

## Capitolul I

# GENERALITĂȚI PRIVIND MAȘINILE ȘI SISTEMELE DE ACȚIONARE ELECTRICĂ

La 29 august 1831, Faraday publică într-o formă generală calitativă și cantitativă, *legea inducției electromagnetice*. Începând cu această dată, până spre sfârșitul secolului, istoria mașinilor electrice se confruntă cu descoperirea, dezvoltarea și perfecționarea diferitelor variante constructive de transformatoare și mașini (de curent continuu, asincrone și sincrone).

Pionier al mașinilor electrice, mașina de curent continuu a evoluat de la mașinile elementare cu magneți permanenți și indus în formă de inel, la mașina cu excitație independentă și indus cilindric, ajungând în cele din urmă la mașina cu autoexcitație și colector perfecționat. Însușirea de bază a mașinii de curent continuu, funcționând în regim de motor, constă în posibilitatea reglării comode și în limite largi a turației, din care cauză se folosește în acționările electrice care necesită modificarea vitezei într-un domeniu extins.

Regimurile de funcționare, frecvent utilizate la toate tipurile de mașini, sunt: de *generator*, de *motor*, iar la mașina de curent continuu și la mașina asincronă se utilizează și regimul de *frână electromagnetică* impus de sensul de circulație a energiei. Mașina asincronă este larg utilizată ca motor, iar mașina sincronă se folosește ca generator în centralele electrice, ambele categorii fiind construite pentru diverse puteri, tensiuni și curenți.

Apariția mașinilor electrice de curent alternativ, determinată de dezvoltarea producerii, transportului și distribuției energiei electrice în curent alternativ și în special apariția motoarelor asincrone, a determinat deplasarea interesului către acestea, cunoscut fiind faptul că motoarele asincrone sunt mai ușor de construit și de exploatat.

Suținută de dezvoltarea electronicii de putere, utilizarea motoarelor asincrone comandate prin convertoare de frecvență în acționările cu viteză reglabilă, tinde să micșoreze interesul acordat mașinilor de curent continuu în acest domeniu. Motoarele sincrone cu comutație statică au câștigat teren în acționările cu viteză reglabilă. Limita de putere pentru care se construiesc aceste motoare este ridicată ( de exemplu, la mori de ciment se utilizează motoare de 6,4 MW la 5,5 Hz eliminându-se reductorul din acționare).

### 1.1. LEGI DE BAZĂ ȘI NOȚIUNI GENERALE ÎN MAȘINILE ELECTRICE

Comportarea mașinilor electrice este guvernată de legile generale ale electrotehnicii și mecanicii; cunoașterea acestor legi permite o înțelegere corectă a funcționării mașinilor electrice și servește la realizarea unor modele matematice pe baza cărora să se determine ușor caracteristicile și performanțele acestora.

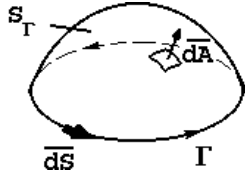
În continuare se prezintă cele mai importante legi din electrotehnică utilizate cel mai des în studiul mașinilor electrice [22].

#### 1.1.1. LEGEA CIRCUITULUI MAGNETIC

Circulația intensității câmpului magnetic de-a lungul unui contur închis  $\Gamma$  poartă numele de tensiune magnetomotoare. Tensiunea magnetomotoare se definește deci prin integrala curbilinie  $\int_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{s}$ ,  $d\vec{s}$  fiind un element orientat de arc al conturului  $\Gamma$ , conform figurii 1.1.

În situația în care câmpul electric nu variază în timp și se consideră numai conductoare filiforme parcurse de curenți de conducție  $i$ , legea circuitului magnetic se scrie sub forma :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \sum_{s_r} i, \quad (1.1)$$



**Fig. 1.1.** Asocierea sensurilor pozitive la legea circuitului magnetic.

în care suma  $\Sigma$  se referă la curenții de conducție care intersectează o suprafață oarecare  $S_\Gamma$  care se sprijină pe conturul  $\Gamma$ . Suma se numește uneori curent total de conducție.

### 1.1.2. LEGEA FLUXULUI MAGNETIC

Conform legii fluxului magnetic, *fluxul magnetic pe orice suprafață închisă  $\Sigma$  este nul*, adică:

$$\int_{\Sigma} \vec{B} \cdot \vec{dA} = 0. \quad (1.2)$$

Se numește *flux magnetic* integrala de suprafață a vectorului inducției magnetice  $\vec{B}$  corespunzător unei suprafețe oarecare  $S_\Gamma$  care se sprijină pe conturul  $\Gamma$ :  $\int_{S_\Gamma} \vec{B} \cdot \vec{dA}$ . Cu alte cuvinte, liniile de câmp ale vectorului inducție câmp magnetic sunt totdeauna curbe închise.

### 1.1.3. LEGEA INDUCȚIEI ELECTROMAGNETICE

Conform legii inducției electromagnetice, *tensiunea electromotoare indusă de-a lungul unui contur  $\Gamma$  este egală și de semn contrar cu viteza de variație în timp a fluxului magnetic care corespunde unei suprafețe oarecare care se sprijină pe conturul  $\Gamma$* .

$$e_\Gamma = - \frac{d\Phi_\Gamma}{dt}. \quad (1.3)$$

Dacă variația fluxului magnetic are loc prin variația în timp a inducției, simultan cu mișcarea corpurilor în câmp, atunci tensiunea electromotoare indusă va conține doi termeni: *t.e.m. indusă transformatorică și t.e.m. indusă de mișcare*:

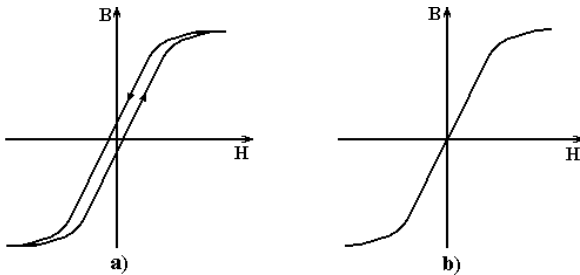
$$e_\Gamma = - \int_{S_\Gamma} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{dA} + \int_\Gamma (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{ds}. \quad (1.4)$$

### 1.1.4. LEGEA LEGĂTURII DINTRE INDUCȚIE ȘI INTENSITATEA CÂMPULUI MAGNETIC. CIRCUIT MAGNETIC.

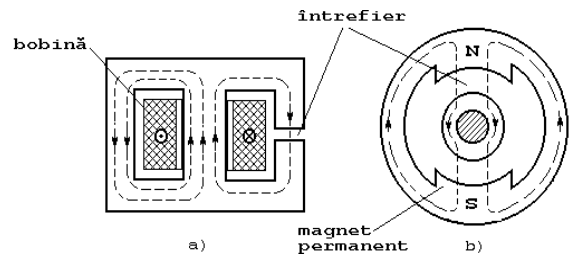
Într-un mediu liniar și izotrop din punct de vedere magnetic, inducția magnetică este proporțională cu intensitatea câmpului magnetic și ambele au aceeași orientare. Deci:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (1.5)$$

în care coeficientul de proporționalitate  $\mu$  denumit *permeabilitate magnetică* este o mărime scalară. Permeabilitatea magnetică diferă de la material la material.



**Fig. 1.2.** Caracteristica de magnetizare la materiale feromagnetice.



**Fig. 1.3.** Exemple de circuite magnetice.

Materialele feromagnetice reprezintă o clasă de materiale cu permeabilitate dependentă de valoarea intensității câmpului magnetic după o curbă de histerzis (Fig. 1.2.a). Aceste materiale au deci o caracteristică  $B = f(H)$  neliniară. Această caracteristică poate fi aproximată în unele cazuri printr-o curbă (Fig. 1.2.b) care neglijează histerzisul și pune în evidență numai fenomenul de saturație. În lipsa saturației, permeabilitatea materialelor feromagnetice este de mii și zeci de mii de ori mai mare decât a aerului. Din acest considerent se trage concluzia că permeabilitatea în circuitul feromagnetic este practic nulă. Reluctanța unui circuit magnetic care se opune la trecerea fluxului este definită prin relația:

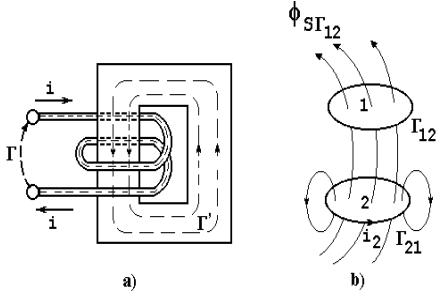
$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}. \quad (1.6)$$

*Circuitul magnetic* reprezintă un ansamblu de corpuri feromagnetice (Fig.1.3, a și b) în contact direct sau prin intermediul unor întrefieruri (spații de aer) de surse de magnetizare (excitație). Sursele de magnetizare pot fi magneți permanenți sau bobine [22] străbătute de curenți și plasate pe circuitele feromagnetice.

### 1.1.5. INDUCTIVITĂȚI PROPRII ȘI MUTUALE

Dacă se consideră o bobină situată pe un circuit feromagnetic și cu  $w$  spire (Fig. 1.4, a), bobina fiind parcursă de curentul  $i$ , se numește *inductivitate proprie*  $L$ , definită prin relația:

$$L = \frac{\Phi_{S_{\Gamma}}}{i}, \quad (1.7)$$



raportul dintre fluxul magnetic corespunzător unei suprafețe  $S_{\Gamma}$  (Fig. 1.4-a) care se sprijină pe curba închisă  $\Gamma$  (urmărind conductorul bobinei de-a lungul celor  $w$  spire din care este compusă) și curentul  $i$  care produce acest flux străbătând bobina. Conturul  $\Gamma$  se închide în exterior între bornele de acces.

Dacă curentul  $i$  este variabil, atunci în bobină se induce o t.e.m. numită *tensiune electromotoare de autoinducție* a cărei expresie este:

$$e_{\Gamma} = - \frac{d \Phi_{S_{\Gamma}}}{dt} = - \frac{d(Li)}{dt}. \quad (1.8)$$

**Fig. 1.4.** Exemple de bobine.

Când inductivitatea  $L$  este o mărime constantă atunci relația (1.8) devine:

$$e_{\Gamma} = - L \frac{di}{dt}. \quad (1.9)$$

Dacă se consideră două bobine apropiate, atunci o parte din fluxul produs de prima bobină se înlanțuie cu spirele celeilalte bobine. Se spune că bobinele sunt *cuplate magnetic*. Notând cu  $\Phi_{S_{\Gamma_{12}}}$  fluxul magnetic produs de curentul  $i_2$  în lungul unui contur  $\Gamma_{12}$  ce urmărește conturul din care este confecționată prima bobină și se închide între bornele sale de acces (Fig.1.4, b), atunci se numește *inductivitate mutuală*  $L_{12}$  a bobinei 1 în raport cu bobina 2 raportul dintre  $\Phi_{S_{\Gamma_{12}}}$  și  $i_2$ , deci:

$$L_{12} = \frac{\Phi_{S_{\Gamma_{12}}}}{i_2}. \quad (1.10)$$

Se constată că o parte din fluxul produs de a doua bobină, parcursă de curentul  $i_2$  se închide în jurul conturului  $\Gamma_{21}$  constituind *fluxul de dispersie sau de scăpări* de care nu se ține cont la cuplajul magnetic. În mod analog, inductivitatea mutuală  $L_{21}$  a bobinei 2 în raport cu bobina 1 este:

$$L_{21} = \frac{\Phi_{S_{\Gamma_{21}}}}{i_1}. \quad (1.11)$$

În situația în care cei doi curenți sunt variabili în timp sau dacă se modifică în timp poziția celor două bobine, în ambele bobine se induc t.e.m. datorită cuplajului magnetic a căror expresii sunt date de relațiile:

$$e_{12} = - \frac{d \Phi_{S_{\Gamma_{12}}}}{dt} = - \frac{d(L_{12} i_2)}{dt}. \quad (1.12)$$

$$e_{21} = - \frac{d \Phi_{S_{\Gamma_{21}}}}{dt} = - \frac{d(L_{21} i_1)}{dt}. \quad (1.13)$$

Aceste t.e.m. sunt produse prin inducție mutuală între bobinele 1 și 2 și se adună algebric cu t.e.m. autoinduse.

### 1.1.6. CONVENȚII DE ASOCIERE A SENSURILOR DE REFERINȚĂ

Scrierea ecuațiilor care rezultă din aplicarea legilor electromagnetismului implică stabilirea unor reguli de asociere a sensurilor de referință pentru anumite mărimi care intervin în ecuații, scheme echivalente și diagrame fazoriale. Se adoptă convenția de sensuri pozitive pentru regimurile de generator și receptor la circuitele electrice din figurile 1.5.a și 1.5.b în care au fost scrise și ecuațiile de tensiuni corespunzătoare. Se precizează că, în prezent, în studiul mașinilor electrice și transformatoarelor unii autori adoptă frecvent numai convenția pentru regimul de funcționare ca receptor (pentru toate circuitele) conform figurii 1.5.c în care se notează cu  $u_i = d\Phi/dt$  tensiunea corespunzătoare t.e.m. induse.

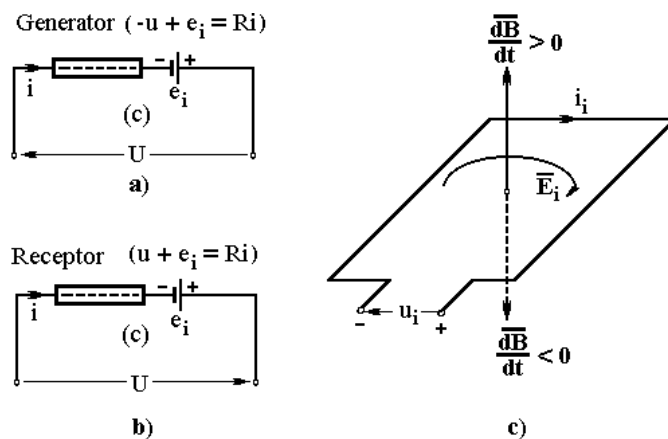


Fig. 1.5. Convenția de sensuri pozitive pentru circuite electrice.

O altă convenție este legată de sensul de succesiune al fazorilor într-un sistem polifazat direct care este sensul orar sau sensul antiorar pentru care sistemul este considerat de succesiune inversă.

## 1.2. MATERIALE ELECTROTEHNICE UTILIZATE ÎN CONSTRUCȚIA MAȘINILOR ELECTRICE

Materialele utilizate în construcția mașinilor electrice și transformatoarelor pot fi grupate în trei categorii:

- *materiale active*, compuse din materiale magnetice și conductoare electrice (materialele magnetice servesc la construcția circuitului magnetic prin care se închid liniile de câmp ale fluxului util iar conductoarele electrice servesc la realizarea înfășurărilor prin care se stabilesc curenții electrici);
- *materiale electroizolante*, folosite pentru asigurarea izolației înfășurărilor față de părțile constructive metalice;
- *materiale constructive*, folosite la susținerea și consolidarea materialelor active și izolante precum și la transmiterea cuplurilor mecanice.

### 1.2.1. MATERIALE ACTIVE

Materialele active împreună cu materialele electroizolante constituie grupa materialelor electrotehnice folosite în construcția mașinilor electrice.

Principalele materiale active utilizate în construcția transformatoarelor și mașinilor electrice sunt *conductoarele electrice și materialele magnetice*.

**Conductoarele electrice** sunt materiale de mică rezistivitate, în principal cupru și aluminiu. Pentru confecționarea bobinelor înfășurărilor mașinilor și transformatoarelor se folosește cupru de înaltă puritate (CuE – cupru rafinat electrotehnic cu 99,95 % Cu sau 99,5% Cu). Pentru înfășurările transformatoarelor (cu puteri pînă la 10 MVA) și pentru înfășurările în colivie ale motoarelor asincrone se utilizează aluminiu de înaltă puritate (AlE - aluminiu electrotehnic) având minimum 99,5 % aluminiu. Atât conductoarele din cupru cât și cele din aluminiu se confecționează în profile rotunde și dreptunghiulare cu dimensiuni standardizate. Acestea se găsesc în tabele prezentate în literatura de specialitate. Alama este folosită la construcția înfășurărilor în colivie și a bornelor.

Colectoarele și inelele colectoare constituie subansamble ce permit împreună cu periile accesul la circuitele mobile și racordarea acestora la borne fixe. Periile sunt realizate din material conductor în general pe bază de grafit, care asigură frecări și uzuri mai reduse. La trecerea curentului prin contactul alunecător perie-colector, are loc o cădere de tensiune  $\Delta U$ , care se repartizează în lungul periei și pe suprafața de contact. Cea mai mare parte a căderii de tensiune este repartizată la contactul perie-colector. La mașini de c.c. obișnuite se utilizează perii din cărbune electrografitizat cu  $\Delta U = 1V$ , iar la cele de curent alternativ perii tari cu  $\Delta U = (1,2 - 1,5)V$ . Căderea de tensiune la contactul perie-colector depinde de calitatea perii. Periile utilizate în construcția mașinilor electrice sunt realizate din cărbune grafitizat în diferite proporții.

În construcția **circuitului magnetic** al transformatoarelor și mașinilor electrice se folosesc materiale feromagnetice: oțelul electrotehnic și magneții permanenți. Oțelul electrotehnic cu un conținut redus de carbon, sub 0,1%, se folosește sub formă masivă sau sub formă de tablă de 0,1...2 mm grosime. Oțelul masiv prelucrat prin forjare sau laminare se folosește în construcția polilor inductori masivi și a jugurilor în care câmpul magne-

tic principal este constant. În construcția miezului feromagnetic pentru mașinile electrice de puteri medii și mari se folosesc tole din oțel electrotehnic normal aliat de 0,5 mm grosime, laminate la cald sau la rece.

Pentru construcția mașinilor electrice mici se folosește tola de 0,5 mm grosime din oțel electrotehnic slab aliat cu (0,4...8%), iar pentru construcția mașinilor speciale de înaltă frecvență se folosește tola de 0,2 mm grosime.

În construcția transformatoarelor electrice se folosește tola din oțel electrotehnic puternic aliată (2,9...3,4 % Si) de 0,35 mm grosime, laminată la rece. Pentru aceste tole se garantează valorile pierderilor la 50 Hz corespunzătoare inducțiilor de 1T și 1.7T ( $p_{10/50}$  și  $p_{17/50}$ ), iar pentru mașinile rotative se garantează pierderile  $p_{10/50}$  și  $p_{15/50}$  corespunzătoare inducțiilor de 1T și 1,5T.

Pentru realizarea polilor inductori de la mașinile de curent continuu și mașinile sincrone cu poli aparenti se utilizează, din considerente tehnologice, tablă silicioasă de 1-2 mm grosime slab aliată.

La miezurile confecționate din tole se folosește ca element caracteristic *factorul de umplere*  $k_{Fe} < 1$ , care reprezintă raportul dintre lungimea totală efectivă a fierului din pachetul de tole și lungimea totală geometrică a pachetului de tole și a cărui valoare depinde de grosimea tolelor.

Pentru construcția polilor din magneți permanenți se folosesc materiale magnetice dure, caracterizate printr-o valoare mare a câmpului coercitiv, sau materiale cu ciclul de histererezis cu suprafața mărită pentru construcția motoarelor cu histerezis.

Caracteristicile fizice ale materialelor active influențează pierderile electrice, încălzirea și randamentul unei mașini. În plus aceste materiale sunt solicitate din punct de vedere mecanic, deci trebuie să aibă proprietăți corespunzătoare.

## 1.2.2. MATERIALE ELECTROIZOLANTE

Materialele electroizolante folosite în construcția mașinilor și transformatoarelor trebuie să îndeplinească mai multe condiții: conductivitate termică ridicată, rigiditate dielectrică mare, bune proprietăți mecanice și de prelucrare, să fie stabile din punct de vedere chimic și să corespundă condițiilor de funcționare. Acest lucru se datorează faptului că materialele electroizolante utilizate în construcția transformatoarelor și mașinilor electrice sunt solicitate electric, termic și mecanic. În cazul înfășurărilor realizate din conductoare, este necesară izolație între conductoare și față de miezul feromagnetic.

O caracteristică a materialului electroizolant o constituie temperatura la care mașina poate funcționa timp îndelungat fără a se produce modificarea caracteristicilor electrice și mecanice, numită temperatură admisibilă, funcție de care se definesc clasele de izolație:

- **Clasa Y** cuprinde: bumbac, hârtie, cauciuc natural, fire de celuloză, carton electrotehnic, clorură de polivinil și are limita de temperatură 90°C.
- **Clasa A** cuprinde materiale din clasa Y impregnate într-un lac pe bază de rășini naturale, în uleiuri sau lacuri poliamidice și are limita de temperatură 105°C.
- **Clasa E** cuprinde emailuri, rășini de turnare epoxidice, poliesterice, mase bituminoase, alte materiale sintetice și are temperatura limită 120°C.
- **Clasa B** cuprinde: materiale electroizolante fabricate pe bază de mică, aspect, mătase de sticlă, folosindu-se ca lianți și mase de compundare, lacuri organice, rășini termostabile, mase plastice cu rășini sintetice și are temperatura limită 130°C.
- **Clasa F** cuprinde materiale confecționate pe bază de mică, asbest, rășini sintetice, lianți și mase de compundare pe bază de siliconi. Nu se pot folosi materiale pe bază de celuloză sau mătase. Limita de temperatură admisă este 155°C.
- **Clasa H** cuprinde materiale neorganice (mică, asbest, sticlă, având ca masă de legătură substanțe pe bază de siliconi, rășini sintetice și are limita de temperatură 180°C.
- **Clasa C** cuprinde materiale din mică, mătase din sticlă, ceramică cu lianți și mase de umplere și durificare sintetică cu limita de temperatură de 180°C.

Prin materialele electroizolante se transmite căldura de la părțile active ale mașinii la agentul de răcire; dacă sunt supuse la încălziri peste limita admisă de clasa de izolație, materialele electroizolante își modifică în timp caracteristicile electrice și mecanice prin fenomenul de *îmbătrânire termică*. O mărire a temperaturii de funcționare cu 8°C la clasa de izolație A, cu 10°C la clasa B și cu 12°C la clasa H reduce durata de viață la jumătate.

Caracteristicile fizice ale materialelor electroizolante determină fiabilitatea și durata de viață a transformatoarelor și mașinilor.

La mașinile electrice moderne se realizează utilizarea maximă a materialelor din toate punctele de vedere, deci și izolația lucrează aproape de temperatura limită admisibilă. Un rol însemnat în reducerea încălzirii, deci în îmbunătățirea utilizării materialelor îl are sistemul de răcire adoptat și eficiența lui.

### **1.2.3. MATERIALE CONSTRUCTIVE**

Materialele constructive care se utilizează în construcția transformatoarelor și mașinilor electrice sunt: oțelul, fonta, oțelul nemagnetic, aliaje de aluminiu, materiale izolante sub formă de plăci și benzi. Toate aceste materiale servesc la confecționarea carcasei și scuturilor, lagărelor și axului, ventilatorului, pieselor de consolidare și susținere, plăcuții indicatoare, cutiei de borne etc. Geometria pieselor este determinată de solicitările mecanice la care sunt supuse în timpul funcționării. Unele din materialele constructive au și un rol activ în funcționare (carcasa mașinii de curent continuu face parte din circuitul magnetic); în acest scop, materialele folosite trebuie să aibă proprietăți mecanice și magnetice deosebite.