

SEMINAR NR. 4

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A CARACTERISTICILOR ELECTROMAGNEȚILOR

9.1. Introducere

Electromagneții sunt dispozitive electromecanice de conversie a energiei având drept elemente constructive de bază o bobină amplasată pe un miez feromagnetic, prevăzut cu armătură mobilă; atunci când spirele bobinei sunt parcurse de un curent de excitație, asupra armăturii mobile se exercită forțe sau cupluri active de atracție, sub acțiunea cărora aceasta poate executa o deplasare limitată.

Elementele constructive ale unui electromagnet pot fi urmărite în figura 9.1, unde s-a notat:

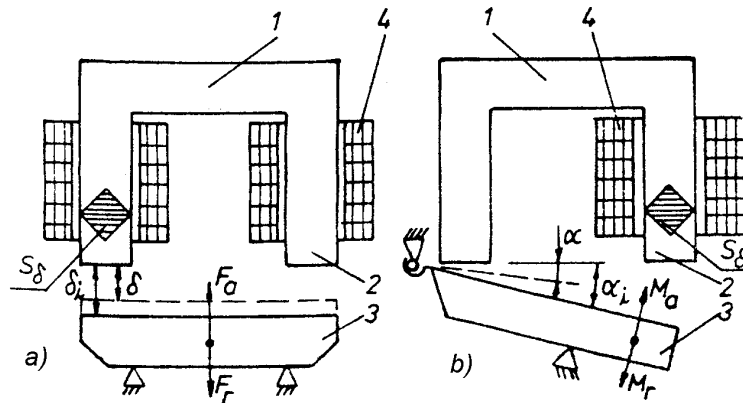


Fig. 9.1:Elementele constructive ale electromagneților:

- a- electromagnet având armătura mobilă cu mișcare de translație,
- b- electromagnet având armătura mobilă cu mișcare de rotație,
- 1- jug feromagnetic, 2- piese polare, 3- armătură mobilă, 4- bobină,
- δ - întrefier de lucru liniar, α - întrefier de lucru unghiular, $k\delta_i$, α_i - valorile inițiale, maxime ale întrefierurilor δ , α , S- suprafață polară, F_a , F_r - forțe, activă respectiv rezistentă, M_a , M_r - cupluri, activ respectiv rezistent.

Elementele constructive din figura 9.1. se regăsesc la toate tipurile de electromagneți; acestora li se adaugă un grup de repere auxiliare, având rol mecanic și care servesc pentru deplasarea predeterminată a armăturii mobile, pentru ghidarea cu frecări minime a acesteia, pentru fixarea electromagnetului etc.

9.2. Forța activă dezvoltată de electromagneții de curent continuu

Cu o bună aproximație, se poate considera că forța activă dezvoltată de un electromagnet este rezultatul variației energiei magnetice înmagazinate în întrefierul de lucru.

Energia magnetică W_m [J], înmagazinată în volumul V_δ [m³] corespunzător unui întrefier de lucru de lungime δ [m] și suprafață S_δ [m²], figura 3.1a, este dată de relația:

$$W_m = \frac{1}{2} B_\delta \cdot H_\delta \cdot V_\delta = \frac{V_\delta}{2\mu_0} B_\delta^2 \quad (9.1)$$

B_δ [T], H_δ [A/m] fiind inducția, respectiv intensitatea câmpului magnetic în întrefierul considerat, iar $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] este permeabilitatea magnetică în vid.

Având în vedere relațiile:

$$V_\delta = \delta \cdot S_\delta, \quad \Phi_\delta = B_\delta \cdot S_\delta \quad (9.2)$$

expresia (9.1) a energiei magnetice devine de forma:

$$W_m = \frac{\delta \cdot \Phi_\delta^2}{2\mu_0 S_\delta} \quad (9.3)$$

Pentru forța activă F_δ [N], raportată la un întrefier de lucru al electromagnetului și orientată după direcția δ , rezultată expresia:

$$F_\delta = -\frac{\partial}{\partial \delta} \left[\frac{\delta \cdot \Phi_\delta^2}{2\mu_0 S_\delta} \right], \quad \Phi_\delta = \text{const} = -\frac{\Phi_\delta^2}{2\mu_0 S_\delta} \quad (9.4)$$

unde: Φ_δ [Wb] este fluxul magnetic util care străbate întrefierul de lucru, S_δ [m²] suprafața polară; semnul (-) indică faptul că forța activă crește pe măsura scăderii valorii întrefierului de lucru.

Fluxul magnetic util, Φ_d , care străbate întrefierurile de lucru, reprezintă numai o parte a fluxului magnetic total, Φ_t , produs de bobina electromagnetului; restul, închizându-se pe trasee care nu conțin întrefierurile de lucru, constituie fluxul magnetic de dispersie, Φ_d . Factorul de dispersie al electromagnetului, σ_d , se definește prin relațiile:

$$\sigma_d = \frac{\Phi_t}{\Phi_\delta} = \frac{\Phi_d + \Phi_\delta}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{\Phi_d}{\Phi_\delta} > 1 \quad (9.5)$$

Valorile factorului de dispersie cresc odată cu creșterea întrefierului de lucru.

Ținând seama de (9.2), (9.5) și de relațiile:

$$\delta \cdot H_\delta = U_{m\delta}, \quad \Lambda_\delta = \frac{\mu_0 \cdot S_\delta}{\delta}, \quad \Phi_\delta = U_{m\delta} \cdot \Lambda_\delta \quad (9.6)$$

unde $U_{m\delta}$ [A] este căderea de tensiune magnetică pe un întrefier de lucru și Λ_δ [H] este permeanța acestuia, pentru forța activă F_δ [N], dată de relația (9.4), se mai obțin expresiile:

$$F_\delta = \frac{\Phi_\delta^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S_\delta} = \frac{\Phi_t^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot \sigma_d^2 \cdot S_\delta} = \frac{\mu_0 \cdot U_{m\delta}^2 \cdot S_\delta}{2 \cdot \delta^2} \quad (9.7)$$

La valori mari ale întrefierului de lucru, figura 9.1a, se pot neglija căderile de tensiune magnetică pe porțiunile feromagnetice ale circuitului magnetic, considerându-se cu aproximație satisfăcătoare că solenația bobinei se regăsește integral la nivelul întrefierurilor de lucru; astfel se poate scrie:

$$U_{m\delta} \cong \frac{1}{2} N \cdot i \quad (9.8)$$

N fiind numărul de spire parcurse de curentul de intensitate i . Pentru forța activă F_δ , din (9.7) se obține:

$$F_\delta = \frac{(N \cdot i)^2}{8 \cdot \delta^2} \mu_0 \cdot S_\delta \quad (9.9)$$

forța activă rezultantă, F_a , având expresia:

$$F_a = 2F_\delta = \frac{(N \cdot i)^2}{4 \cdot \delta^2} \mu_0 \cdot S_\delta \quad (9.10)$$

Schemele echivalente electrică și magnetică ale unui electromagnet au configurația dată în figura 9.2a, b; unde R reprezintă rezistența bobinei, R_p - rezistența corespunzătoare pierderilor active în miezul feromagnetic, L_d, L_δ - inductanțele corespunzătoare

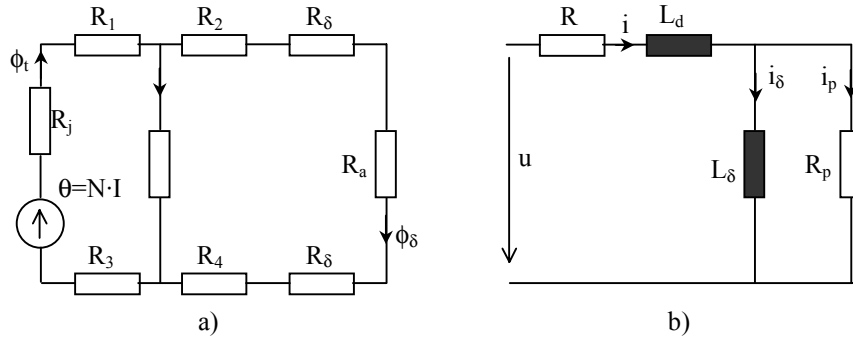


Fig. 9.2: Scheme echivalente ale circuitelor unui electromagnet: a-electrică; b-magnetică.

Intensitatea curentului prin bobină este dată de relația:

$$i = U/R \quad (9.11)$$

U fiind tensiunea continuă de alimentare.

Deoarece intensitatea curentului nu depinde de întrefier, se consideră că electromagneții de cc funcționează în curent constant; dependența fluxului magnetic util în raport cu valorile întrefierului de lucru se exprimă prin relația (9.6_{2,3}).

9.3. Forța activă dezvoltată de electromagneții monofazați de curent alternativ

Pentru analiza simplificată a funcționării unui electromagnet de c.a. se neglijează pierderile active în miezul feromagnetic ($R_p \rightarrow \infty$) precum și rezistența bobinei în raport cu reactanța sa inductivă, $R \ll \omega(L_\delta + L_d)$. În aceste condiții, dacă tensiunea de alimentare este de forma $u(t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t)$, rezultă:

$$i(t) = \sqrt{2}I \sin \omega t = \frac{\sqrt{2}U}{\sigma_d \omega L_\delta} \sin \omega t$$

$$\Phi_\delta = \sqrt{2}\Phi_\delta \sin \omega t = \frac{\sqrt{2}U}{\sigma_d N \omega} \sin \omega t \quad (9.12)$$

$$\sigma_d = \frac{L_d + L_\delta}{L_\delta}$$

Potrivit relației (9.12₂), electromagneții de c.a. funcționează cu flux magnetic constant, având valori independente de întrefierul de lucru; în schimb, intensitatea curentului absorbit de bobină depinde de întrefier. Într-adevăr, inductanța L_δ se poate calcula cu o relație de forma:

$$L_\delta = \frac{N^2}{R_{fe} + R_\delta} \quad (9.13)$$

R_{fe}, R_δ fiind reluctanțele corespunzătoare porțiunilor feromagnetice, respectiv întrefierurilor de lucru; pentru electromagnetul din figura 9.1 se obține:

$$L_{\delta} = \frac{\mu_0 S_{\delta} N^2}{R_{fe} \mu_0 S_{\delta} + 2\delta} \quad (9.14)$$

$$I = \frac{U(R_{fe} \mu_0 S_{\delta} + 2\delta)}{\sigma_d \mu_0 \omega N^2 S_{\delta}} \quad (9.15)$$

Se evidențiază astfel că intensitatea curentului absorbit de bobina unui electromagnet de c.a. crește liniar cu valorile întrefierului de lucru. Deoarece nu s-au impus restricții privind forma intensității curentului de excitație, relațiile (9.1) ÷ (9.10) sunt valabile, în limitele ipotezelor simplificatoare menționate, atât pentru electromagneții de c.c. cât și pentru cei de c.a.

Substituind expresia (9.12₂) în (9.7₁), pentru forța activă raportată la un întrefier de lucru al electromagnetului de c.a. se obține:

$$F_{\delta} = 0,5 \cdot f_{\delta} \cdot (1 - \cos 2\omega t) \quad (9.16)$$

unde:

$$f_{\delta} = \frac{U^2}{\mu_0 \sigma_d^2 N^2 \omega^2 S_{\delta}} \quad (9.17)$$

reprezintă valoarea de vârf a forței active; pentru valoarea medie a acesteia, se obține:

$$\tilde{f}_{\delta} = 0.5 f_{\delta} \quad (9.18)$$

Valoarea medie a forței active rezultante a electromagnetului din figura 9.1a se calculează cu relația:

$$\tilde{f}_a = 2\tilde{f}_{\delta} = f_{\delta} \quad (9.19)$$

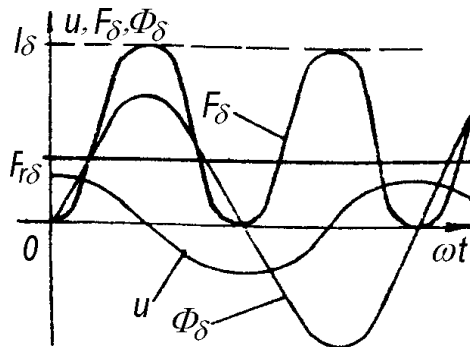


Fig. 9.3: Forța activă a electromagneților de curent alternativ.

În figura 9.3 sunt reprezentate grafic mărimile $u(t)$, $\Phi_{\delta}(t)$, $F_{\delta}(t)$, evidențiindu-se faptul că forța activă a electromagneților monofazați de c.a. este pulsatorie, în general de pulsație 2ω , ω fiind pulsația tensiunii de alimentare.

Deoarece forța activă se anulează periodic, armătura mobilă are tendința de a vibra. Atenuarea vibrațiilor se obține prin utilizarea unei spire ecran, /1/, amplasată într-o creștătură pe suprafața polară.

Pentru un electromagnet de c.a. de tipul celui prezentat în figura 9.1, forța activă are expresia:

$$F_a(t) = \tilde{f}_a (1 - \cos 2\omega t) \quad (9.20)$$

unde, pentru valoarea medie, \tilde{f}_a , a forței active se obține:

$$\tilde{f}_a = \frac{(N \cdot I)^2 \mu_0 \cdot S_{\delta}}{4\delta^2} \quad (9.21)$$

Ca și în c.c., relația (9.21) este adevărată numai pentru valori mari ale întrefierului de lucru, pentru care se pot neglija căderile de tensiune magnetică pe porțiunile feromagnetice ale circuitului magnetic și pentru care nu se resimte influența spirei ecran.

9.4. Caracteristicile electromecanice ale electromagneților

Caracteristicile electromecanice stabilesc dependența dintre forța activă, F_a , dezvoltată de un electromagnet și valorile întrefierului de lucru $\delta \in [\delta_f, \delta_i]$; δ_f este valoarea finală a întrefierului, corespunzătoare poziției ocupate de armătura mobilă cu mișcare de translație după acționare, iar δ_i – valoarea inițială, obținută la revenirea armăturii mobile.

Pentru electromagneții având armătura mobilă cu mișcare de rotație, caracteristicile electromecanice sunt funcții de forma $M_a(\alpha)$, M_a fiind cuplul activ, iar $\alpha \in [\alpha_f, \alpha_i]$ – întrefierul unghiular de lucru. În cazul electromagneților de c.c. forțele (cuplurile) active se consideră prin valorile lor medii.

În figura 9.4 sunt reprezentate grafic caracteristicile electromecanice ale unui electromagnet de c.c., curba 1, respectiv de c.a., curba 2.

Specifică funcționării electromagneților de c.c. este variația în limite largi a valorilor forțelor active, raportul F_{af}/F_{ai} stingând valori de 10÷15. Deoarece fluxul magnetic util, ϕ_δ , este limitat de valorile întrefierului de lucru, δ , electromagneții de c.c. sunt utilizați obișnuit pentru a dezvolta forțe active de valori mari, de-a lungul unor deplasări totale, $\delta_i - \delta_f$, de lungime mică (sub 10 mm).

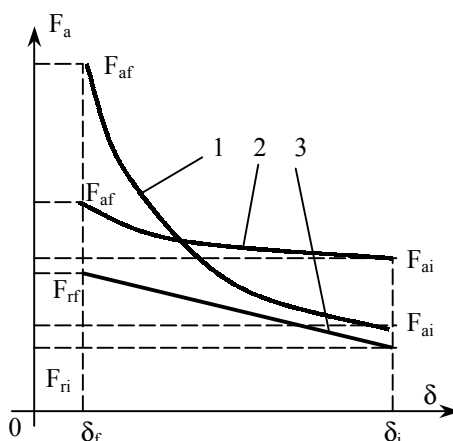


Fig. 9.4: Caracteristici electromecanice.

Valoarea finală a întrefierului electromagneților de c.c. trebuie să fie diferită de zero (în întrefier se amplasează opritoare din materiale neferomagnetice) pentru a se evita reținerea armăturii mobile, prin remanență magnetică, după întreruperea curentului de excitație.

Forța activă a electromagneților de c.a. depinde de valorile întrefierului de lucru prin intermediul factorului de dispersie, dar dependența este relativ slabă; la valori mici ale întrefierului se resimte influența spirei ecran.

În aceste condiții, electromagneții de c.a. se utilizează pentru valori relativ mari ale deplasării armăturii mobile, $\delta_i - \delta_f = 25\div 50$ mm. În funcționare, valorile finale ale întrefierului de lucru trebuie să fie cât mai mici, pentru a se limita astfel intensitatea curentului absorbit de bobină; în acest scop, suprafețele polare se supun unei operații tehnologice de rectificare.

Pentru funcționarea sigură a electromagneților este necesară corelarea caracteristicilor electromecanice $F_a(\delta)$, $M_a(\alpha)$ cu caracteristicile forței sau cuplului rezistent, $F_r(\delta)$, $M_r(\delta)$, curba 3, figura 9.4; acționarea este posibilă numai dacă, pe domeniul de variație a întrefierului, se realizează condițiile $F_a(\delta) > F_r(\delta)$, $M_a(\delta) > M_r(\delta)$.

9.5. Programul lucrării

Încercările experimentale se execută pe același electromagnet, atât în curent alternativ cât și în curent continuu.

9.5.1. Determinarea experimentală a caracteristicilor $U(I)$, $f_a(U)$, $I(\delta)$, $f_a(\delta)$ pentru un electromagnet de curent alternativ

Studiul experimental se efectuează cu ajutorul montajului având schema electrică reprezentată grafic în figura 9.5a.

Pentru fiecare din valorile întrefierului de lucru δ și ale tensiunii de alimentare U precizate în tabelul 9.1, se procedează astfel:

- cu ajutorul autotransformatorului ART-8 se reglează tensiunea de alimentare la valoarea dorită;
- se calează armătura mobilă pe poziția corespunzătoare valorii întrefierului de lucru δ ;
- se apasă butonul BP, prin care se comandă acționarea contactorului C, alimentându-se astfel bobina electromagnetului EM, studiat;
- se înregistrează în tabelul 9.1 valoarea intensității I a curentului absorbit de bobină;
- cu ajutorul unui dinamometru se măsoară valoarea medie \tilde{f}_a , a forței active dezvoltate de electromagnet, citirea făcându-se în momentul desprinderii armăturii mobile.

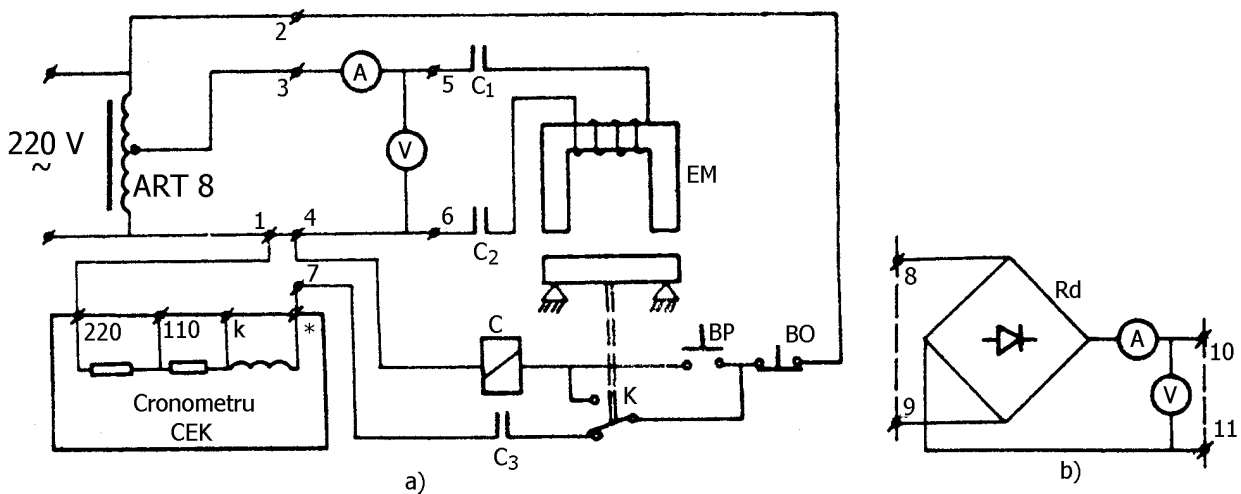


Fig. 9.5: Schema electrică a montajului pentru studiu electromagneților de c.c. și c.a.

9.5.2. Măsurarea timpului de acționare a electromagnetului de curent alternativ

Se studiază montajul din figura 9.5a. Timpul de acționare se măsoară pentru tensiunile U_1 , U_2 , U_3 , conținute în tabelul 9.1 și pentru întrefierul inițial, având valoarea $\delta_i = \delta_5$.

Se reglează întrefierul de lucru la valoarea inițială și se aduce la zero indicația cronometrului. Pentru fiecare valoare a tensiunii de alimentare, se acționează succesiv butoanele BP-BO, astfel încât electromagnetul să acționeze de zece ori.

Se consemnează în tabelul 9.1 valoarea timpului total, $t_{a\Sigma}$, apoi se calculează timpul de acționare mediu, t_a , al electromagnetului de curent alternativ.

Tabelul 9.1.

Electromagnet de c.a.: $U_n = \dots\dots\dots$ [V], $N = \dots\dots\dots$ spire								
δ [m]		$\delta_1=0$	$\delta_2=$	$\delta_3=$	$\delta_4=$	$\delta_5=$	$t_{a\Sigma}$ [s]	t_a [s]
$U_1 = U_n = \dots\dots\dots$ [V]	I [A]							
	\tilde{f}_a [N]							
	σ_d							
	R_{fe} [H^{-1}]							
	L_δ [H]							
	L_d [H]							
$U_2 = 0,75 \cdot U_n = \dots\dots\dots$ [V]	I [A]							
	\tilde{f}_a [N]							
	σ_d							
	R_{fe} [H^{-1}]							
	L_δ [H]							
	L_d [H]							
$U_3 = 0,5 \cdot U_n = \dots\dots\dots$ [V]	I [A]							
	\tilde{f}_a [N]							
	σ_d							
	R_{fe} [H^{-1}]							
	L_δ [H]							
	L_d [H]							

9.5.3. Determinarea experimentală a caracteristicilor $U(I)$, $F_a(I)$, $I(\delta)$, $F_a(\delta)$ pentru un electromagnet de curent continuu

Pentru efectuarea încercărilor experimentale, se alimentează bobina electromagnetului EM din figura 9.5a în curent continuu. În acest scop se înlocuiesc instrumentele de măsurare în c.a. din schemă cu modulul redresor-instrumente de măsurare în c.c., având schema electrică dată în figura 9.5b; se întrerup conexiunile 3-5, 4-6, înlocuindu-le cu 3-8, 4-9, 5-10, 6-11.

Caracteristicile se determină alimentând bobina în curent constant, pentru intensitatea căruia se stabilesc valorile I_1 , I_2 , I_3 , obținute în tabelul 9.1 la valoarea δ_5 a întrefierului de lucru și respectiv la tensiunile U_1 , U_2 , U_3 . Întrefierului de lucru i se dau valorile $\delta_1 \div \delta_5$, utilizate la electromagnetul de c.a. și conținute în tabelul 9.1.

Intensitatea curentului prin bobină se reglează cu autotransformatorul ATR-8; se înregistrează tensiunile obținute la bornele bobinei. Măsurarea forțelor active se face după indicațiile metodice din § 9.5.1. Cu relația (9.11) se calculează rezistența R a bobinei. Datele obținute se trec în tabelul 9.2.

Tabelul 9.2.

Electromagnet de c.c.								
	δ [m]	$\delta_1=0$	$\delta_2=$	$\delta_3=$	$\delta_4=$	$\delta_5=$	$t_{a\Sigma}$ [s]	t_a [s]
$I_1 = \dots\dots\dots$ [A]	U [V]							
	F_a [N]							
	R [Ω]							
$I_2 = \dots\dots\dots$ [A]	U [V]							
	F_a [N]							
	R [Ω]							
$I_3 = \dots\dots\dots$ [A]	U [V]							
	F_a [N]							
	R [Ω]							

9.5.4. Măsurarea timpului de acționare a electromagnetului de curent alternativ

Cunoscând numărul N de spire al bobinei și măsurând suprafața polară S_{δ} , cu ajutorul relațiilor (9.17), (9.19) se calculează valorile factorului de dispersie σ_d , completându-se tabelul 9.1. Utilizând respectiv relațiile 9.15, 9.14, 9.12₃, se calculează succesiv valorile reluctanței R_{fe} și ale inductanțelor L_{δ} , L_d ; rezultatele obținute se trec în tabelul 9.1.

Se verifică relația $R \ll \omega(L_{\delta} + L_d)$, valoarea rezistenței R fiind cea din tabelul 9.2.

9.6. Conținutul referatului

- 1) Schemele electrice ale montajelor utilizate pentru încercări;
- 2) Tabelele de date 9.1, 9.2 completate;
- 3) Trasate grafic, curbele $U(I)$, $f_a(U)$, $f(\delta)$, $\tilde{f}_a(\delta)$ pentru electromagnetul de c.a. și $U(I)$, $F_a(I)$, $I(\delta)$, $F_a(\delta)$ pentru electromagnetul de c.c.; pentru facilitatea comparațiilor, curbele de aceeași formă determinate în curent atât alternativ cât și continuu, se trasează în același sistem de axe;
- 4) Observații și concluzii privind studiul comparativ al electromagneților de c.a., respectiv de c.c.

9.7. Bibliografie

- /1/ Baraboi A., Echipamente electrice, curs. Institutul politehnic Iași, 1989, p.145-149;
- /2/ Gheorghiu Ioan, Popa Sorin Eugen, Puiu-Berizintu Mihai, "Echipamente electrice pentru centrale, stații și posturi de transformare", Ed. Tehnica-Info Chișinău, 2003.