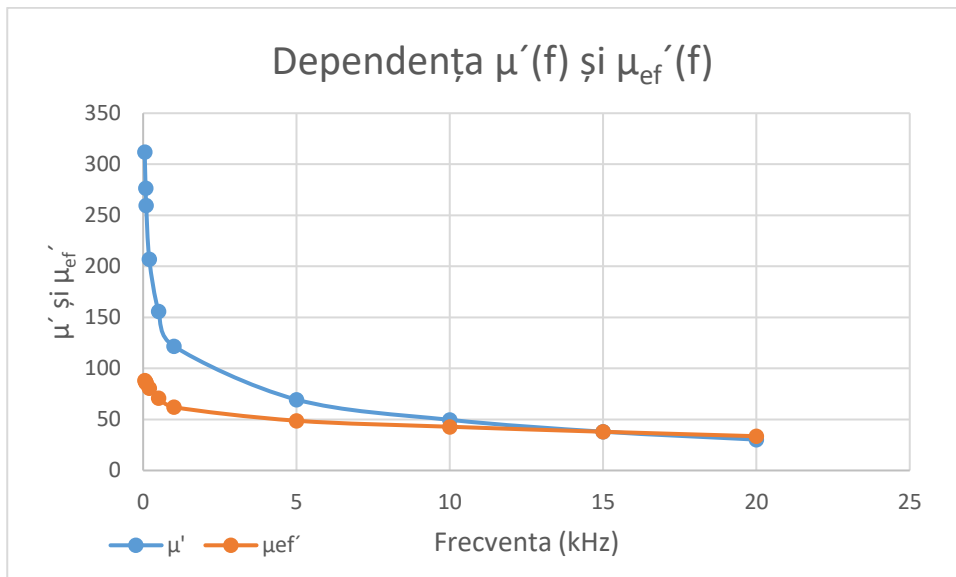
Tabelul 6.1

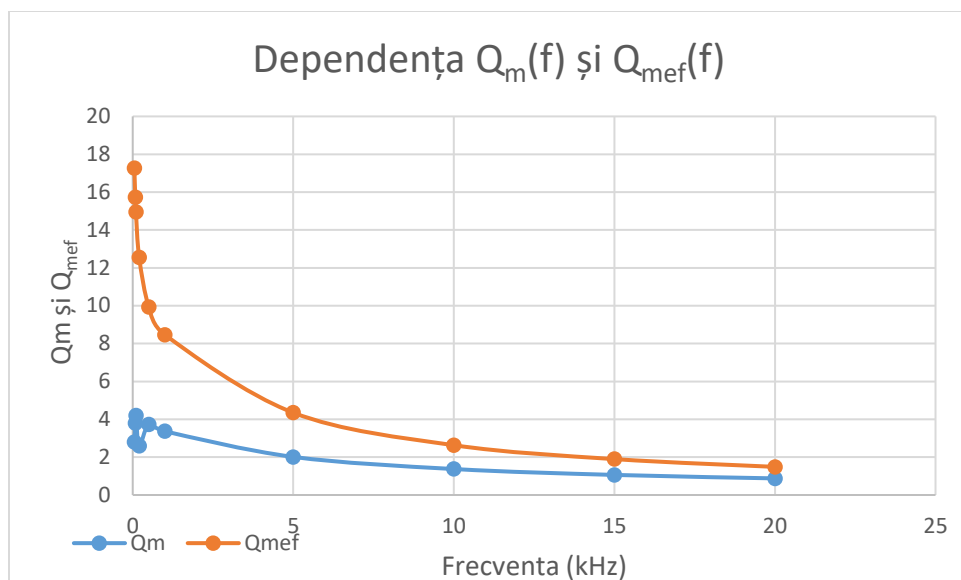
f(kHz)		0.05	0.08	0.1	0.2	0.5	1	5	10	15	20
L_m	$L_m(\text{mH})$	599.21	531	498.5	397.7	300.34	234.6	133.71	95.34	72.83	57.82
	$R_m(\Omega)$	68.9	71.8	76.1	193.73	254.4	439.2	2090	4370	6470	8290
L_{md}	$L_{md}(\text{mH})$	169.38	166.32	164.38	154.78	136.87	119.51	93.83	82.34	72.74	64.23
	$R_{md}(\Omega)$	4.69	6.91	8.5	17.08	44.86	90.27	679.9	1970	3620	5440
L_{m0}	$L_{m0}(\text{mH})$	1.92	1.92	1.92	1.92	1.926	1.926	1.925	1.922	1.918	1.913
	$R_{m0}(\Omega)$	1.61	1.6	1.6	1.6	1.6	1.62	2.18	3.88	6.63	10.31
Calcul	μ'	312.089	276.563	259.635	207.125	155.939	121.807	69.459	49.605	37.972	30.225
	μ''	111.614	72.776	61.787	79.672	41.801	36.178	34.541	36.173	35.773	34.459
	Q_m	2.796	3.8	4.202	2.599	3.731	3.367	2.011	1.371	1.061	0.877
	μ'_{ef}	88.219	86.625	85.615	80.615	71.064	62.051	48.743	42.841	37.925	33.576
	μ''_{ef}	5.109	5.505	5.723	6.419	7.153	7.329	11.212	16.289	19.999	22.598
	Q_{mef}	17.267	15.736	14.959	12.559	9.935	8.467	4.347	2.630	1.896	1.486

-formule necesare completării tabelului:

$$\mu' = L_m / L_{m0} \quad \mu'' = (r - r_0) / w L_0 \quad Q_m = \mu' / \mu'' \quad Q_{mef} = \mu_{ef}' / \mu_{ef}''$$

Se reprezintă grafic dependențele $\mu'(f)$, $\mu''(f)$ și $Q_m(f)$, respectiv $\mu_{ef}'(f)$, $\mu_{ef}''(f)$ și $Q_{mef}(f)$, de unde putem sublinia diferențele de valori, mai ales pentru factorul de calitate la frecvențe uzuale (50 Hz, 100 Hz) și la frecvențele mari (10 kHz, 20 kHz).





Dependența de frecvență a permeabilității relative complexe a feritelor

-determinăm valorile inductanței și rezistenței echivalente a unei bobine cu miez L_{m1} și a unei bobine fără miez L_{01} , identică cu prima, la diferite frecvențe;

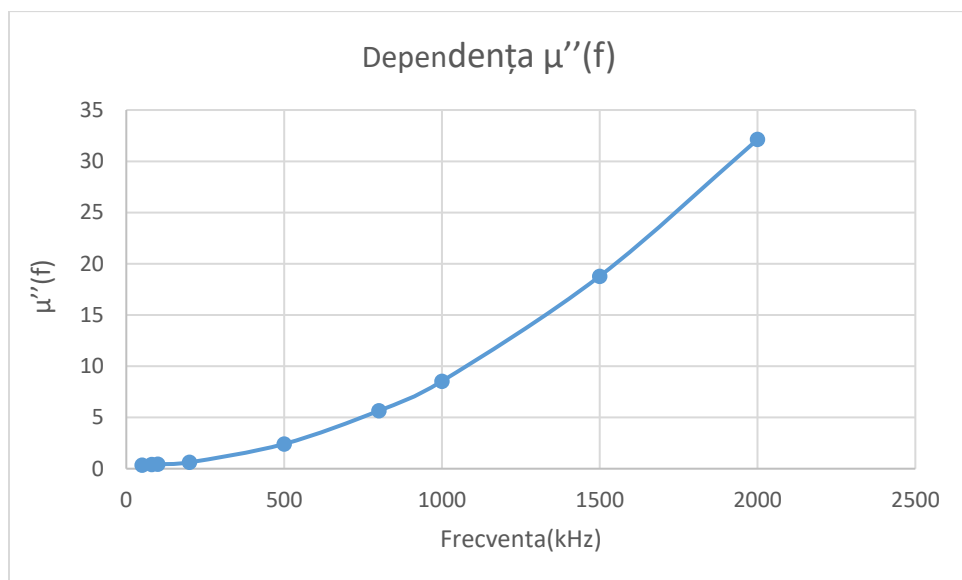
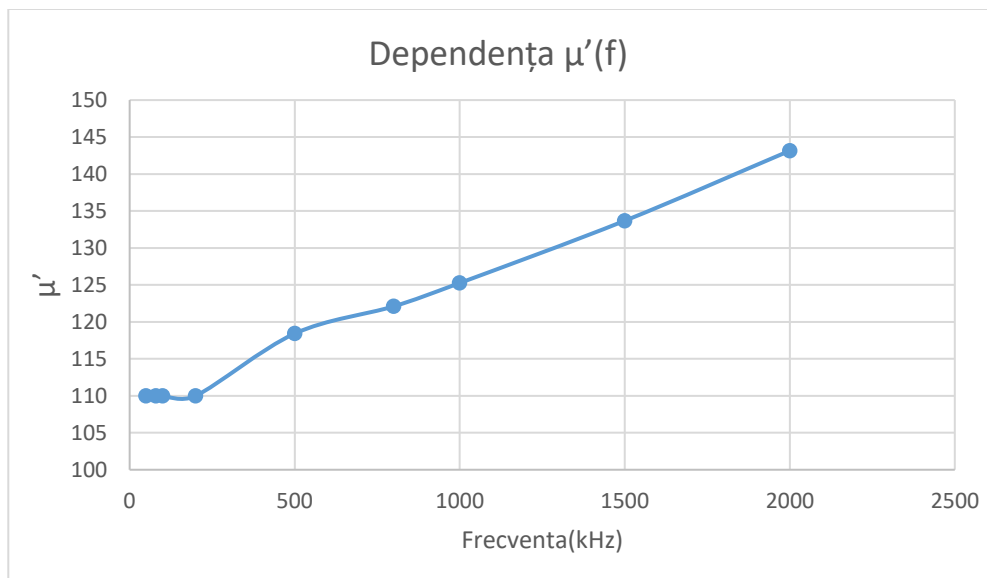
Bobina L_{m1} este construită pe un circuit magnetic închis: se utilizează în acest scop o oală de ferită de dimensiune 18×11 pe mosorul căreia au fost bobinate $N = 12$ spire (bobina L_{m1}); bobina L_{01} este o bobină identică cu cea din interiorul oalei de ferită, cu același număr de spire, dar fără miez .

Tabelul 6.3

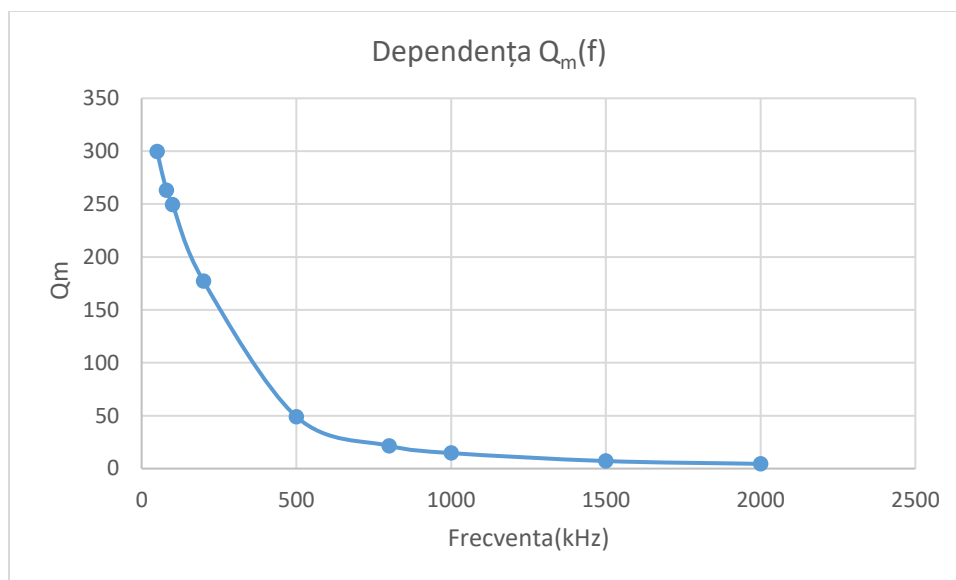
f(kHz)		50	80	100	200	500	800	1000	1500	2000
Bobina L_{m1}	$L_{m1}(mH)$	0.22	0.22	0.22	0.22	0.225	0.232	0.238	0.254	0.272
	$R_{m1}(\Omega)$	0.32	0.52	0.66	1.7	14.62	54.27	102.22	331.15	769.58
Bobina L_{01}	$L_{01}(mH)$	0.002	0.002	0.002	0.002	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019
	$R_{01}(\Omega)$	0.089	0.099	0.106	0.140	0.218	0.277	0.316	0.405	0.497
Calcul	k	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	μ'	110	110	110	110	118.42	122.1	125.26	133.68	143.15
	μ''	0.367	0.418	0.441	0.621	2.414	5.656	8.54	18.79	32.126
	Q	299.72	263.15	249.43	177.13	49.05	21.58	14.667	7.114	4.455

-formule folosite pentru completarea tabelului:

$$k(\omega) = 1 - \omega^2 L_{m1} C_p, \quad \mu' = \frac{L_{m1}}{k L_{01}}, \quad \mu'' = \frac{R_{m1} - R_{01}}{\omega L_{01}}, \quad Q_m = \mu' / \mu''$$



-se observă că atât în cazul μ' , cât și pentru μ'' , acestea cresc odată cu mărirea frecvenței.



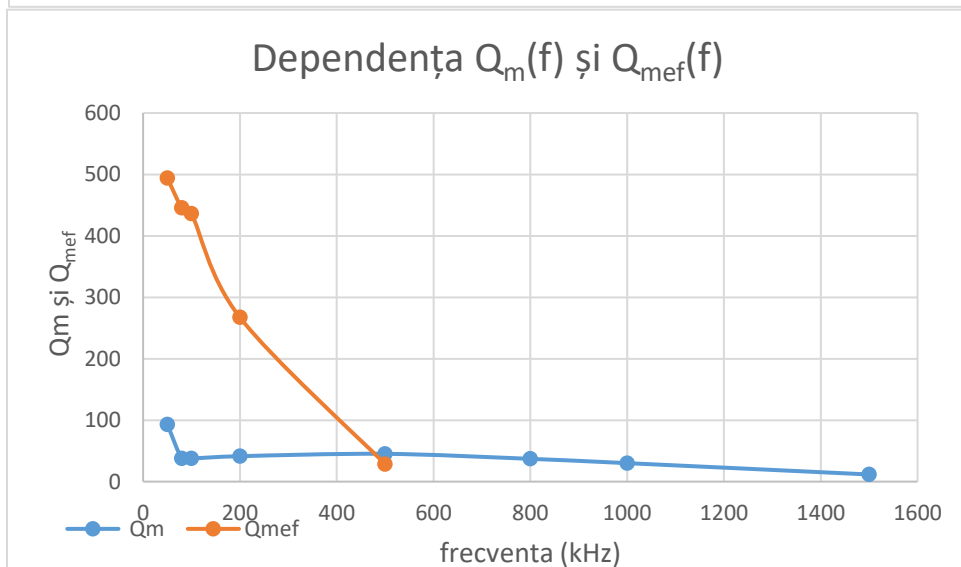
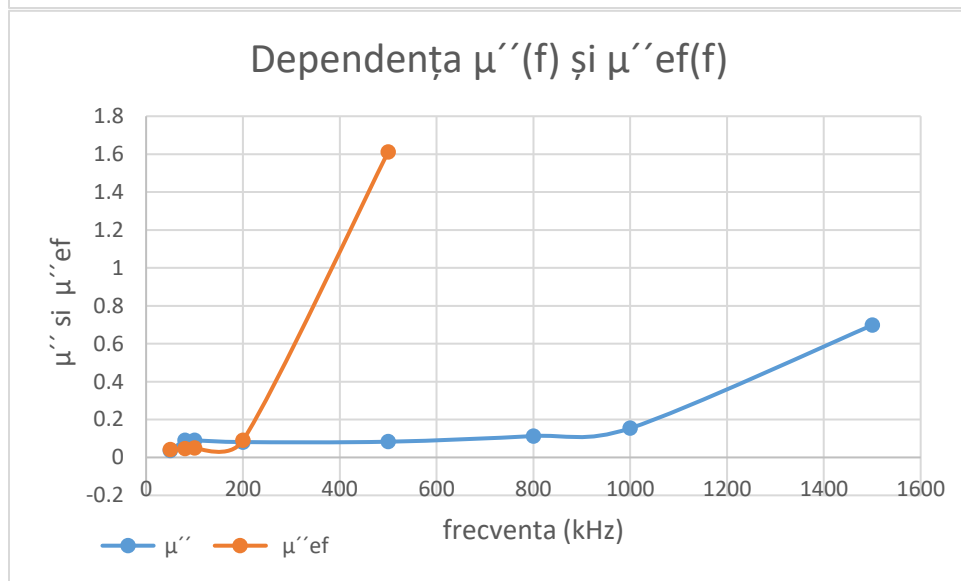
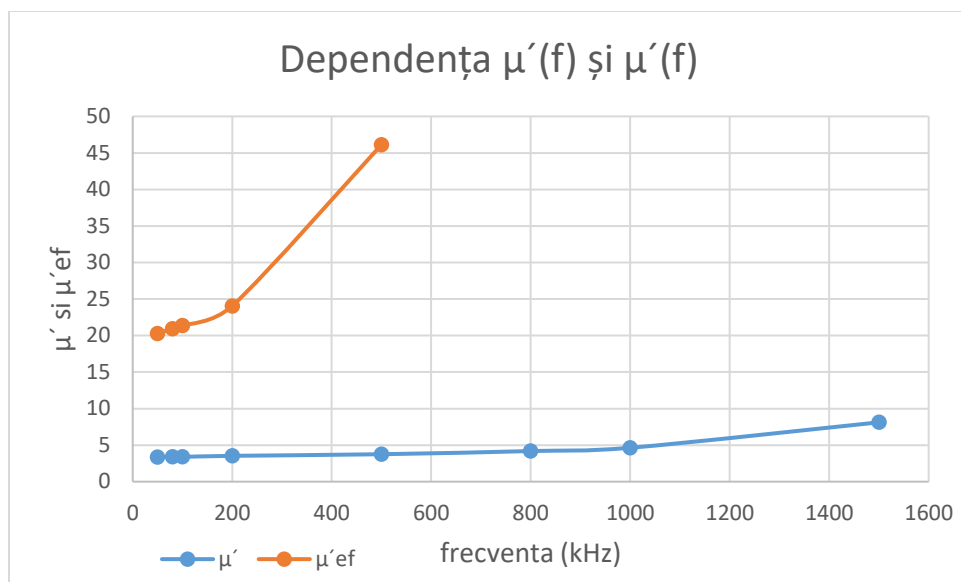
-cu cât frecvența crește, cu atât factorul de calitate Q_m scade (majoritar).

Măsurarea permeabilității relative eficace

-se determină inductanța și rezistența echivalentă de pierderi pentru o bobină cu miez tip bară, pentru aceeași bobină cu miez de tip cadru și pentru aceeași bobină, identică din punct de vedere constructiv (același număr de spire), dar fără miez. Se utilizează o bobină cu $N = 100$ spire, având ca miez o bară de ferită Mn-Zn. Bobina cu miez de tip bară se notează cu L_{03} , cea cu miez de tip cadru se notează cu L_{04} , iar aceeași bobină, considerată fără miez, se notează cu L_{02} .

Tabel 6-4:

f(kHz)		50	80	100	200	500	800	1000	1500	2000
Bobina L_{03}	$L_{03}(\text{mH})$	0.255	0.251	0.248	0.244	0.254	0.285	0.32	0.609	-2.147
	$R_{03}(\Omega)$	3.64	6.56	8.26	14.38	30.18	56.14	87.88	501.05	10000.9
Bobina L_{04}	$L_{04}(\text{mH})$	1.54	1.55	1.56	1.66	3.09	-5.22	-1.52	-0.441	-0.223
	$R_{04}(\Omega)$	2.761	4.944	6.401	15.332	355.88	3000.67	557.03	137.63	77.62
Bobina L_{02}	$L_{02}(\text{mH})$	0.076	0.074	0.073	0.069	0.067	0.068	0.069	0.075	0.086
	$R_{02}(\Omega)$	1.77	3.19	4.13	7.44	12.68	17.52	21.08	32.88	53.92
Calcul	k	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	μ'	3.355	3.391	3.392	3.536	3.756	4.191	4.637	8.121	
	μ''	0.036	0.09	0.09	0.081	0.083	0.113	0.154	0.698	
	Q_m	93.194	37.67	37.68	41.43	45.25	37.08	30.11	11.634	
	μ'_{ef}	20.263	20.945	21.369	24.057	46.119				
	μ''_{ef}	0.041	0.047	0.049	0.090	1.612				
	$Q_m ef$	494.21	445.63	436.102	267.3	28.609				



IV)Calculul parametrilor torului de substituție pentru miezul de tip oală 18x11, reprezentat în Fig. 6-3. cu dimensiunile :

$2r_1 = 32 \text{ mm}$; $2r_2 = 58 \text{ mm}$; $2r_3 = 15,4 \text{ mm}$; $2r_4 = 18 \text{ mm}$; $l_1 = l_3 = 7,7 \text{ mm}$; $h = 13 \text{ mm}$

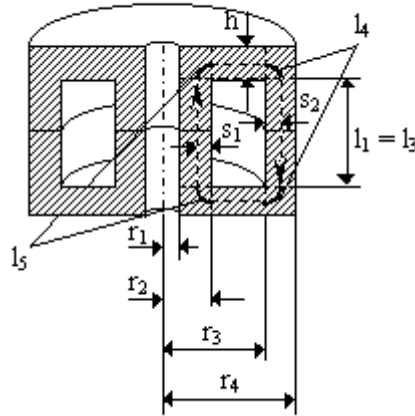


Fig. 6-3. Secțiunea transversală a unui miez tip "oală".

Ca exemplificare, parametrii torului de substituție pentru un miez de tip "oală" fără întrefier, având dimensiunile din Fig. 6-3 se vor calcula aplicând relațiile (6.6) și (6.7) astfel:

$$A_1 = \pi(r_4^2 - r_3^2); \quad A_3 = \pi(r_2^2 - r_1^2); \quad \frac{l_2}{A_2} = \frac{1}{\pi h} \ln \frac{r_3}{r_2}; \quad \frac{l_2}{A_2^2} = \frac{1}{2\pi^2 h^2} \frac{r_3 - r_2}{r_2 r_3};$$

$$s_2 = \sqrt{\frac{r_3^2 + r_4^2}{2}} - r_3; \quad A_4 = \frac{\pi}{2}(r_4^2 - r_3^2 + 2r_3 h); \quad l_4 = \frac{\pi}{4}(2s_2 + h);$$

$$s_1 = r_2 - \sqrt{\frac{r_2^2 + r_1^2}{2}}; \quad A_5 = \frac{\pi}{2}(r_2^2 - r_1^2 + 2r_2 h); \quad l_5 = \frac{\pi}{4}(2s_1 + h)$$

$$2r_1 = 32 \text{ mm} \Rightarrow r_1 = 32/2 = 16 \text{ mm}$$

$$2r_2 = 58 \text{ mm} \Rightarrow r_2 = 58/2 = 29 \text{ mm}$$

$$2r_3 = 15.4 \text{ mm} \Rightarrow r_3 = 15.4/2 = 7.7 \text{ mm}$$

$$2r_4 = 13 \text{ mm} \Rightarrow r_4 = 13/2 = 6.5 \text{ mm}$$

$$l_1 = l_3 = 7.7 \text{ mm} \quad h_3 = 13 \text{ mm}$$

$$A_1 = \pi(r_1^2 - r_3^2) = \pi(r_1 - r_3)(r_1 + r_3) = \pi \cdot 13 \cdot 16.7 = \pi \cdot 217.1 = 684.203$$

$$A_3 = \pi(r_2^2 - r_4^2) = \pi(r_2 - r_4)(r_2 + r_4) = \pi \cdot 15.45 = \pi \cdot 585 = 1834.137$$

$$\frac{l_2}{A_2} = \frac{1}{2\pi h^2} \cdot \frac{r_3 - r_2}{r_2 r_3} = \frac{-2.3}{744312.34} = -0.2853 \cdot 10^{-4}$$

$$\Rightarrow \textcircled{A} \quad l_1 = -0.2853 \cdot 10^{-4} \cdot A_2^2$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{r_3^2 + r_4^2}{2}} \quad r_3 = \sqrt{79.45} \quad -7.7 = 3.545 - 7.7$$

$$r_2 = 9.645 \text{ mm}$$

$$\frac{l_2}{A_2} = \frac{1}{2\pi h^2} \cdot l_1 \cdot \frac{r_3}{r_2} = 90244 \cdot (-1.326) = -0.0323$$

$$\textcircled{B} \quad l_2 = -0.0323 A_2$$

$$7.7 \cdot \pi \Rightarrow -0.0323 A_2 = -0.2853 \cdot 10^{-4} \cdot A_2^2 \Rightarrow A_2 = \frac{0.0323}{0.2853} \cdot 10^4$$

$$A_2 = 1129.765$$

$$l_2 = -0.0323 \cdot 1129.765 = -36.491 \text{ mm}$$

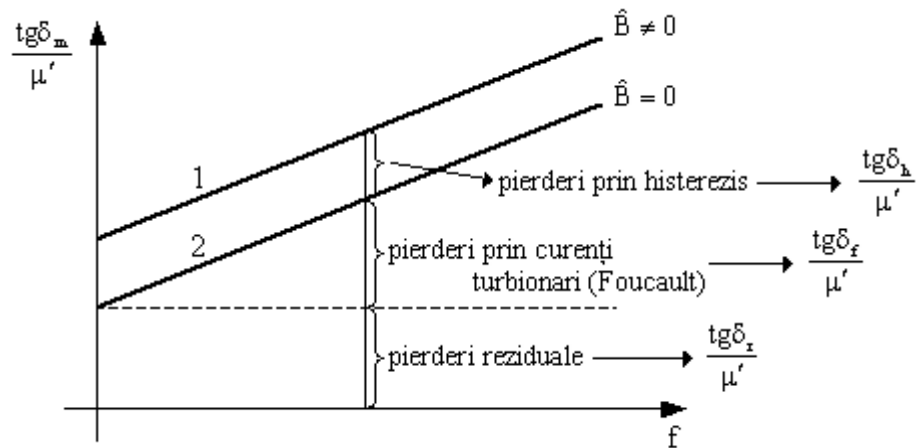
$$\begin{aligned}
 A_7 &= \frac{\pi}{2} (r_1^2 - r_2^2 + 2r_2 L) = \frac{\pi}{2} (9^2 - 7^2 + 2 \cdot 13 \cdot 6,7) = 341,576 \\
 l_4 &= \frac{\pi}{4} (2r_2 + L) \Rightarrow l_4 = 11,27 \text{ mm} \\
 r_1 &= r_2 - \sqrt{\frac{r_2^2 + r_1^2}{2}} \Rightarrow r_1 = 5,579 \text{ mm} \\
 A_5 &= \frac{\pi}{2} (r_2^2 - r_1^2 + 2r_2 L) \Rightarrow A_5 = \frac{\pi}{2} (341 - 256 + 754) \\
 A_5 &= \frac{\pi}{2} \cdot 133 = 2103,29 \\
 l_5 &= \frac{\pi}{4} (2r_1 + L) \Rightarrow l_5 = \frac{\pi}{4} (2 \cdot 5,579 + 13) = 18,973 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Concluzie:

Prin aceasta lucrare am analizat comportamentul bobinelor fără miez magnetic, cu miez magnetic și cu miez magnetic cu întrefier în regimul de semnal mic. Acest lucru s-a realizat cu succes prin analizarea caracteristicilor componentelor permeabilității complexe relative magnetice în funcție de frecvență, alături de impactul variațiilor lor asupra factorului de calitate, reprezentat și el în funcție de frecvență.

Întrebări și probleme:

1. Presupunând inducția \hat{B} foarte mică (neglijând, deci, pierderile prin histerezis) determinați pierderile reziduale ale miezului de tip oală de ferită trasând dreapta "2" din Fig. 6-4 pentru două valori ale frecvenței din Tabelul 6-3 și determinând valoarea coeficientului de pierderi (constanta "c" relația (6.12)) la intersecția dreptei cu ordonata. Să se calculeze și valoarea constantei de pierderi prin curenți turbionari sau Foucault (constanta "e" din relația (6.12)) ca fiind panta dreptei trasate.



① Folosim formula $\frac{tg \delta_{max}}{\mu' \omega} = \frac{1}{2\pi} (a B_0 + d f + c)$

În cazul nostru B tinde către 0.

$\Rightarrow \frac{tg \delta_{max}}{\mu' \omega} = \frac{1}{2\pi} (d f + c)$

$tg \delta = \frac{1}{2} = \frac{R}{\omega L}$

$tg \delta (80 Hz) = 0,004$

$tg \delta (500 Hz) = 0,02$

$\Rightarrow L = 2,5 \cdot 10^{-6}$

$C = -1,63 \cdot 10^{-5}$

2. Măsurând, cu ajutorul punții RLC, două bobine cu miez aparent identic și care au același număr de spire, cum puteți identifica bobina care are miezul magnetic cu întrefier?

Putem identifica primele diferențe în ceea ce privește valoarea permeabilității. În cazul unei bobine cu întrefier cu lățimea $\delta \ll l_e$, este valabilă relația: $\mu'_e \approx \frac{C_1}{\frac{\delta}{A_\delta} + \frac{C_1}{\mu'}}$. În cazul unei bobine fără întrefier, avem

$\underline{\mu}'_e = \underline{\mu}$ unde $\underline{\mu}'_e$ este permeabilitatea relativă complexă a torului de substituție, iar $\underline{\mu}$ cea a materialului.

Putem constata diferențe notabile și cu privire la nivelul rezistențelor, fiind prezentă o rezistență mai mare în cazul bobinei fără întrefier.

3.Deduceți relația de calcul pentru capacitatea parazită a bobinei cu miez de tip oală de ferită, dacă aceasta este măsurată cu Q-metrul.

Capacitatea parazită C_0 , este determinată de potențiale diferite între spirele învecinate (determină capacitatea C_{12}) și potențial diferit al spirei față de pământ (determină capacitățile C_{10} și C_{20}).

$$C_p = C_{12} \frac{C_{10} C_{20}}{C_{10} + C_{20}}$$

La bobinele cu mai multe straturi capacitatea parazită este cu atât mai mare cu cât numărul de spire pe strat este mai mare (lungimi mari ale bobinei) și numărul de straturi mai ridicat. Admitanța unei spire este:

$$\underline{Y}_l = \frac{1}{r_{cul} + r_{ml} + j\omega L_l} + j\omega C_p$$

Pentru o bobină cu N spire identice înseriate, rezultă admitanța:

$$\underline{Y} = \frac{1}{N} \underline{Y}_l = \frac{1}{Nr_{cul} + Nr_{ml} + j\omega L_l} + j\omega \frac{C_p}{N}$$

Pentru un circuit echivalent serie al unei bobine avem:

$$\underline{Z} = \frac{(r + j\omega L) \frac{1}{j\omega C_0}}{r + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_0}},$$

Dacă măsurăm/setăm/cunoaștem ceilalți parametri putem extrage capacitatea parazită.

5. De ce bobina cu miez de ferită tip bară L_{mb4} (punctul 6.4.6), de la un anumit nivel al frecvenței de măsură prezintă o inductanță „negativă” ?

Bobina cu miez de ferită tip bară L_{mb4} , de la un anumit nivel al frecvenței de măsură prezintă o inductanță „negativă” pentru că în jurul acelei valori componenta imaginară tinde la 0 și factorul de calitate este foarte mare.

6. Pentru o bobina cu inductanța $L = 100\mu H$ și rezistența serie de pierderi $r = 0,85\Omega$ să se calculeze factorul de calitate și tangenta unghiului de pierderi la frecvențele de 100 Hz și 250kHz; comentați rezultatele.

6. $L = 100\mu H$
 $r = 0,85 \Omega$

Folosim formula: $Q = \frac{\omega L}{r}$ - factorul de calitate

$\frac{\omega}{2\pi}$ - fr. de măsură $\Rightarrow Q = \frac{2\pi f L}{r}$

$Q_1(100Hz) = \frac{2\pi \cdot 100 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{0,85} = 739,2 \cdot 10^{-4} = 0,074$

$Q_2(250kHz) = \frac{2\pi \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{0,85} = 1847,647$

$tg \delta(100Hz) = \frac{1}{Q_1} = 13,51$

$tg \delta(250kHz) = \frac{1}{Q_2} = 0,000541$

Astea valori corespund unei bobine cu distribuție, deoarece factorul de calitate crește odată cu frec. și pierderile sunt reduse.

7. Pentru o bobină cu valoarea nominală de $L = 125mH$, frecvența proprie de rezonanță de 135kHz și rezistența serie de pierderi $R = 27\Omega$, să se calculeze capacitatea parazită a bobinei și factorul de calitate al acesteia la frecvența de lucru de 23 kHz .

$$\textcircled{1} \text{ bobina } \begin{cases} L = 125 \text{ mH} \\ R = 24 \Omega \end{cases}$$

$$f_{\text{preres}} = 155 \text{ kHz}$$

$$f_{\text{preres}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C_p}} \Rightarrow f_{\text{preres}} \cdot 2\pi \sqrt{L \cdot C_p} = 1$$

$$f_{\text{preres}}^2 \cdot 4\pi^2 \cdot L \cdot C_p = 1 \Rightarrow C_p = \frac{1}{f_{\text{preres}}^2 \cdot 4\pi^2 \cdot L}$$

$$C_p = \frac{1}{(155 \cdot 10^3)^2 \cdot 4\pi^2 \cdot 125 \cdot 10^{-3}} \approx 1,13 \cdot 10^{-11} \text{ F}$$

$$Q = \frac{\omega L}{R} - \text{factorul de calitate}$$

$$\frac{\omega}{2\pi} - \text{frec. de m\u00e2sur\u0103}$$

$$\Rightarrow \omega = 2\pi \cdot f_{\text{m\u00e2sur\u0103}} \Rightarrow \omega = 2\pi \cdot 23 \cdot 10^3 \approx 144,44 \cdot 10^3$$

$$Q = \frac{144,44 \cdot 10^3 \cdot 125 \cdot 10^{-3}}{24} \approx 661,708$$