

# MIJLOACE ELECTRICE DE MĂSURARE

Mijloacele de măsurare reprezintă elemente de bază în orice proces de măsurare.

În cele ce urmează se vor prezenta diferite tipuri de mijloace electrice de măsurare, precum și o serie de elemente componente, mai des folosite în construcția mijloacelor de măsurare electrice.

## 2.1. DISPOZITIVE ELECTROMECHANICE

### 2.1.1. Chestiuni generale

Dispozitivele (instrumentele) electromecanice constituie componenta principală a aparatelor electrice de măsurat analogice. Orice dispozitiv electromecanic este constituit dintr-o parte mobilă (echipamentul mobil) și o parte fixă (echipamentul fix). Face parte din categoria mijloacelor de măsurare analogice, acceptând la intrare una sau mai multe mărimi active de tip curent sau tensiune, iar la ieșire oferă o mărime unică care este de regulă deplasarea unghiulară  $\alpha$  a echipamentului mobil față de cel fix.

Funcționarea dispozitivelor electromecanice se bazează pe apariția unui cuplu de forțe în câmp electric sau magnetic, expresie a conversiei energiei electrice absorbită în procesul de măsurare, în energie mecanică.

Acest cuplu determină rotirea echipamentului mobil și se numește cuplu activ (motor):

$$M_a = \frac{dW}{d\alpha} \Big|_{U=ct \text{ sau } I=ct} \quad (2.1)$$

unde  $W$  este energia câmpului electric ( $U = \text{const.}$ ) respectiv magnetic ( $I = \text{const.}$ ) ce apare în dispozitiv sub acțiunea mărimii (mărimilor) de intrare.

În raport de construcția propriu-zisă și implicit de modul de obținere a cuplului activ, dispozitivele electromecanice se diferențiază între ele, principalele tipuri fiind: magnetoelectric, feromagnetic, electromagnetic, ferodinamic, electrostatic și de inducție.

### 2.1.2. Regimul static de funcționare

În regim static, asupra echipamentului mobil acționează două cupluri principale, activ și rezistent (antagonist) care sunt în echilibru.

Cuplul rezistent  $M_r$  este de sens opus cuplului activ  $M_a$  și se obține fie pe cale mecanică cu ajutorul arcurilor spirale, benzilor tensionate sau firelor de torsiune, fie pe cale electromecanică, în același fel ca și cuplul activ.

În primul caz, propriu variantelor constructive normale, cuplul rezistent depinde întotdeauna liniar de  $\alpha$ :

$$M_r = - D\alpha \quad (2.2)$$

unde  $D$  este cuplul rezistent specific al elementului elastic respectiv (arc spiral, bandă sau fir), iar în al doilea caz, propriu variantelor constructive logometrice (măsurătoare de raport), cuplul rezistent are aceeași formă ca și cuplul activ dar depinde de  $\alpha$  în mod diferit față de cuplul activ.

Caracteristica statică de transfer a dispozitivelor electromecanice se obține din ecuația de echilibru a celor două cupluri:

$$M_a + M_r = 0 \quad (2.3)$$

Ea va fi reprezentată de o funcție continuă liniară sau neliniară, specifică fiecărui tip de dispozitiv electromecanic. Pentru variantele normale ea este:

$$\alpha \equiv \frac{M_a}{D}$$

### 2.1.3. Regimul dinamic de funcționare

În regim dinamic asupra echipamentului mobil acționează pe lângă  $M_a$  și  $M_r$  și alte cupluri care se opun acțiunii cuplului activ și anume::

- cuplul de inerție

$$M_J = -J \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

unde  $J$  este momentul de inerție al echipamentului mobil în raport cu axa sa de rotație, iar

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} \quad \text{este accelerația unghiulară a micării de rotație;}$$

- cuplul de amortizare

$$M_A = -A \frac{d\alpha}{dt}$$

unde  $A$  este cuplul de amortizare specific al echipamentului mobil, iar

$$\frac{d\alpha}{dt} \quad \text{este viteza unghiulară a micării de rotație;}$$

- cuplul de frecare  $M_f$  existent numai la dispozitivele la care suspensia echipamentului mobil se face pe lagăre. Acest cuplu se opune întotdeauna modificării deviației  $\alpha$ , frecarea opunându-se micării.

Funcționarea în regim dinamic a dispozitivelor electromecanice este descrisă de ecuația de echilibru a cuplurilor:

$$M_a + M_r + M_J + M_A + M_f = 0 \quad (2.4)$$

Deoarece valoarea cuplurilor de frecare este mică (sub 0,1..0,2 % din valoarea cuplului rezistent maxim), acțiunea acestora se neglijează considerându-se  $M_f = 0$ .

Ținând cont de cele prezentate mai sus, ecuația diferențială intrare-ieire (caracteristica dinamică) pentru dispozitivele electromecanice normale la care cuplul activ nu depinde de  $\alpha$ , va fi:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + A \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = M_a, \quad (2.5)$$

Această ecuație mai poate fi scrisă și sub forma:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + 2\beta\omega_0 \frac{d\alpha}{dt} + \omega_0^2 \alpha = \frac{M_a}{J}, \quad (2.6)$$

unde  $\beta = \frac{A}{2\sqrt{DJ}}$  este factorul de amortizare, iar  $\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{J}}$  este pulsația oscilațiilor libere neamortizate.

Se vede că orice dispozitiv electromecanic este un mijloc de măsurare de ordinul doi liniar.

Soluția ecuației (2.6) în condiții inițiale specificate va caracteriza complet regimul dinamic de funcționare.

Această soluție va avea două componente:

$$\alpha = \alpha_P + \alpha_e \quad (2.7)$$

unde  $\alpha_P$  este o soluție particulară, dependentă de modul de variație în timp

$$\alpha = \alpha_P = \text{const}$$

a cuplului activ  $M_a$ , iar  $\alpha_e$  este soluția ecuației omogene (fără membrul drept).

Soluția particulară  $\alpha_P$  reprezintă deviația unghiulară a echipamentului mobil corespunzătoare regimului permanent de funcționare când  $\alpha = \alpha_P = \text{const}$  și deci  $\frac{d\alpha}{dt} = 0$ , iar

$\alpha_e$  reprezintă deviația corespunzătoare regimului liber când  $M_a = 0$ .

Prin urmare, indiferent de modul de variație în timp a mărimii (mărimilor) de intrare într-un dispozitiv electromecanic (implicit a cuplului activ), deplasarea unghiulară a echipamentului mobil are două faze, corespunzătoare regimului tranzitoriu ( $\alpha_e$ ), respectiv regimului permanent ( $\alpha_P$ ).

Regimul tranzitoriu este caracteristic pentru fiecare dispozitiv electromecanic și are o durată limitată în timp. El apare primul, fiind prezent întotdeauna la conectarea sau deconectarea acestora din circuite de măsurare și în general la trecerea de la o stare de regim permanent la alta.

Regimul permanent (al deviației permanente) apare după regimul tranzitoriu și este caracteristic dispozitivelor electromecanice cu inerție mare a echipamentului mobil.

După modul de variație în timp a mărimii (mărimilor) de intrare în dispozitiv există două categorii de dispozitive electromecanice ce funcționează în regim permanent.

O primă categorie este cea a dispozitivelor la care mărimea de intrare este constantă (implicit  $M_a = \text{constant}$ ) unde după trecerea regimului tranzitoriu, deviația atinge valoarea :

$$\alpha_P = \frac{M_a}{D} = \text{const} \quad .$$

Este cazul dispozitivelor magnetoelectrice, feromagnetice, electrodinamice, care funcționează în c.c.

A doua categorie cuprinde dispozitivele electromecanice care fiind supuse unei mărimi de intrare variabilă periodic în timp ( $M_a = \text{variabil periodic în timp}$ ), nu pot urmări variațiile rapide ale acesteia, dar la care după trecerea regimului tranzitoriu deviația atinge valoarea :

$$\alpha_P = \frac{M_{amed}}{D} = \text{const} \quad ,$$

proporțională cu valoarea medie a cuplului activ  $M_{amed}$ . Este cazul dispozitivelor feromagnetice, electrodinamice etc, care funcționează în curent alternativ.

Din cele prezentate mai sus rezultă că regimul tranzitoriu este un regim dinamic propriu-zis, regimul permanent pentru dispozitivele cu  $M_a = \text{ct.}$  este un regim static iar cel pentru dispozitivele cu  $M_a = \text{variabil periodic în timp}$  poate fi considerat un regim static din punct de vedere al deviației echipamentului mobil.

O categorie specială de dispozitive electromecanice o constituie cele cu inerție mică a echipamentului mobil. Acestea pot urmări variația în timp a cuplului activ respectiv a valorii instantanee a mărimii de intrare variabile până la o anumită limită. La această categorie după trecerea regimului tranzitoriu deviația  $\alpha$  va urmări evoluția în timp a mărimii de intrare (regim dinamic propriu-zis).

Este cazul dispozitivului magnetoelectric cu buclă utilizat în construcția oscilografelor electromecanice.

#### 2.1.4. Concluzii practice privind construcția și utilizarea dispozitivelor electromecanice

Deplasarea unghiulară  $\alpha$  a echipamentului mobil este determinată de modul de variație în timp a mărimii de intrare care produce cuplul activ.

Din multitudinea mărimilor de intrare, cele care prezintă un interes practic sunt cele tip treaptă și cele periodice. În primul caz avem  $M_a = \text{const.}$ , iar analiza răspunsului în timp a dispozitivului pe durata regimului tranzitoriu ne permite evaluarea anumitor indicatori de calitate în domeniul timpului pentru regimul dinamic (timpul de răspuns, timpul de creștere, etc). Dintr-o analiză detaliată (fig.2.1) se constată că valoarea factorului de amortizare ce asigură un timp de răspuns minim și o supracreștere acceptabilă este  $\beta = 0,6..0,7$ .

Ca urmare a acestei concluzii, toate dispozitivele electromecanice sunt practic realizate astfel încât să aibă  $\beta = 0,4..0,8$  adică să lucreze în regim oscilatoriu subamortizat ( $\beta < 1$ ) mult mai avantajos decât regimurile aperiodice ( $\beta \geq 1$ ).

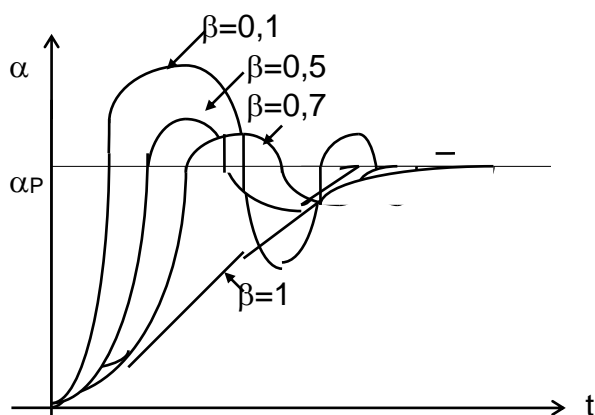


Fig. 2.1 Răspunsul în timp al dispozitivelor electromecanice la intrarea treaptă.

În al doilea caz  $M_a$  are o variație periodică în timp similară cu mărimea de intrare în dispozitivul electromecanic; iar din analiza caracteristicii de frecvență (fig.2.2) se vede că există un domeniu de frecvență:  $0..f_1$  în care  $H(\omega)/H(0) \cong \text{ct.}$  și un al doilea domeniu de frecvență  $f'_2..f'_2$  în care caracteristica are o scădere foarte puternică.

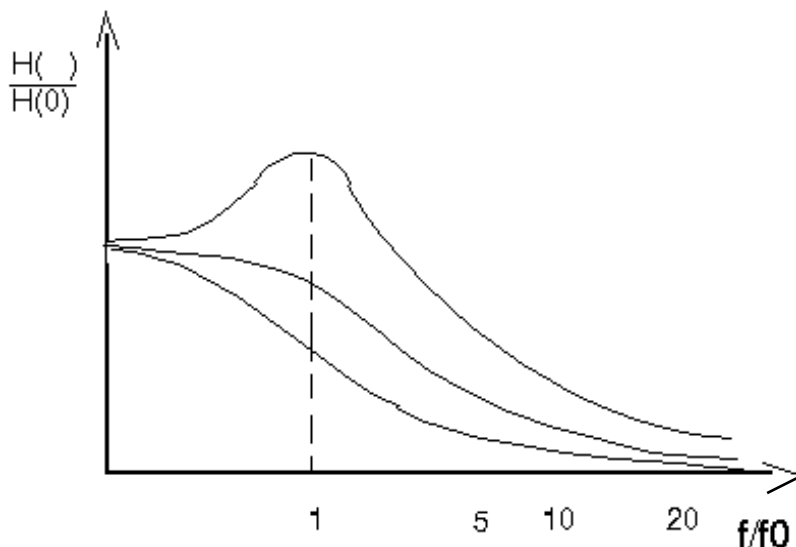


Fig2.2. Caracteristica de frecvență a dispozitivelor electromecanice

Această constatare semnifică două comportări diferite ale dispozitivelor electromecanice și anume ca element neinerțial respectiv ca filtru trece jos.

În primul caz deviația unghiulară va urmări întocmai variația cuplului activ, fiind dată de ecuația de echilibru a valorilor instantanee ale cuplului activ și rezistent. Pentru varianta constructivă normală ( $M_r = -D\alpha$ ) această ecuație este:

$$m_a(t) - D\alpha = 0, \quad (2.8)$$

Se obține :

$$\alpha = \frac{m_a(t)}{D} \quad (2.9)$$

Această situație permite utilizarea dispozitivelor electromecanice la construcția aparatelor electrice înregistratoare.

Ținînd cont de dependența caracteristicii de frecvență de  $\beta$  și de frecvența oscilațiilor libere neamortizate  $f_0$  ( $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ ), rezultă că frecvența maximă  $f_M$  a mărimilor ce pot fi înregistrate se poate controla prin construcția propriu-zisă a dispozitivelor de măsurare. Astfel în cazul construcțiilor uzuale care sunt de inerție relativ mari,  $f_0 = 0,5 \dots 2 \text{ Hz}$ ,  $\beta = 0,4 \dots 0,8$ , iar  $f_M = 0,1 \dots 10 \text{ Hz}$  în raport de tipul dispozitivului electromecanic.

În cazul construcțiilor speciale de inerție mică,  $f_0$  crește foarte mult (de exemplu 200 ... 20.000 Hz la dispozitivul magnetoelectric cu bandă) și implicit  $f_M$ .

Din analiza comportării ca filtru trece jos a dispozitivului electromecanic, rezultă faptul că pentru frecvențe ale mărimii de intrare mult mai mari decât  $f_0$  deviația echipamentului mobil nu mai urmărește variația cuplului activ, fiind dată de ecuația de echilibru a valorilor medii ale cuplului activ și rezistent.

Pentru varianta constructivă normală aceasta este:

$$M_{a \text{ med}} - D\alpha = 0 \quad (2.10)$$

Se obține :

$$\alpha = \frac{M_{a \text{ med}}}{D} \quad (2.11)$$

Acest aspect permite folosirea dispozitivelor electromecanice uzuale (de inerție relativ mare) în construcția aparatelor electrice de măsurare indicatoare de curent alternativ, pentru măsurarea valorilor sintetice ale mărimilor periodice.

Ținând cont de valorile caracteristice ale lui  $f_0$ , ca și de condițiile de funcționabilitate proprii acestor dispozitive, se determină domeniul de frecvență al mărimilor periodice ce pot fi supuse măsurării și anume, limita minimă

$$f'_2 = (5 \dots 20) f_0 = 2,5 \dots 40 \text{ Hz, iar limita maximă } f''_2 = 100 \dots 300 \text{ Hz.}$$

### 2.1.5. Elemente constructive comune

Pe lângă elementele constructive care participă la realizarea cuplului activ și care au un caracter specific, dispozitivele electromecanice au în componența lor o serie de alte elemente constructive comune care îndeplinesc diferite funcții. Acestea pot fi de mai multe feluri și pot avea detalii constructive diverse, în raport de soluția constructivă adoptată, de clasa de precizie impusă, etc.

În cele ce urmează se vor prezenta sumar cele mai folosite variante constructive ale acestor elemente constructive comune.

Echipamentul mobil este prevăzut cu un **sistem de suspensie** care îi permite să execute mișcarea de rotație cu o frecare cât mai mică. Acest sistem se realizează fie cu un ax (semiaxe) care se sprijină prin pivoți pe lagăre, fie cu benzi tensionate sau fir de torsiune (fig 2.3)

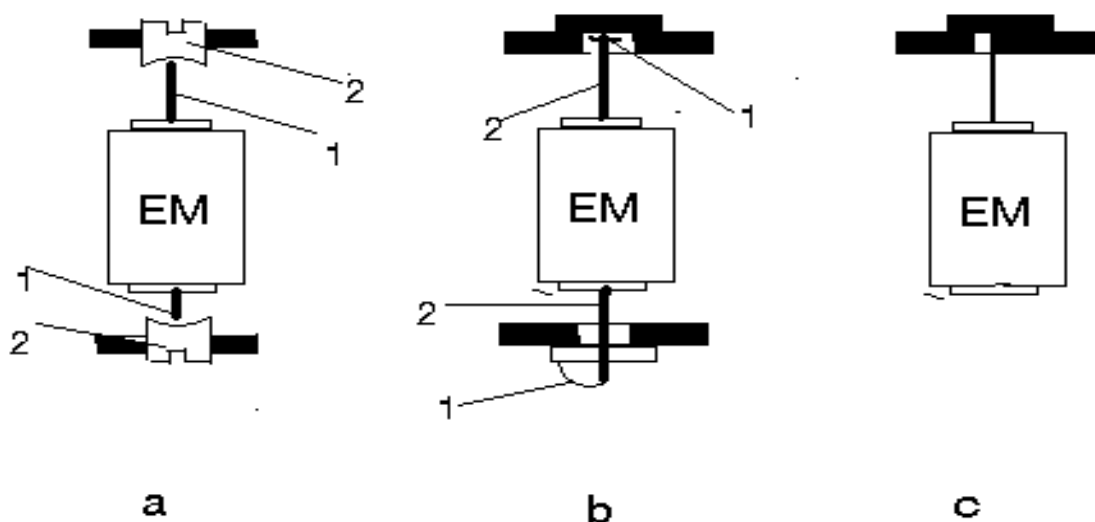


Fig 2.3. Sistem de suspensie : a-cu ax (semiaxe); b-cu benzi tensionate; c-cu fir de torsiune (liberă)

Suspensia cu ax este cea mai utilizată, oferind avantajul unei rezistențe mari la vibrații și șocuri mecanice, dar și dezavantajul apariției frecărilor între pivoții axului 1 și lagărele 2.

Suspensia cu benzi tensionate este utilizată la dispozitivele de mare sensibilitate. Tensionarea se realizează prin două lamele elastice 1 de care este fixată banda de suspensie 2.

Pe lângă funcția de suspensie a echipamentului mobil, benzile de suspensie au și rolul de a produce cuplul rezistent și de a conduce curentul la echipamentul mobil dacă este cazul.

Suspensia cu fir de torsiune se utilizează rar și numai la dispozitivele de mare sensibilitate.

Dispozitivele electromecanice sunt prevăzute cu un **sistem de amortizare** care asigură micșorarea timpului de răspuns prin reducerea eventualelor oscilații ale echipamentului mobil în jurul poziției de echilibru. De obicei amortizarea se realizează cu amortizoare pneumatice sau electromagnetice (fig 2.4)

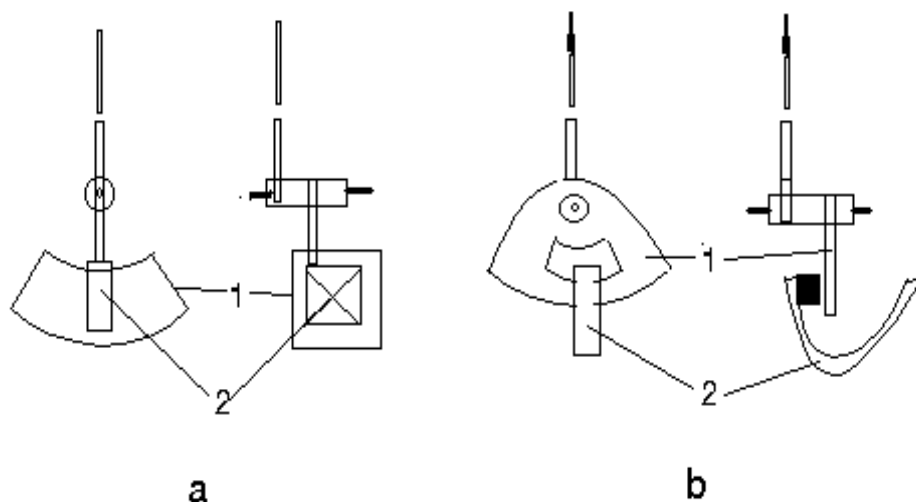


Fig 2.5 Sistem de suspensie: a-pneumatic; b-electromagnetic

Cel mai folosit amortizor pneumatic este format dintr-o cameră închisă 1, în interiorul căreia se deplasează fără atingere o paletă ușoară 2, fixată pe axul echipamentului mobil.

Amortizarea micării se realizează datorită comprimării aerului în zona înspre care se deplasează paleta.

Varianța constructivă cea mai folosită de amortizor electromagnetic este realizată dintr-un sector de aluminiu 1 fixat pe axul echipamentului mobil care se poate deplasa între polii unui magnet permanent 2. Amortizarea micării se realizează datorită interacțiunii dintre cîmpul magnetic permanent și curenții induși în sector la micarea acestuia în cîmpul magnetului permanent.

Pentru determinarea valori măsurate dispozitivele electromecanice sunt prevăzute cu un **sistem de indicare**. Acesta este format dintr-un cadran cu scară gradată și un indicator. Cadranul are o suprafață plană pe care sunt trasate reperele scării gradate dintre care unele sunt cifrate. Intervalul dintre două repere consecutive constituie o diviziune a scării gradate. La dispozitivele electromecanice de precizie cu ac indicator, cadranul este prevăzut cu o oglindă în dreptul scării gradate pentru eliminarea erorii de paralaxă (fig 2.6).

Indicatorul deviației poate fi cu ac indicator sau cu spot luminos. În primul caz (fig 2.6) acul indicator se fixează pe axul echipamentului mobil, acesta echilibrându-se cu două contragreutăți fixate pe partea opusă acului indicator, astfel încît centrul de greutate al întregului echipament mobil să se găsească pe axul său de rotație.

Acul indicator se realizează din duraluminiu de obicei sub formă de tub foarte subțire, cu vîrf tip lamă de cuțit.

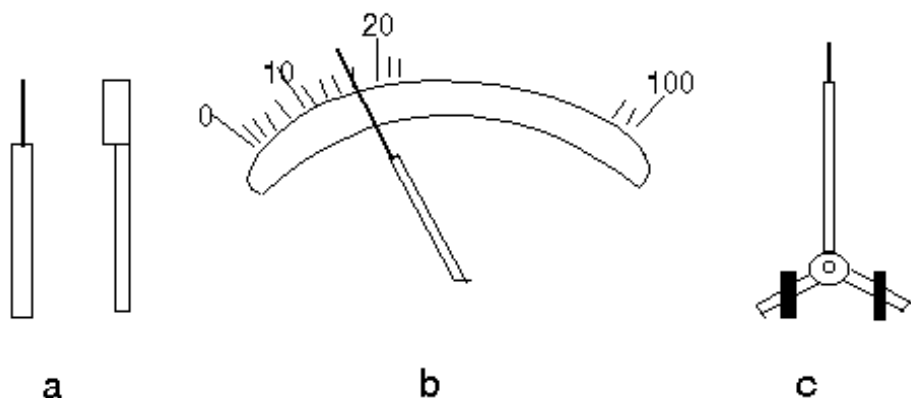


Fig. 2.6. Sistem de indicare cu ac indicator

a-ac indicator cu vîrf lamă de cuțit ; b- scară gradată cu oglindă ; c- ac indicator cu contragreutăți;

În al doilea caz (fig 2.7.), în locul acului indicator se folosește o oglindă foarte mică fixată rigid de echipamentul mobil . Funcționarea acestui tip de indicator se bazează pe reflexia de către oglindă 1 a unei raze de lumină emise de o sursă 2 , pe o scară gradată 3 , pe care se va forma spotul luminos 4. Există două asemenea variante constructive și anume cu suport luminos exterior la care sursa luminoasă și scară gradată sunt în exteriorul dispozitivului (aici poate exista varianta cu reflexie simplă sau cu reflexie multiplă).

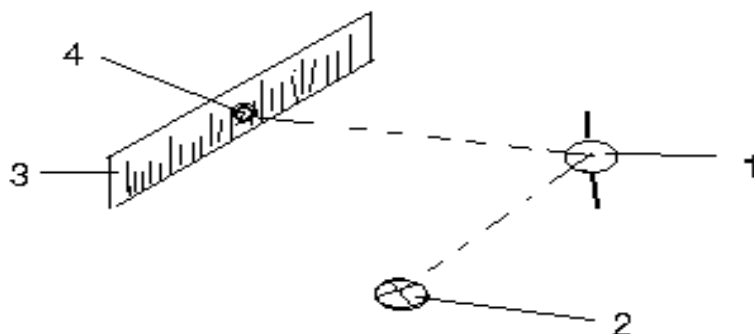


Fig 2.7. Sistem de indicare cu suport luminos.

Acest sistem de indicare deși mai complex oferă două avantaje importante și anume eliminarea erorii de paralaxă și creșterea sensibilității dispozitivului.

Toate dispozitivele electromecanice sunt prevăzute și cu **coretor al poziției inițiale de repaus (de zero)**. Clasa de precizie este garantată numai cu condiția respectării acestei poziții . La dispozitivele cu arcuri spirale corectorul de zero este constituit dintr-un buton ce se poate roti din exterior și care poate deplasa capătul unuia din cele două arcuri în sensul dorit , iar la dispozitivele cu benzi tensionate sau fir de torsiune acest buton permite rotirea dispozitivului superior de prindere a benzii sau firului de suspensie.

**Obs.** La dispozitivele electromecanice normale cu cuplu antagonist obținut pe cale mecanică poziția inițială de repaus este poziția zero, iar la cele logometrice aceasta este o poziție indiferentă, în interiorul scării gradate.

## 2.1.6. Dispozitivul magnetoelectric



### 2.1.6.1. Construcție, funcționare, relații.

Funcționarea dispozitivului magnetoelectric se bazează pe interacțiunea dintre câmpul magnetic al unui magnet permanent și curentul care circulă printr-o bobină.

Există două variante constructive principale după cum magnetul permanent aparține echipamentului fix și bobina echipamentului mobil, sau invers.

#### 2.1.6.1.1. Varianta constructivă normală

Cea mai răspândită realizare a acestei variante este cea cu magnet fix și bobină mobilă. Circuitul magnetic în acest caz poate avea diferite forme, magnetul permanent putând fi plasat interior sau exterior față de întrefierul dispozitivului.

În continuare se prezintă dispozitivul magnetoelectric varianta normală cu arcuri spirale, cu magnet permanent interior fix și bobină mobilă ( fig 2.8.)

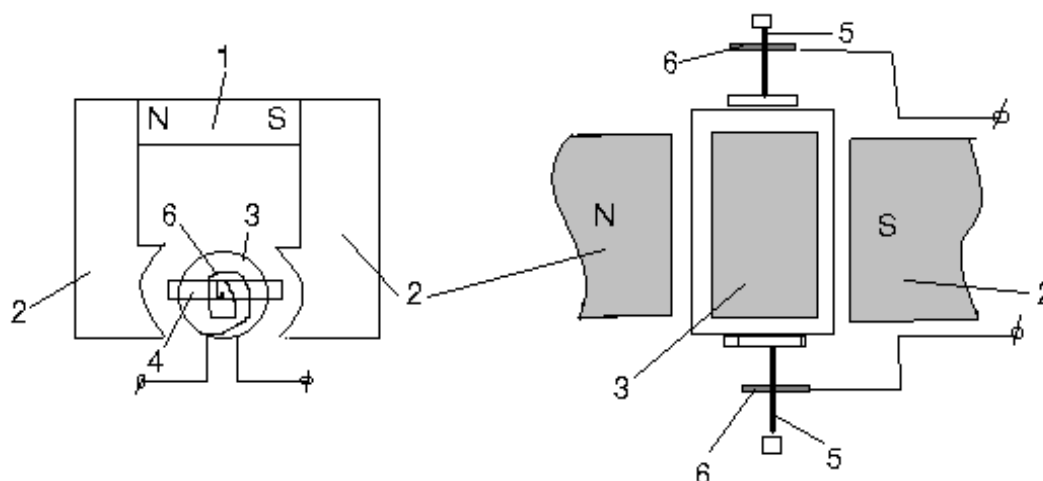


Fig 2.8. Dispozitivul magnetoelectric- detalii constructive

Circuitul magnetic este format din magnetul permanent 1 , piesele polare 2 și miezul cilindric 3. Forma acstor elemente permite realizarea unui întrefier cilindric, în care distribuția fluxului magnetic este uniformă și radială, iar inducția magnetică este constantă.

Bobina mobilă 4 înconjoară miezul cilindric, fiind fixată pe două semiaxe 5 care se sprijină în lagăre. Legătura dintre capetele înfăurării bobinei și bornele dispozitivului se realizează prin arcurile spirale 6 . La dispozitivele de mare sensibilitate, suspensia bobinei mobilă se realizează de regulă prin benzi tensionate care sunt și căi de curent pentru bobina mobilă.

La funcționarea în c.c. bobina mobilă este parcursă de curentul constant  $I$ , iar energia magnetică în zona activă va fi :

$$W_m = \Phi I \quad (2.12)$$

unde  $\Phi$  este fluxul magnetic total înălțuit de bobina mobilă.

Conform relației (2.1) cuplul activ este:

$$M_a = \left. \frac{dW_m}{d\alpha} \right|_{I=ct} \quad (2.13)$$

Deoarece  $I$  nu depinde de  $\alpha$  va rezulta :

$$M_a = I \frac{d\Phi}{d\alpha} \quad (2.14)$$

și apoi:

$$M_a = BSN I \quad (2.15)$$

unde  $B$  este inducția cîmpului magnetic în întrefierul cilindric,  $S$  este suprafața corespunzătoare perimetrului bobinei mobile, iar  $N$  este numărul de spire al acesteia.

Din ecuația de echilibru a cuplului activ și a celui rezistent ( $M_r = -D\alpha$ ) va rezulta caracteristica statică de transfer

$$\alpha = \frac{BSN}{D} I = S_I I \quad (2.16)$$

unde  $S_I = BSN/D$  este sensibilitatea la curent a dispozitivului.

Deoarece  $S_I = ct$ , caracteristica este liniară, iar dispozitivul magnetoelectric va avea scara liniară și va fi polarizat.

Rezultă că poate fi folosit pentru realizarea de aparate electrice de măsurat analogice de c.c. pentru mărimi de tip intensitate (ampermetre, voltmetre).

Dacă curentul prin bobina mobilă este periodic, cuplul activ nu se schimbă ca formă, avînd valoarea instantanee:

$$m_a(t) = BSN i(t) \quad (2.17)$$

Conform celor prezentate în par. 2.1.4 vor exista două situații după cum frecvența curentului este mai mică sau comparabilă cu  $f_0$ , respectiv mult mai mare decît aceasta.

În primul caz deviația echipamentului mobil va urmări variația în timp a curentului pînă la frecvențe maxime de 5 Hz ceea ce face posibilă utilizarea dispozitivelor magnetoelectrice uzuale la construcția înregistratoarelor electromecanice pentru evoluții temporale lente (0..5 Hz) ale mărimilor de tip intensitate.

În al doilea caz deviația a echipamentului mobil nu va mai urmări variația curentului, fiind determinată de valoarea medie a cuplului activ:

$$M_{a \text{ med}} = \frac{1}{T} \int_0^T m_a(t) dt = BSN \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = BSN I_{\text{med}} \quad (2.18)$$

unde  $I_{\text{med}}$  este valoarea medie în decurs de o perioadă a curentului periodic.

Din ecuația de echilibru a valorilor medii ale cuplului activ și rezistent ( $M_r = -D\alpha$ ) va rezultă deviația permanentă:

$$\alpha = \frac{M_{a \text{ med}}}{D} = S_I I_{\text{med}} \quad (2.19)$$

Acest lucru ne arată că dispozitivul magnetoelectric poate fi folosit pentru măsurarea valorii medii a curentului periodic.

Dacă curentul periodic este însă alternativ, valoarea sa medie pe o perioadă este nulă și deci dispozitivul magnetoelectric nu va devia, ceea ce arată că acest dispozitiv nu se poate folosi direct pentru construcția aparatelor electrice de măsurat analogice de c.a.

**Obs.** Este posibilă totuși utilizarea dispozitivului magnetoelectric în această situație dacă în schema aparatelor indicatoare respective, dispozitivului i se ataează un convertor c.a.- c.c. pentru valoare medie.

#### 2.1.6.1.2. Varianta constructivă logometrică

Logometrul magnetoelectric se folosește numai în c.c. și se deosebește de dispozitivul normal prin aceea că are două bobine mobile fixate rigid sub un anumit unghi între ele pe axul 3 al echipamentului mobil, iar forma întrefierului nu mai este cilindrică (fig. 2.9).

Cele două bobine, independente electric, produc separat cuplul activ și cuplul rezistent:

$$M_a = B_1 S_1 N_1 I_1 \quad (2.20)$$

$$M_r = - B_2 S_2 N_2 I_2 \quad (2.21)$$

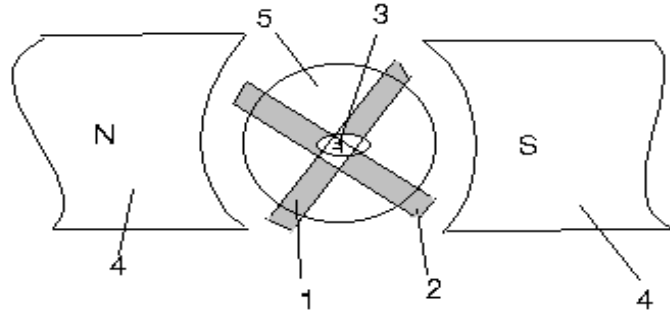


Fig. 2.9 - Logometru magnetoelectric

Cei doi curenți sunt aduși la bobinele 1 și 2 prin fire foarte subțiri din aur sau argint care nu produc practic cuplul rezistent. Datorită formei întrefierului mărginit de magnetul 5 și piesele polare 4, distribuția fluxului magnetic în zona activă este neuniformă, astfel încât inducția magnetică va avea o variație cu  $\alpha$  în mod diferit pentru cele două bobine:

$$B_1(\alpha) \neq B_2(\alpha), \quad (2.22)$$

$$B_1(\alpha)/B_2(\alpha) = f(\alpha) \neq \text{ct} \quad (2.23)$$

Din ecuația de echilibru a celor două cupluri:

$$B_1(\alpha) S_1 N_1 I_1 - B_2(\alpha) S_2 N_2 I_2 = 0 \quad (2.24)$$

rezultă caracteristica statică:

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right). \quad (2.25)$$

#### 2.1.6.2. Avantaje, dezavantaje, utilizări

Dispozitivul magnetoelectric este cel mai folosit dintre toate dispozitivele electromecanice, datorită avantajelor pe care le oferă. Cele mai importante dintre acestea sunt: scara liniară, precizie ridicată, consum propriu redus (0,1 mW), sensibilitate mare, influență neglijabilă a câmpurilor exterioare.

Pe lângă aceste avantaje dispozitivul magnetoelectric are și o serie de dezavantaje și anume: capacitate redusă față de suprasarcini mecanice și electrice, imposibilitatea utilizării directe în c.a. pentru măsurarea unor valori sintetice a diferitelor mărimi periodice, influență mare a variațiilor de temperatură.

Acest dispozitiv se folosește de obicei în construcția ampermetrelor și voltmetrelor de c.c. de precizie, multimetrelor, ohmetrelor, înregistratoarelor electromecanice, etc.

Simbolurile pentru cele două variante constructive normală și logometrică sunt date în figura de mai jos

#### 2.1.7. Dispozitivul feromagnetic

### 2.1.7.1. Construcție, funcționare, relații.

Funcționarea dispozitivului feromagnetic se bazează pe interacțiunea dintre câmpul magnetic uniform al unei bobine fixe parcursă de un curent  $i$  una sau două piese feromagnetice ce se află în acel câmp. Aceste dispozitive se construiesc atât în varianta normală cât și în varianta logometrică. După natura forțelor care creează cuplul activ, dispozitivele feromagnetice pot fi cu atracție sau cu respingere. În continuare se prezintă varianta normală cu respingere (fig....) care este singura variantă ce se întâlnește în mod curent în construcția diefritelor aparate electrice de măsurat.

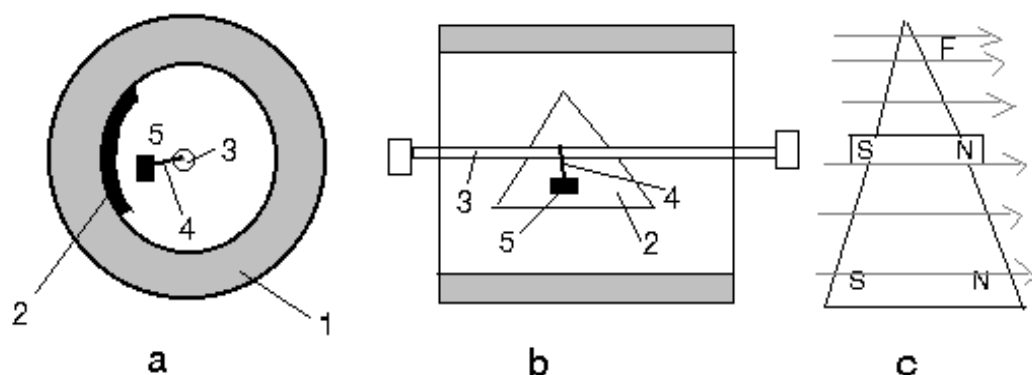


Fig. 2.10. Dispozitivul feromagnetic a,b-detalii constructive;  
c- piesele feromagnetice

În partea interioară a bobinei cilindrice 1 este fixată pe carcasa izolantă o plăcuță triunghiulară feromagnetică 2, iar pe axul 3 al echipamentului mobil este prinsă printr-o tijă 4 a doua plăcuță feromagnetică 5. Aceasta are o formă dreptunghiulară și se poate deplasa în fața celei fixe fără posibilitate de atingere. În momentul când bobina este parcursă de un curent, câmpul magnetic creat de acesta va magnetiza ambele plăcuțe în același sens, astfel încât poli de același nume se vor afla față în față (fig....). Acest lucru va determina apariția unei forțe de respingere între cele două plăcuțe, ce va duce la deplasarea celei mobile spre vârful celei fixe și deci la rotirea echipamentului mobil față de cel fix. Amortizorul utilizat este de tip pneumatic, iar în cazul construcțiilor ecranate magnetic sau ?????? poate fi și electromagnetic.

La funcționarea în c.c. bobina este parcursă de curentul constant  $I$ , iar energia magnetică în zona activă va fi:

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2.26)$$

unde  $L$  este inductivitatea proprie a ansamblului bobină-piese feromagnetice, care depinde de poziția reciprocă dintre elementele componente.

Cuplul activ conform relației (2.1) va fi:

$$M_a = \left. \frac{dW_m}{d\alpha} \right|_{I=ct} \quad (2.27)$$

Deoarece  $I$  nu depinde de  $\alpha$  va rezulta :

$$M_a = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2 \quad (2.28)$$

Din ecuația de echilibru a cuplului activ și a celui

rezistent ( $M_r = -D\alpha$ ) se obține caracteristica statică de transfer :

$$\alpha = \frac{1}{2D} \frac{dL}{d\alpha} I^2 \quad (2.29)$$

Se vede că aceasta este pătratică și drept urmare dispozitivul feromagnetic va avea o scară neliniară. Deoarece

$$\frac{dL}{d\alpha} = f(\alpha)$$

, prin controlul geometriei bobinei, a pistelor feromagnetice și a poziției lor reciproce caracterul neliniar al scării se poate corecta parțial.

Dacă curentul prin bobina fixă este alternativ, cuplul activ nu-i schimbă forma, avînd valoare instantanee:

$$m_a(t) = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} i^2(t) \quad (2.30)$$

Pentru domeniul de frecvență în care dispozitivul se comportă ca un filtru ?????? și echipamentul mobil se va roti sub acțiunea cuplului mediu:

$$M_{amed} = \frac{1}{T} \int_0^T m_a(t) dt = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I_{cf}^2 \quad (2.31)$$

unde  $I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$  este valoarea efectivă a curentului alternativ

Deviația permanentă se obține din ecuația de echilibru a valorilor medii ale cuplului activ și a celui ??????. Pentru varianta constructivă normală ( $M_r = -D\alpha$ ) aceasta este:

$$\frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I_{ef}^2 - D\alpha = 0 \quad (2.32)$$

$$\text{respectiv } \alpha = \frac{1}{2D} \frac{dL}{d\alpha} I_{ef}^2 \quad (2.33)$$

Se vede că deviația permanentă este proporțională cu pătratul valorii efective a curentului independent de forma acestuia i că au aceeași formă ca i în c.c.

Rezultă că dispozitivul feromagnetic poate funcționa atât în c.c. cât i în c.a. putînd fi folosit la realizarea de aparate electrice de măsurat analogice pentru mărimi tip intensitate (ampermetre, voltmetre).

Pentru construcții uzuale simple (necromate sau metalizate, materiale comune) datorită pierderilor din piesele feromagnetice în c.a., domeniu de frecvență în care se pot utiliza se limitează superior la 100..150 Hz.

Ținînd cont că  $L = N^2 \lambda_m$  unde N este numărul de spire al bobinei fixe, iar  $\lambda_m$  este permeanța magnetică a căii de inducție a fluxului magnetic în zona activă care include i cele două piese feromagnetice, expresiile deviațiilor în c.c. i c.a. se modifică:

$$\alpha = \frac{1}{2D} \frac{d\lambda_m}{d\alpha} (NI)^2 \quad (2.34)$$

respectiv

$$\alpha = \frac{1}{2D} \frac{d\lambda_m}{d\alpha} (NI_{ef})^2 \quad (2.35)$$

Aceste exprimări pun în evidență o calitate importantă a dispozitivului feromagnetic i anume că prin simpla modificare a numărului de spire în cadrul aceleiași solenații nominale a bobinei fixe, fără alte modificări constructive se pot obține dispozitive feromagnetice pentru diferiți curenți nominali.

#### 2.1.7.2. Avantaje, dezavantaje, utilizări

Principalele avantaje ale dispozitivului feromagnetic sunt: utilizarea în curent continuu i alternativ, capacitate mare la suprasarcină, construcție simplă i robustă, cost redus.

Dintre dezavantaje enumerăm: consum propriu mare (x 1 VA), scară neliniară, precizie redusă.

Acest dispozitiv se folosește de obicei în realizarea ampermetrelor i voltmetrelor de c.a.. de tablou i mai rar în realizarea ampermetrelor i voltmetrelor de c.c. i c.a. de precizie (cînd se compensează erorile suplimentare de temperatură, frecvență i cîmpuri magnetice exterioare). De asemenea se mai utilizează în construcția ?????? (construcție logometrice)

## 2.1.8. Dispozitivul electrodinamic

### 2.1.8.1. Construcție, funcționare, relații.

Funcționarea dispozitivului electromecanic se bazează pe interacțiunea dintre doi sau trei curenți care circulă prin câte o bobină, din care cel puțin una este mobilă. Aceste dispozitive se construiesc atât în variantă normală cât și în variantă logometrică.

#### 2.1.8.1.1. Varianta constructivă normală

Această variantă este cea mai răspândită, construcția frecvent întâlnită fiind prezentată simplificat în figura (2.11 a).

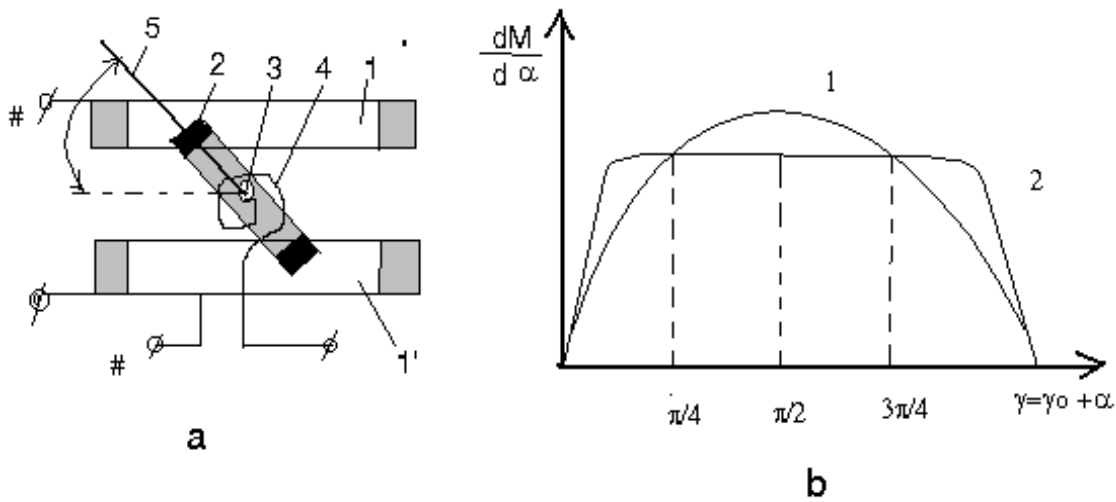


Fig. 2.11 Dispozitivul electrodinamic

Bobina fixă este de obicei formată din două semibobine identice 1 și 1' legate între ele în serie sau derivație.

Bobina mobilă 2 fixată pe axul 3 al echipamentului mobil, se poate roti fără atingere în spațiul interior al celor două semibobine fixe. Curentul este adus la această bobină prin intermediul arcurilor spirale 4, care produc și cuplul antagonist.

Pentru corelarea sensurilor curenților de alimentare ai celor două bobine cu sensul pozitiv de deplasare a acului indicator 5, se precizează bornele de intrare în cele două bobine.

La funcționarea în c.c. cele două bobine sunt parcurse de curenții  $I_1$  și  $I_2$  iar energia magnetică în zona activă va fi:

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M I_1 I_2 \quad (2.36)$$

unde  $L_1$  și  $L_2$  sunt inductivitățile proprii ale celor două bobine iar  $M$  este inductivitatea mutuală.

Conform relației (2.1) cuplul activ este:

$$M_a = \left. \frac{dW_m}{d\alpha} \right|_{I=ct} \quad (2.37)$$

Deoarece numai induc'ia mutuală  $M$  depinde de  $\alpha$  rezultă:

$$M_a = I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha} \quad (2.38)$$

Din ecuația de echilibru a cuplului activ și a celui rezistent ( $M_r = -D\alpha$ ), va rezulta caracteristica statică de transfer:

$$\alpha = \frac{1}{D} I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha} \quad (2.39)$$

La funcționarea în curent alternativ, cuplul activ ce acționează asupra bobinei mobile va avea valoarea instantanee:

$$m_a(t) = i_1(t) i_2(t) \frac{dM}{d\alpha} \quad (2.40)$$

Din cauza inerției echipamentului mobil, pentru domeniul de frecvență în care dispozitivul se comportă ca un filtru trece-jos, echipamentul mobil se va roti sub acțiunea cuplului activ mediu pe o perioadă:

$$M_{a \text{ med}} = \frac{1}{T} \int_0^T m_a(t) dt = \frac{dM}{dt} \frac{1}{T} \int_0^T i_1(t) i_2(t) dt \quad (2.41)$$

Dacă cei doi curenți alternativi sunt sinusoidali de pulsații egale :

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \sqrt{2} I_1 \sin nt \\ i_2(t) &= \sqrt{2} I_2 \sin(nt \pm \varphi) \end{aligned} \quad (2.42)$$

se obține :

$$M_{a \text{ med}} = I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha} \cos \varphi \quad (2.43)$$

unde  $I_1$  și  $I_2$  sunt valorile efective ale celor doi curenți, iar  $\varphi$  este defazajul dintre ei.

Deviația permanentă se obține din ecuația de echilibru a valorilor medii ale cuplului activ și a celui rezistent:

$$I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha} \cos \varphi - D\alpha = 0 \quad (2.44)$$

respectiv :

$$\alpha = \frac{1}{D} I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha} \cos \varphi \quad (2.45)$$

### Observația 1

Cazul prezentat mai sus este cel care se întâlnește de obicei în practică, celelalte (ambii curenți sinusoidali, pulsații diferite, un curent sinusoidal și celălalt nesinusoidal, etc) fiind mai puțin întâlnite.

### Observația 2

Deviația în c.c. și c.a. se poate exprima și funcție de solenatiile bobinei fixe și a celei mobile.

Rezultă că acest dispozitiv poate funcționa atât în c.c. cât și în c.a. și că se comportă ca un element înmulțitor putînd fi folosit la realizarea de aparate electrice de măsurat pentru mărimi tip intensitate sau putere.

După cum se vede deviația echipamentului mobil depinde și de factorul  $dM/d\alpha$ .

Variația acestui factor cu  $\alpha$  este determinată de spectrul cîmpului magnetic creat de cele două semibobine fixe în zona activă, în care se află bobina mobilă.



Din acest punct de vedere există dispozitive electromagnetice cu câmp uniform axial și cu câmp radial, diferite constructiv prin dimensiunile și poziționarea celor două semibobine ale bobinei fixe.

Se constată că prin alegerea poziției inițiale a bobinei mobile sub un unghi  $\gamma_0 = 45^\circ$ , factorul  $dM/d\alpha$  va avea o variație sinusoidală în primul caz sau va fi constant în cazul al doilea, pentru o deviație  $\alpha$  în zona  $0^\circ..90^\circ$  (fig.2.11.b- curba1 respectiv 2).

### **2.1.8.2. Avantaje, dezavantaje, utilizări**

Principalele avantaje ale dispozitivului electrodinamic sunt: precizia ridicată și utilizarea atât în c.c. cât și în c.a.

Dintre dezavantaje enumerăm: consum propriu mare ( $\times 1$  VA), capacitate de suprasarcină redusă, influență puternică a câmpurilor magnetice exterioare, temperaturii și frecvenței, cuplu activ redus.

Acest dispozitiv se utilizează de obicei în construcția ampermetrelor, voltmetrelor, wattmetrelor de precizie de c.c. și de c.a. și fazmetrelor (construcții logometrice).

Simbolurile pentru cele două variante constructive normală și logometrică sunt date în figura de mai jos