

STUDIUL FORTELOR ELECTRODINAMICE

1. Noțiuni teoretice

Pentru dimensionarea corectă din punct de vedere al rezistenței mecanice, a amplitudinii vibrațiilor căilor de curent, contactelor și a altor elemente constructive ale aparatelor electrice este necesară evaluarea forțelor electrodinamice produse de curenții de scurtcircuit (forțele produse de curenții nominali sunt mult reduse și nu prezintă importanță).

Evaluarea analitică se face prin trei metode:

- **metoda bazată pe expresia forței Laplace**, aplicabilă în cazul circuitelor filiforme și în medii cu permeabilitate constantă, folosită în cazul când se cunoaște distribuția spațială a curenților și a vectorului inducției magnetice, relația de bază fiind (fig.1):

$$d\vec{F} = i \cdot d\vec{l} \times \vec{B} \quad (1)$$

unde elementul de lungime $d\vec{l}$ face parte dintr-un circuit închis parcurs de curentul i și plasat în câmpul magnetic de inducție \vec{B} .

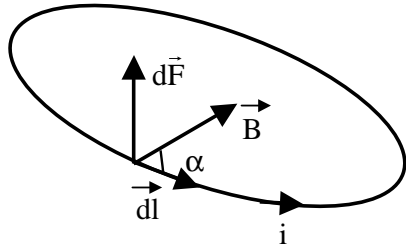


Fig. 1. Referitor la forța lui Laplace

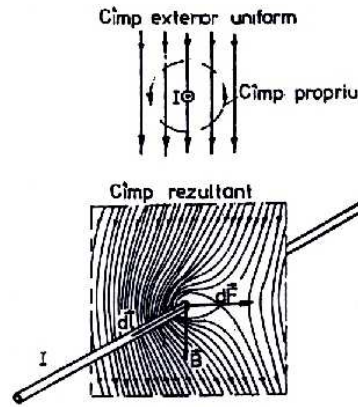


Fig.2.a) Sensul forței ce se exercită asupra unui conductor parcurs de curent și situat într-un câmp magnetic exterior

- **metoda bazată pe variația energiei magnetice**, folosită la contururi complicate, la care se cunosc inductanțele și se poate evalua energia câmpului magnetic. Relațiile de bază în acest caz sunt:

$$F = - \left. \frac{dW_m}{dx} \right|_{\psi=ct} ; \quad F = - \left. \frac{dW_m^*}{dx} \right|_{i=ct} \quad (2)$$

unde:

F - forța generalizată

W_m, W_m^* - energia magnetică respectiv coenergia magnetică

x - coordonata generalizată

ψ - fluxul total

i - curentul

- **metoda bazată pe integrarea tensiunilor maxwelliene**, ce se exercită la suprafața conductorului, care necesită însă calcule complicate. Relația de bază este:

$$F = \int_{\Sigma} \vec{T}_n d\vec{A} \quad (3)$$

unde tensorul tensiunilor maxwelliene \vec{T}_n are expresia:

$$\vec{T}_n = (\vec{B} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{H} - \vec{n} \cdot \left(\frac{\vec{B} \cdot \vec{H}}{2} \right) \quad (4)$$

\vec{n} fiind vectorul normal spre exteriorul suprafeței Σ .

Forțele electrodinamice au sensul orientat spre zonele cu câmp mai slab (fig.2 a, b și c). În cazul a două căi de curent paralele, filiforme (fig. 3) forțele se determină cu relația:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{l}{a} \cdot \varphi \left(\frac{a}{l} \right) \quad [\text{N}] \quad (5)$$

Coefficientul de corecție φ are importanță pentru rapoartele $l/a \leq 10$ (pentru $l/a > 10$, $\varphi = 1$) și se determină cu relația:

$$\varphi \left(\frac{a}{l} \right) = \sqrt{1 + (a/l)^2} - (a/l) \quad (5')$$

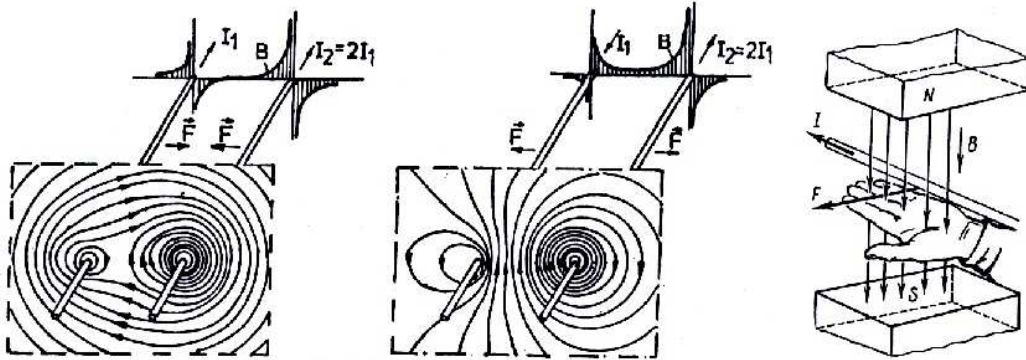


Fig. 2. b) și c) Interacțiunea electrodinamică a două conductoare lungi, filiforme, rectilinii, paralele parcurse de cureni de același sens (b) (atracție) și de sensuri opuse (c) (respingere)

Relativ la regula
mâinii stângi

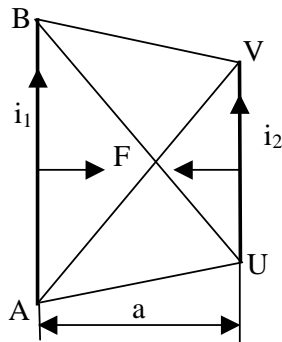


Fig. 3

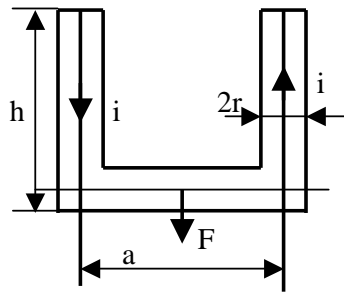


Fig. 4

În cazul frecvent întâlnit al unei bucle (fig.4) forța este orientată spre exteriorul buclei și se calculează cu relația:

$$F = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \frac{a}{r} \quad [\text{N}] \quad (6)$$

Când h este comparabil cu a , rezultă:

$$F = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \frac{a(h + \sqrt{h^2 + r^2})}{r(h + \sqrt{h^2 + a^2})} \quad [\text{N}] \quad (7)$$

Un conductor considerat filiform parcurs de curent și aflat în vecinătatea unui perete feromagnetic (fig.5), neglijând saturația, va fi supus unei forțe, orientată spre perete, care se poate calcula cu relația:

$$F = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \frac{1}{a_p} \cdot \varphi \left(\frac{2a_p}{l} \right) \quad [\text{N}] \quad (8)$$

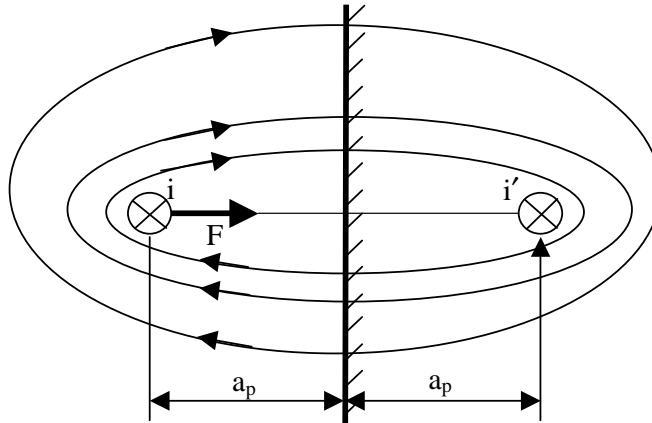


Fig. 5 Interacțiunea între un conductor parcurs de curent și un perete feromagnetic

Pentru nișa dreptunghiulară (fig. 6a) forța este constantă indiferent de poziția conductorului în nișă, și se calculează cu relația:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot i^2 \cdot l}{2 \cdot \delta} \quad [\text{N}] \quad (9)$$

Pentru nișa triunghiulară (fig. 6b) forța variază cu poziția conductorului în nișă și se calculează cu relația:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot i^2 \cdot l}{2 \cdot \delta \cdot x} \quad [\text{N}] \quad (10)$$

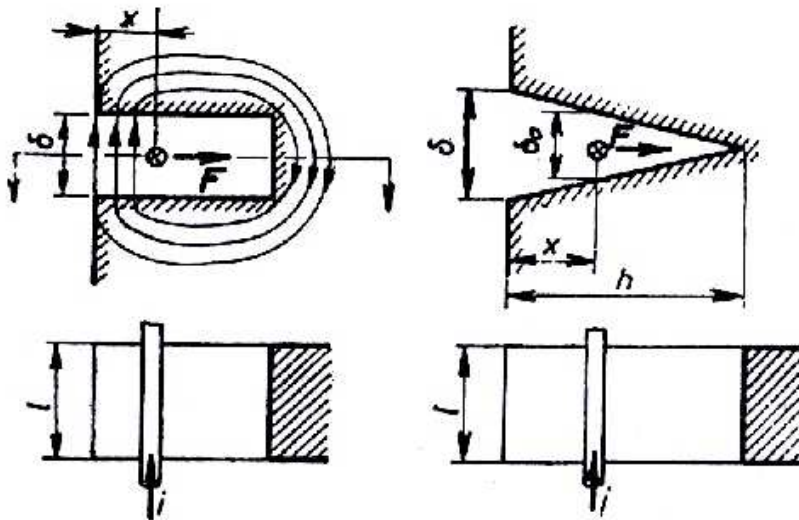


Fig. 6 Interacțiunea între un conductor parcurs de curent și o nișă feromagnetică: a) nișa dreptunghiulară; b) nișa triunghiulară



Fig. 7 Relativ la forța în contacte

Forța electrodinamică ce apare în contacte, (fig.7) datorită stricționării liniilor densității de curent, are tendințe de a desface contactele și se calculează cu relația:

$$F = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \frac{R}{r} \quad [\text{N}] \quad (11)$$

În regim tranzitoriu în scurtcircuit monofazat, presupunând un coeficient de șoc $k_y = 1.8$, rezultă:

$$F = 6,48 \cdot C \cdot i^2 \quad [\text{N}] \quad (12)$$

unde, C este coeficient de contur.

Deci, în regim tranzitoriu (pentru o rețea standard), forța crește este de 3,24 ori ($1,8^2$).

2. Chestiuni de studiat

2.1. Măsurarea forțelor electrodinamice între conductoare paralele în funcție de distanță $F = f(a)$, pentru o anumită valoare a curentului și poziții diferite ale barelor (cant și lat).

2.2. Măsurarea forțelor electrodinamice între conductoare paralele în funcție de curent, $F = f(I)$, pentru o anumită distanță între conductoare și poziții diferite ale barelor (cant și lat Fig. 8 a și b).

2.3. Calculul teoretic al forțelor electrodinamice în situațiile de mai sus folosind programe de calcul.

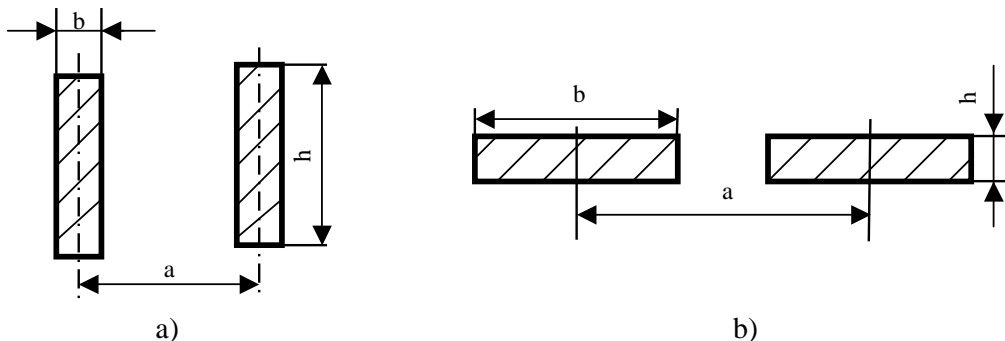


Fig. 8. Relativ la modul de dispunere al barelor

3. Schema electrică a instalației de lucru

Schema electrică a echipamentului pentru producerea curenților intenși este prezentată în Fig. 9 unde:

T - transformator de curenți intenși
 E - transformator de măsură 500/5 A
 F₁ - siguranțe fuzibile
 K₁ - releu de timp

S - buton de start
 H - lampă de semnalizare
 K - contactor
 R - reostat pentru reglajul curentului

4. Modul de lucru

Pentru măsurarea forțelor electrodinamice se utilizează dispozitivul din Fig. 10, în care s-a notat cu:

- A, B - borne racord pentru alimentare;
- 1, 2 - bare conductoare 21 x 5 mm²;
- 3 - balanța de comparație;
- 4 - dinamometre pentru măsurarea forței în ambele sensuri.

Barele conductoare 1 și 2 au posibilitatea de a se așeza paralele și coplanare la diverse distanțe prin intermediul bridelor și șuruburilor de prindere.

Experimentările se vor efectua pentru valori ale curentului cuprinse între 100 și 400 A.

Înainte de stabilirea curentului, dispozitivul de măsură se va regla prin echilibrare pe poziția "0", prin adăugarea unor greutăți pe unul din platanele balanței.

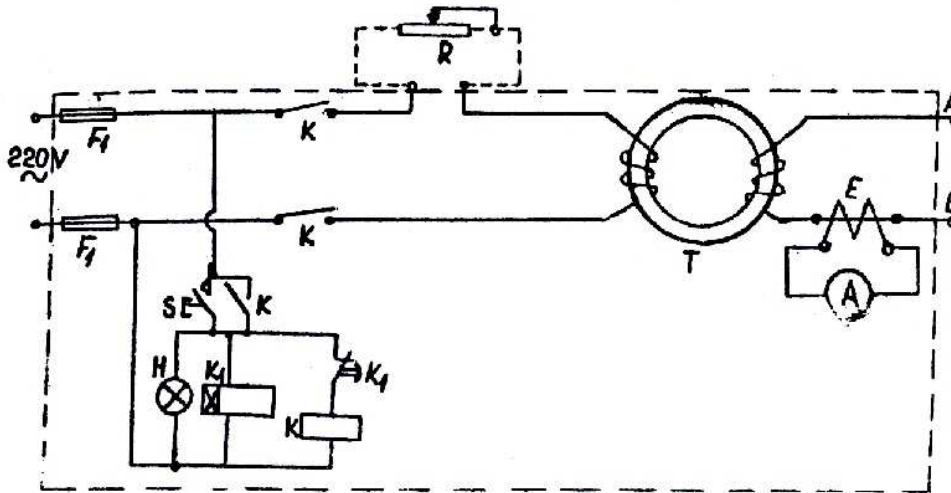


Fig. 9. Schema instalației pentru obținerea curenților intensi

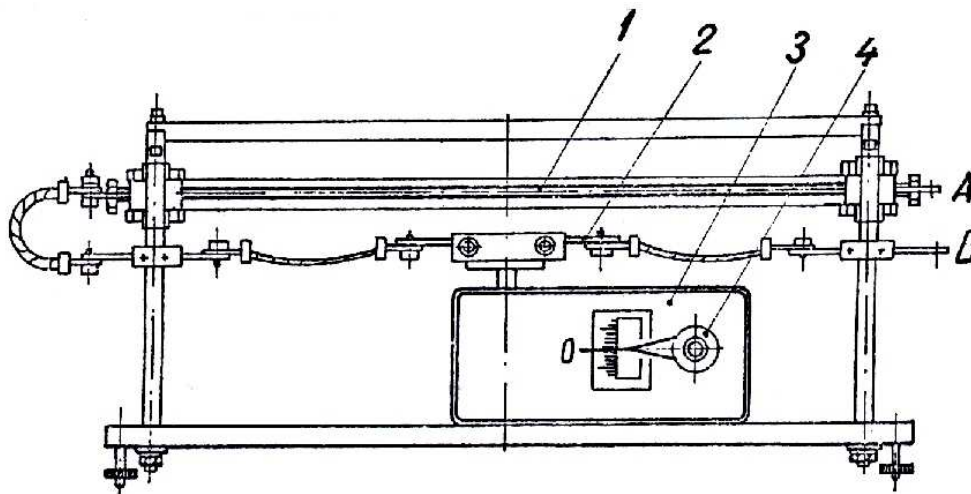


Fig. 10. Dispozitivul de măsurare a forțelor electrodinamice

Pentru o determinare experimentală se procedează astfel:

- se reglează balanța între axele barelor ($0.03 \leq a \leq 0.05\text{m}$) prin deplasarea barei 2 fixată prin șuruburi de barele verticale;
- se așează pe platan o greutate ($10 \leq G \leq 100\text{gf}$), dispozitivul dezechilibrându-se;
- se va echilibra dispozitivul de măsură prin reglarea curentului electric ce trece prin bare.

Corespunzător curentului reglat pentru echilibrarea dispozitivului de măsură, forța măsurată pentru greutatea adăugată pe platan, va fi:

$$F_m = 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot G \quad [\text{N}] \quad (13)$$

Calculul forțelor de la pct. 2.3. se va face cu ajutorul relațiilor.

- pentru barele dispuse ca în Fig. 8 a, se va folosi relația:

$$F_m = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \left(\frac{l}{a}\right) \cdot \varphi_c \quad [\text{N}] \quad (14)$$

unde:

- l - lungimea barelor (0,5m); h = 0,025m; a - distanța dintre axele barelor [m];
- φ_c - coeficient de corecție dat de relația:

$$\varphi_c = \left(\frac{a^2}{h^2}\right) \cdot \left[\left(2 \cdot \frac{h}{a}\right) \cdot \arctg\left(\frac{h}{a}\right) - \ln\left(1 + \frac{h^2}{a^2}\right) \right] \quad (15)$$

- pentru barele dispuse ca în figura 8 b, se va folosi relația (14), în care "l" și "a" au aceeași semnificație ca mai sus, b = 0,025m, iar φ_c se va determina cu relația:

$$\varphi_c = \left(\frac{a^2}{b^2}\right) \cdot \left[\left(1 + \frac{b}{a}\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{b}{a}\right) + \left(1 - \frac{b}{a}\right) \cdot \ln\left(1 - \frac{b}{a}\right) \right] \quad (16)$$

Rezultatele se vor trece într-un tabel de forma:

Poziția barelor	a [m]	I [A]	F _m [N]	F _{calc} [N]	Obs.

Se vor trasa curbele F = f(a) la I = ct., obținute teoretic și experimental, precum și curbele F = f(I) la a = ct., obținute teoretic și experimental.

5. Întrebări

1. Care este efectul forțelor electrodinamice în instalațiile și aparatele electrice?
2. Cum se definește stabilitatea dinamică a unui aparat?
3. Care este relația de bază pentru calculul forțelor electrodinamice între conductoare paralele filiforme parcurse de curent?
4. Care este formula lui Laplace pentru calculul forțelor electrodinamice?
5. Câte metode de calcul al forțelor electrodinamice cunoașteți?
6. În ce situații practice apar factori de corecție pentru calculul forțelor electrodinamice?
7. Care este influența modului de așezare al barelor dreptunghiulare asupra solicitărilor mecanice și asupra spațiului ocupat?
8. În ce condiții apare rezonanța mecanică a barelor parcurse de curent?
9. Cum se explică diminuarea forțelor electrodinamice în sistemele cu bare ecranate?
10. Cum se manifestă influența pereților feromagnetici în apropierea conductoarelor parcurse de curent?
11. Ce reguli cunoașteți pentru determinarea sensului forțelor electrodinamice?
12. De câte ori crește forța electrodinamică într-o instalație monofazată în regim tranzitoriu pentru o rețea standard?
13. Cum se folosește efectul electrodinamic în construcția căilor de curent și a camerelor de stingere?
14. Ce efect au forțele electrodinamice în contacte și care este relația de bază pentru determinarea acestora?
15. Cum se determină forțele electrodinamice în cazul conductoarelor coplanare dar neparalele?
16. Cum arată distribuția forțelor electrodinamice la o cale de curent în formă de U?
17. Ce fel de solicitări mecanice suferă barele și izolatoarele din instalațiile electrice?

6. Bibliografie

1. Hortopan, G., Aparate electrice, Editura didactică și pedagogică, București, 1984
2. Cividjan, G., A., Aparate electrice, Reprografia Universității din Craiova, 1979
3. Hortopan, G., ș.a. Aparate electrice, îndrumar de laborator, București 1984
4. Peicov, A., Aparate electrice, curs pentru specializarea electromecanică, Reprografia Universității din Craiova, 1981