

## 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”.

### NOTIUNI TEORETICE

Un material fero sau ferimagnetic, plasat într-un câmp magnetic de intensitate  $H$ , va interacționa cu acesta, în materialul respectiv manifestându-se inducția magnetică  $B$ ; datorită fenomenelor complexe care apar (pierderi prin curenți Foucault, pierderi prin histerezis, prin magnetizare, sau prin rezonanță magnetică), relația care definește această interacțiune este:

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

unde:  $\mu = \mu' - j\mu''$ , este permeabilitatea magnetică relativă complexă a materialului considerat;

În cazul câmpurilor magnetice alternative aplicate unui material magnetic, 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 este suficientă pentru ca materialul să descrie un ciclu de histerezis.

### CARACTERIZAREA MATERIALELOR FEROMAGNETICE 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. În general, structura materialului are la bază două tipuri de subrețele ce prezintă magnetizare spontană cu momente magnetice neegale, orientate antiparalel.

Față de materialele feromagnetice, feritele au următoarele avantaje principale:

- rezistivitatea electrică este mult mai mare (din punct de vedere electric majoritatea feritelor au un caracter semiconductor cu rezistivitate între  $10 \div 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ ). Acest fapt determină pierderi prin curenți turbionari mult mai mici și deci posibilitatea folosirii la frecvențe mult mai mari;
- caracteristicile magnetice sunt mai stabile la solicitări mecanice (șocuri, vibrații, etc.);

Ca dezavantaje, comparativ cu materialele feromagnetice amintim:

- permeabilitate magnetică relativă mai mică; la ferite cel mult 4000, iar la feromagnetici speciali (permalloy, supermalloy, mumetal, dinamax) se poate depăși 1000000;

- inducția magnetică de saturație mai mică; 0.3T la 0.4T față de 1.2T până la 2.2T;
- temperatură Curie mai scăzută și dependență mai pronunțată a caracteristicilor magnetice de temperatură;
- sunt dure, casante și deci greu de prelucrat mecanic (se pot prelucra doar prin rectificare abrazivă).

#### PIERDERILE IN MIEZUL FERIMAGNETIC

Pierderile în miezul ferimagnetic depind de inducția de vârf aplicată materialului (pierderi prin histerezis) și de frecvență (pierderi prin curenți Foucault). De asemenea, la joasă frecvență și câmp mic se definesc pierderile reziduale, acestea fiind o proprietate de material.

#### APARATURA UTILIZATA

- punte de măsură RLC de precizie E 4980A, Agilent, punctul 8.6 din Capitolul 8 (Materiale pentru Electronică. Îndrumar );
- Q-metru BM 560, Tesla, punctul 8.7 din Capitolul 8 (Materiale pentru Electronică. Îndrumar );
- sursă dublă stabilizată Multistab 235, IPB București
- generator de curent constant și miliampermetru 0 ÷ 400mA , punctul 8.13 din Capitolul 8 (Materiale pentru Electronică. Îndrumar ).

Utilizarea aparatelor pentru executarea măsurătorilor este prezentată în Capitolul 8 (Materiale pentru Electronică. Îndrumar )

#### DESFASURAREA LUCRARI

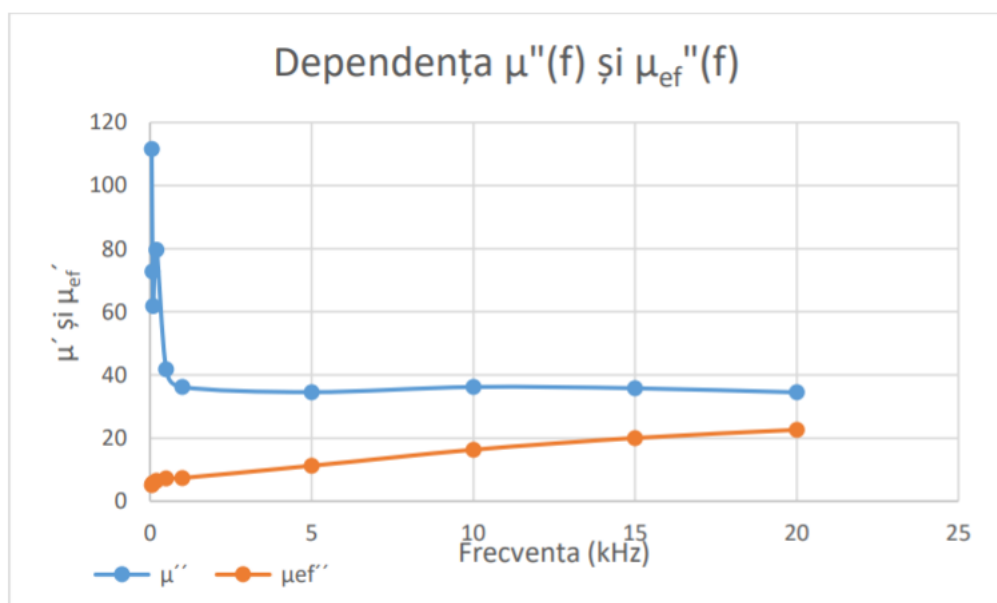
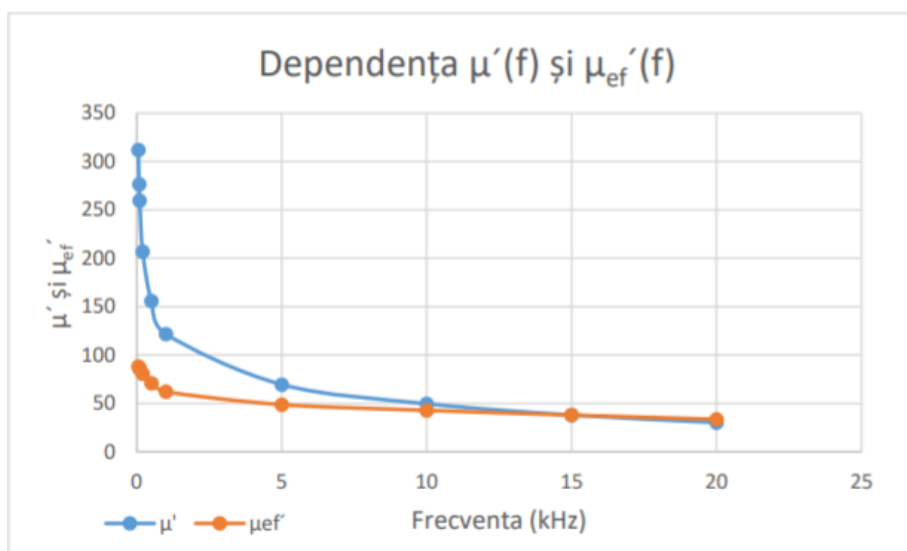
**Tabelul 6.1**

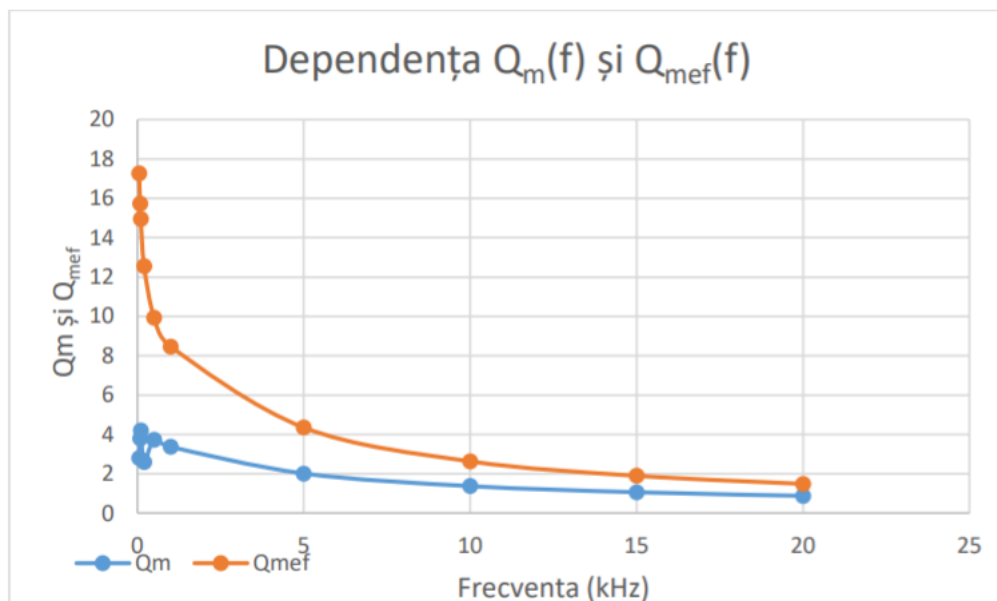
f(kHz)		0.05	0.08	0.1	0.2	0.5	1	5	10	15	20
L <sub>m</sub>	L <sub>m</sub> (mH)	599.21	531	498.5	397.7	300.34	234.6	133.71	95.34	72.83	57.82
	R <sub>m</sub> (Ω)	68.9	71.8	76.1	193.73	254.4	439.2	2090	4370	6470	8290
L <sub>md</sub>	L <sub>md</sub> (mH)	169.38	166.32	164.38	154.78	136.87	119.51	93.83	82.34	72.74	64.23
	R <sub>md</sub> (Ω)	4.69	6.91	8.5	17.08	44.86	90.27	679.9	1970	3620	5440
L <sub>m0</sub>	L <sub>m0</sub> (mH)	1.92	1.92	1.92	1.92	1.926	1.926	1.925	1.922	1.918	1.913
	R <sub>m0</sub> (Ω)	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 <sub>m</sub>	2.796	3.8	4.202	2.599	3.731	3.367	2.011	1.371	1.061	0.877
	μ' <sub>ef</sub>	88.219	86.625	85.615	80.615	71.064	62.051	48.743	42.841	37.925	33.576
	μ'' <sub>ef</sub>	5.109	5.505	5.723	6.419	7.153	7.329	11.212	16.289	19.999	22.598
	Q <sub>mef</sub>	17.267	15.736	14.959	12.559	9.935	8.467	4.347	2.630	1.896	1.486

Pentru completarea tabelului am folosit urmatoarele formule:

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

Pe baza Tabelului 6-1 reprezintă grafic dependențele  $\mu'(f)$ ,  $\mu''(f)$  și  $Q_m(f)$ , respectiv  $\mu'_{ef}(f)$ ,  $\mu''_{ef}(f)$  și  $Q_{mef}(f)$ , unde  $Q_m = \mu' / \mu''$  și  $Q_{mef}(f) = \mu'_{ef} / \mu''_{ef}$  sunt, respectiv, factorul de calitate al miezului magnetic pentru bobina fără întrefier și factorul de calitate echivalent pentru bobina cu întrefier.



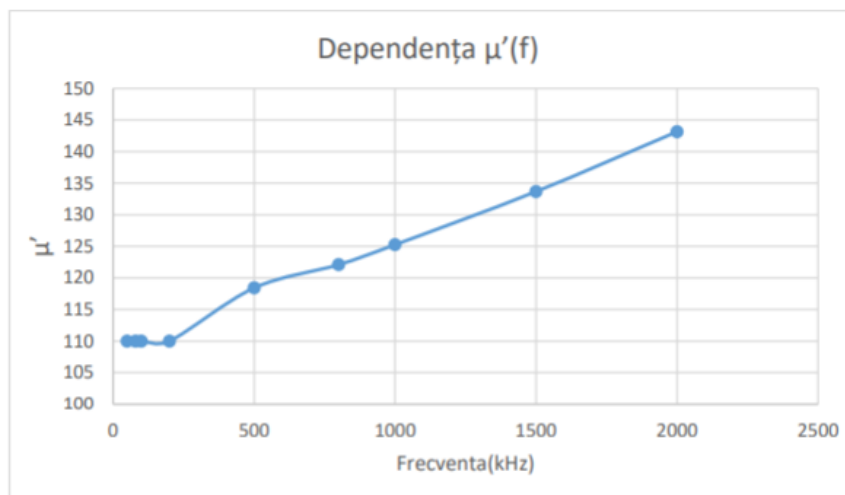


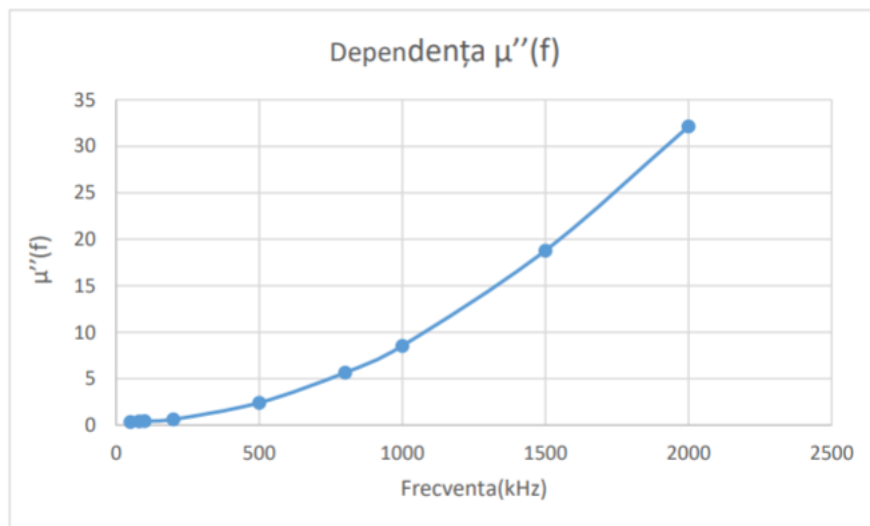
**Tabelul 6.3**

f(kHz)		50	80	100	200	500	800	1000	1500	2000
Bobina $L_{m1}$	$L_{m1}(\text{mH})$	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 $L_{01}$	$L_{01}(\text{mH})$	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
	$\mu'$	110	110	110	110	118.42	122.1	125.26	133.68	143.15
	$\mu''$	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

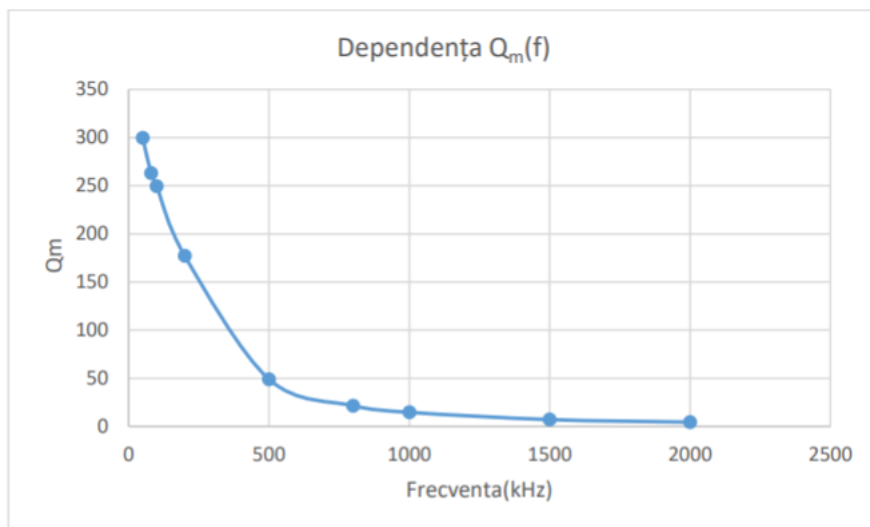
-formule folosite pentru completarea tabelului:

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





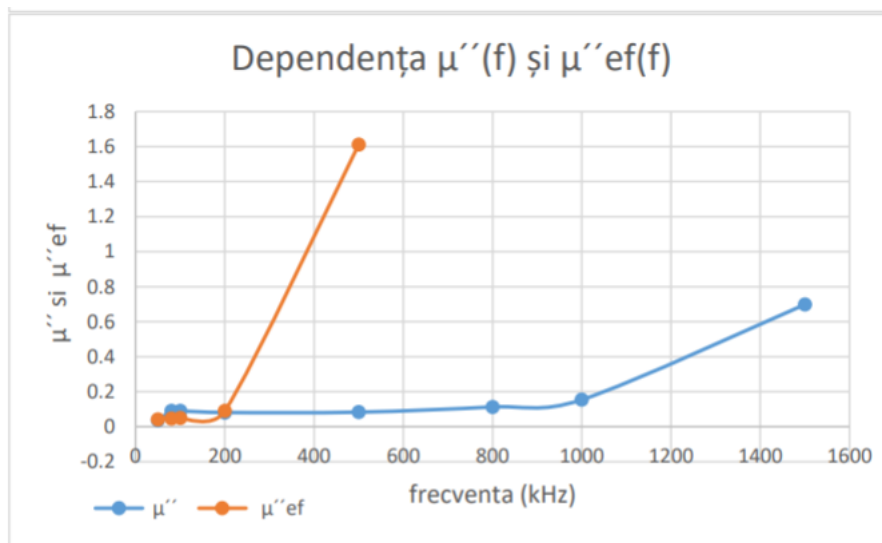
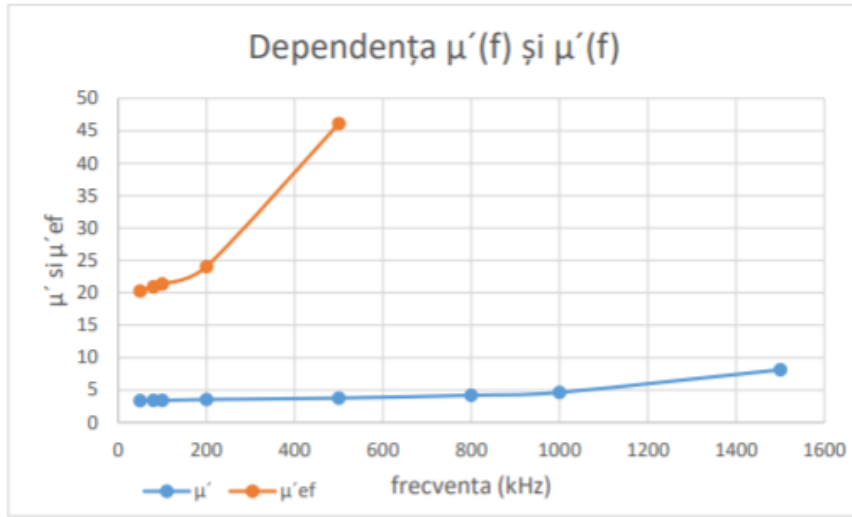
$\mu'$  și  $\mu''$  cresc odată cu mărirea frecvenței

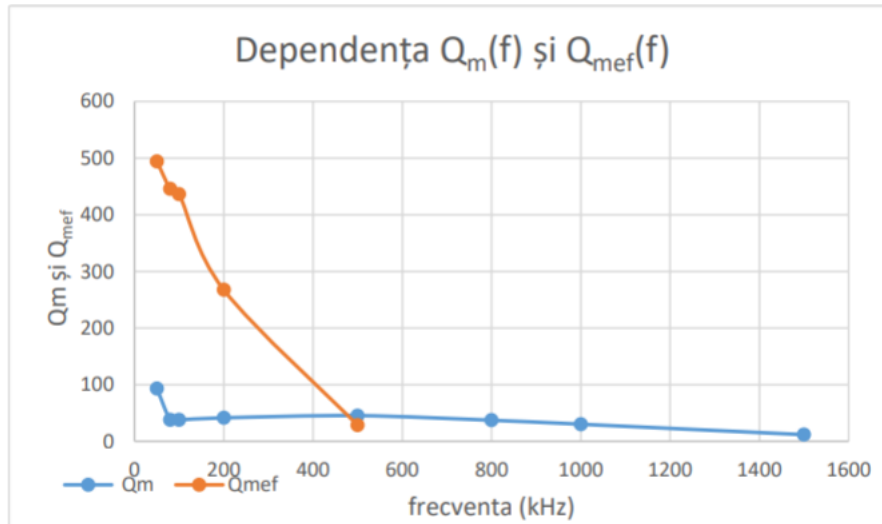


Factorul de calitate  $Q_m$  scade odată cu creșterea frecvenței.

Tabel 6-4:

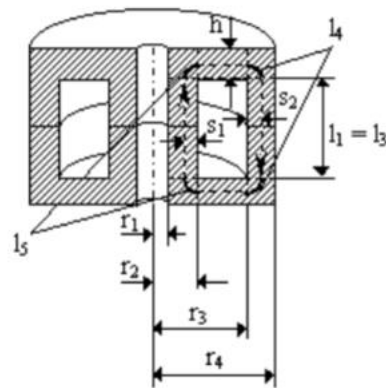
f(kHz)		50	80	100	200	500	800	1000	1500	2000
Bobina L <sub>03</sub>	L <sub>03</sub> (mH)	0.255	0.251	0.248	0.244	0.254	0.285	0.32	0.609	-2.147
	R <sub>03</sub> (Ω)	3.64	6.56	8.26	14.38	30.18	56.14	87.88	501.05	10000.9
Bobina L <sub>04</sub>	L <sub>04</sub> (mH)	1.54	1.55	1.56	1.66	3.09	-5.22	-1.52	-0.441	-0.223
	R <sub>04</sub> (Ω)	2.761	4.944	6.401	15.332	355.88	3000.67	557.03	137.63	77.62
Bobina L <sub>02</sub>	L <sub>02</sub> (mH)	0.076	0.074	0.073	0.069	0.067	0.068	0.069	0.075	0.086
	R <sub>02</sub> (Ω)	1.77	3.19	4.13	7.44	12.68	17.52	21.08	32.88	53.92
Calcule	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 <sub>m</sub>	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 <sub>m</sub> 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:

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

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

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

$$2 \lambda_1 = 32 \text{ mm} \Rightarrow \lambda_1 = 32/2 = 16 \text{ mm}$$

$$2 \lambda_2 = 58 \text{ mm} \Rightarrow \lambda_2 = 58/2 = 29 \text{ mm}$$

$$2 \lambda_3 = 15,4 \text{ mm} \Rightarrow \lambda_3 = 15,4/2 = 7,7 \text{ mm}$$

$$2 \lambda_4 = 18 \text{ mm} \Rightarrow \lambda_4 = 18/2 = 9 \text{ mm}$$

$$\lambda_1 = \lambda_3 = 7,7 \text{ mm}$$

$$A_1 = \pi(\lambda_4^2 - \lambda_3^2) = \pi(\lambda_4 - \lambda_3)(\lambda_4 + \lambda_3) = \pi \cdot 1,3 \cdot 16,7 \\ = \pi \cdot 21,71 = 68,209$$

$$A_3 = \pi(\lambda_2^2 - \lambda_1^2) = \pi(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 + \lambda_1) = \pi \cdot 13 \cdot 45 = \\ = \pi \cdot 585 = 1837,831$$

$$\frac{l_2}{A_2} = \frac{1}{2\pi^2 h^2} \cdot \frac{\lambda_3 - \lambda_1}{\lambda_2 \lambda_3} = \frac{-21,3}{794912,34} = -0,2855 \cdot 10^{-4}$$

$$\Rightarrow l_1 = -0,2855 \cdot 10^{-4} \cdot A_2$$

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{\lambda_3^2 + \lambda_1^2}{2}} - \lambda_3 = 8,325 - 7,7 = 0,625 \text{ mm}$$

$$\frac{l_2}{A_2} = \frac{1}{2\pi^2 h^2} \cdot 4 \cdot \frac{\lambda_3}{\lambda_2} = 0,0244 \cdot (-1,326) = -0,0323$$

$$\bullet l_2 = -0,0323 A_2$$

$$\Rightarrow -0,0323 A_2 = -0,2855 \cdot 10^{-4} A_2$$

$$\Rightarrow A_2 = \frac{0,0323}{0,2855} \cdot 10^4 = 1129,765$$

$$l_2 = -0,0323 \cdot 1129,765 = -36,491 \text{ mm}$$

$$A_4 = \frac{\pi}{2} (\lambda_4^2 - \lambda_3^2 + 2 \lambda_3 h) = \frac{\pi}{2} (9^2 - 7,7^2 + 2 \cdot 13 \cdot 7,7) = 348,576$$



$$r_4 = \frac{\pi}{4} (2r_2 + h) \Rightarrow r_4 = 11,27 \text{ mm}$$

$$r_1 = r_2 - \sqrt{\frac{r_2^2 + r_1^2}{2}} \Rightarrow r_1 = 5,579 \text{ mm}$$

$$A_5 = \frac{\pi}{2} (r_2^2 - r_1^2 + 2r_2 h) = \frac{\pi}{2} (841 - 256 + 754) = \\ = \frac{\pi}{2} \cdot 1339 = 2103,29$$

$$r_5 = \frac{\pi}{4} (2r_1 + h) = \frac{\pi}{4} (2 \cdot 5,579 + 13) = 18,973 \text{ mm}$$

#### Intrebari si probleme:

#### 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:

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{r_{Cu1} + r_{m1} + j\omega L_1} + j\omega C_p$$

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

$$\underline{Y} = \frac{1}{N} \underline{Y}_1 = \frac{1}{Nr_{Cu1} + Nr_{m1} + j\omega L_1} + j\omega \frac{C_p}{N}$$

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.**

$$L = 100 \mu H$$

$$r = 0,85.$$

~~Followind formule~~

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

$$\Rightarrow Q = \frac{2\pi f \cdot L}{r}$$

$$Q_1 (100 Hz) = \frac{2\pi \cdot 100 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{0,85} = 739,2 \cdot 10^{-4} = 0,07$$

$$Q_2 (250 kHz) = \frac{2\pi \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{0,85} = 1847,64$$

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

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

Factorul de calitate crește odată cu frecvența,  
deci pierderile se reduc  $\Rightarrow$  bobina se răzeșește.