

Forțele de Interacțiune Dintre Părțile Frontale ale Înfășurărilor Mașinilor Electrice

Ambros Tudor¹, Burduniuc Marcel²

¹ Universitatea Tehnică a Moldovei/Facultatea Energetică și Inginerie Electrică, Chișinău, Republica Moldova, tudoramros@gmail.com

² Universitatea Tehnică a Moldovei/Facultatea Energetică și Inginerie Electrică, Chișinău, Republica Moldova, marcburduniuc@gmail.com

Abstract — materialul izolant este cauza defectelor frecvente în mașinile electrice, provocând ieșirea din funcție a acestora. În lucrare se accentuează faptul că materialul izolant poate fi defectat în procesul de pornire sau scurtcircuitare a mașinilor electrice, în zona de ieșire a conductorilor din creștături. Folosind metode moderne de cercetare a câmpului magnetic de dispersie, în baza anumitor ipoteze, s-a prezentat succesiunea calculului forțelor de interacțiune a părților frontale ale mașinilor electrice. Metoda elementului finit, aplicată în calculul acestor forțe, dă posibilitate de a preciza aceste forțe în vederea asigurării unei fiabilități ridicate a mașinilor electrice.

Keywords — material izolant; câmp magnetic; dispersie; părți frontale; fiabilitate, forțe de interacțiune

I. INTRODUCERE

Fiabilitatea și termenul de „viață” a mașinilor electrice (ME) în cea mai mare măsură depinde de starea și protejarea materialului izolant, acesta fiind cel mai sensibil la modificarea bruscă a proceselor electromagnetice și termice.

Procesele electromagnetice tranzitorii, în comparație cu cele termice, se desfășoară mai rapid, deoarece constanta de timp constituie zecimi sau chiar sutimi de secundă. Aceste procese provoacă curenți și forțe de interacțiune electromagnetică capabile să defecteze sau să distrugă în primul rând materialul izolant al înfășurărilor atât statorice cât și rotorice. Din aceste considerente la etapa proiectării și reparației ME se i-au măsuri de a preîntâmpina sau a limita acțiunea acestor forțe.

Elementul cel mai vulnerabil este partea frontală a înfășurărilor statorice și rotorice. Asupra părților frontale a înfășurării rotorului bobinat al ME la turații ridicate acționează forțe centrifuge, care le împing spre părțile frontale ale înfășurării statorice. În acest scop, pentru a compensa aceste forțe, sunt prevăzute bandaje și alte dispozitive. La pornire rotorul este nemișcat, forțele centrifuge sunt nule, însă în acest caz datorită curenților mari apar forțe de caracter electromagnetic dintre părțile frontale ale înfășurărilor statorice și rotorice [1, 2, 3].

Calculul acestor forțe este complicat deoarece câmpul magnetic, care determină aceste forțe, este tridimensional.

Până în prezent calculul câmpului magnetic de dispersie produs de curenții părților frontale, de exemplu pentru determinarea reactanțelor de dispersie ale ME asincrone și sincrone, este realizat aproximativ pe cale empirică. Precizarea acestor fluxuri de dispersie și forțe pot fi realizate prin metode moderne.

Aplicarea tehnicii de calcul face posibilă determinarea câmpului magnetic tridimensional și a forțelor respective, dar aceasta necesită timp pentru elaborarea modelului.

II. FORȚELE DE ACȚIUNE DINTRE PĂRȚILE FRONTALE ALE ÎNFĂȘURĂRILOR

În lucrare se propune metoda de calcul a fluxurilor de dispersie și a forțelor electromagnetice menționate folosind aplicația FEMM în sistemul bidimensional.

Ca exemplu se ia un motor asincron trifazat cu rotorul bobinat cu părțile frontale ale înfășurărilor rotorice și statorice aranjate în două etaje (fig. 1 a, b).

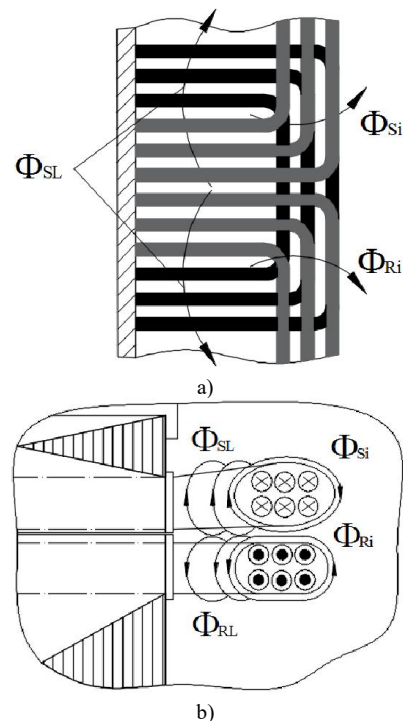


Fig.1. Părțile frontale ale înfășurărilor

Fluxurile de dispersie Φ_{SL} și Φ_{RL} cuprind părțile frontale ale conductorilor paraleli ieșiți din creștăturile statorului și rotorului [3]. Fluxurile de dispersie Φ_{Si} și Φ_{Ri} cuprind conductorii părților frontale paraleli cu pachetele statorice și rotorice, care formează două inele din ambele părți ale pachetelor.

Analiza câmpului magnetic de dispersie și forțele electromagnetice de interacțiune dintre înfășurări se realizează fiind adoptate ipotezele date în continuare:

- capetele părților frontale liniare L_{SL} (fig. 2, a) ieșite din creștături sunt paralele între ele și cu cele analoge a înfășurării rotorului L_{RL} ;
- capetele L_{SA} și L_{RA} ale părților frontale în formă de arc ale înfășurării statorice și rotorice formează două inele concentrice, aflate în planul perpendicular

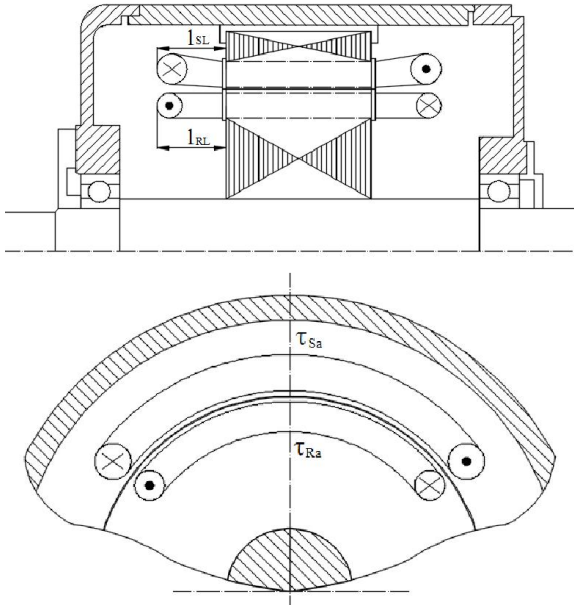


Fig. 2. Fragmente de motor asincron cu rotor bobinat desfășurat în plan.

axului motorului (fig. 2, b);

- suprafețele crestate ale statorului și rotorului sunt aduse la suprafețe netede aplicând principiul Karter.

Pentru simplificarea analizei forțele de interacțiune dintre părțile frontale ale înfășurărilor se divizează în următoarele:

- forțele de interacțiune dintre inelele formate de capetele înfășurărilor orientate după pasul polar F_{Si} și F_{Ri} (fig. 3, a);
- forțele de interacțiune dintre părțile liniare ieșite din creștături F_{SL} și F_{RL} (fig. 3, b);
- forțele de interacțiune dintre părțile frontale inelare ale înfășurărilor paralele cu pachetele statoric și rotorice F_{SP} și F_{RP} (fig. 3, c).

Modelul fizic prezentat în figura 2, a, b este transformat în trei fragmente corespunzătoare prezentate în figura 3, a, b, c.

A. Calculul Forțelor Inelare

Pentru a determina forța de interacțiune dintre inelele statorice și rotorice se calculează inducția magnetică produsă de curentul statoric I_{Si} la distanța $\frac{D_{SL} - D_{RL}}{2}$, unde este poziționat inelul rotorice prin care se închide curentul rotorice I_{Ri} (fig. 3, a).

Forța aplicată elementului inelului rotorice τ_{Ra} poate fi determinată cu expresia [4].

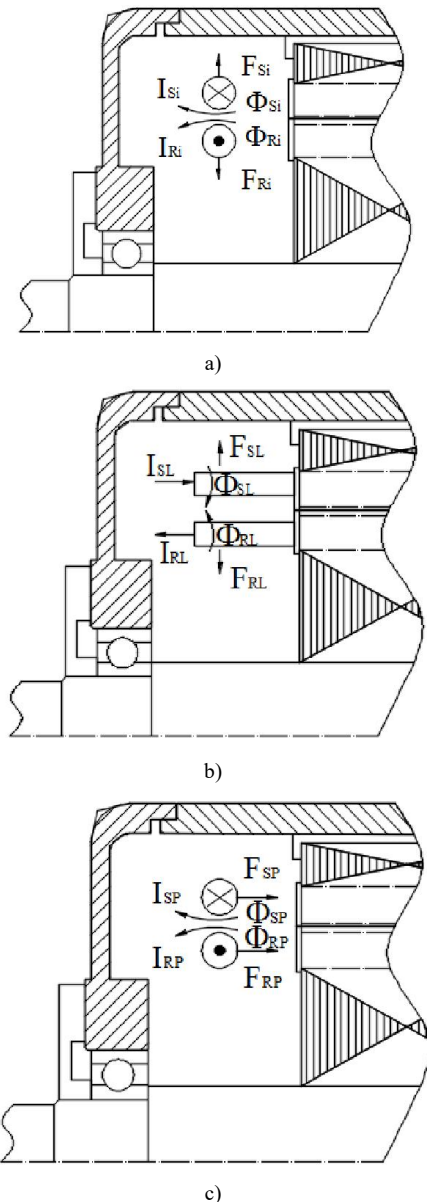


Fig. 3. Fragmente de motor asincron cu rotorul bobinat desfășurat în plan.

- a) forțele de interacțiune inelare F_i ;
- b) forțele de interacțiune a ieșirilor liniare F_L ;
- c) forțele de interacțiune dintre inele și pachete F_p .

$$F_{Ri} = I_{Ri} \cdot B_{Si} \cdot \tau_{Ra}, \quad (1)$$

iar

$$B_{Si} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \frac{I_{Si}}{2\pi \cdot R}, \quad (2)$$

unde

$$\begin{aligned} \tau_{Ra} &= \frac{\pi \cdot D_{RL}}{2\pi} \cdot k_y, & R &= \frac{D_{SL} - D_{RL}}{2}, & D_{SL} &= D + h_{c1}, \\ I_{Sa} &= \frac{\pi \cdot D_{SL}}{2\pi} \cdot \beta, & D_{RL} &= D - h_{c2}, & I_{Ra} &= \frac{\pi \cdot D_{RL}}{2\pi}, \\ D_v &= D - h_{c2} - h_{j2}. \end{aligned}$$

B. Calculul Forțelor pe Sectoarele Liniare

Forțele de interacțiune F_{SL} și F_{RL} ale părților frontale liniare se determină de asemenea cu expresiile (1) și (2).

C. Calculul Forțelor Dintre Părțile Frontale Inelare și Pachetele Statorice și Rotorice

Anterior s-a menționat că părțile frontale ale înfășurării statorice și rotorice sunt atrase, prin intermediul fluxurilor de dispersie, de forțele F_{SP} și F_{RP} spre pachetele feromagnetice corespunzătoare. Pentru determinarea acestor forțe se aplică metoda imaginilor [4].

Curenții închiși prin părțile frontale inelare aflate în aer interacționează cu pachetele statorice și rotorice. Aceste forțe se calculează cu expresia

$$F_{SP} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_{Si}^2 \cdot \left(\frac{\mu-1}{\mu+1} \right) \cdot \frac{1}{2L_{SL}}, \quad (3)$$

unde μ – permeabilitatea magnetică a pachetului statoric, iar L_{SL} – distanța dintre inele și pachetul statoric (fig. 2, a).

Similar se determină și forța de acțiune dintre inelul părții frontale a înfășurării rotorice și pachetul rotorice

$$F_{RP} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_{Ri}^2 \cdot \left(\frac{\mu-1}{\mu+1} \right) \cdot \frac{1}{2L_{RL}}. \quad (4)$$

Pentru pachetele statorice și rotorice permeabilitatea feromagnetice este mult mai mare ca unitatea, astfel

$$F'_{SP} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_{Si}^2 \cdot \frac{1}{2L_{SL}}, \quad (5)$$

$$F'_{RP} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_{Ri}^2 \cdot \frac{1}{2L_{RL}}. \quad (6)$$

D. Calculul Forței Sumare

Forța totală de interacțiune dintre părțile frontale a înfășurării statorice și pachetul statoric se determină cu expresia

$$\bar{F}_{St} = \bar{F}_{Si} + \bar{F}_{SL} + \bar{F}_{SP}. \quad (7)$$

Deoarece forțele aplicate părților frontale F_{Si} și F_{SL} acționează paralel pachetului statoric, atunci

$$\bar{F}_{St} = (\bar{F}_{Si} + \bar{F}_{SL}) + \bar{F}_{SP}, \quad (8)$$

sau

$$F_{St} = \sqrt{(F_{Si} + F_{SL})^2 + F_{SP}^2}. \quad (9)$$

Forța de interacțiune asupra părților frontale ale înfășurării rotorice se determină folosind aceeași metodă.

În expresiile folosite pentru calculul fluxurilor de dispersie și a forțelor de interacțiune electromagnetică permeabilitatea magnetică este dificil de determinat. Aceasta se explică prin faptul că căile geometrice de închidere a fluxurilor de dispersie sunt complicate, iar sectoarele acestor căi au permeabilitate diferită. În acest context, pentru determinarea forțelor, poate fi utilizată metoda elementelor finite.

III. APLICAREA FEMM LA CALCULUL FORȚELOR

Pentru a realiza această metodă de calcul este folosită aplicația FEMM și unele aspecte prezentate în [5, 6].

La prima etapă se elaborează modelul fizic geometric al obiectului în studiu. În cazul dat este utilizat modelul fizic al motorului asincron cu rotorul bobinat (fig. 2, a, b). Conform ipotezelor și simplificărilor adoptate se folosesc aceleași segmente ale modelului (fig. 3, a, b, c).

Se ridică valorile fluxului de dispersie și a inducției magnetice din secțiunea A (fig. 4). Curentul statoric I_{Si} se calculează conform [5], curentul în înfășurarea rotorică fiind egal cu zero.

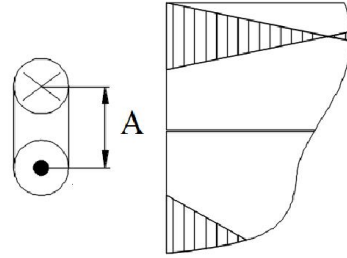


Fig. 4. Determinarea valorii inducției B_{Si} .

Forța de interacțiune dintre inducția magnetică B_{Si} , produsă de curentul înfășurării statorice închis prin inelele părților frontale și curentul rotorice I_{Ri} se determină cu expresia

$$F_{Si} = I_{Ri} \cdot B_{Si} \cdot \tau_{yS}, \quad (10)$$

unde valoarea B_{Si} corespunde secțiunii A, iar I_{Ri} se calculează conform [7].

Analogic se calculează forța de interacțiune dintre inducția magnetică B_{Ri} , produsă de curentul înfășurării rotorice închis prin inelele părților frontale și curentul statoric I_{Si}

$$F_{Ri} = I_{Si} \cdot B_{Ri} \cdot \tau_{yR}. \quad (11)$$

Forțele F_{SL} și F_{RL} se determină cu expresiile (1) și (2). Valorile fluxurilor de dispersie și inducțiilor magnetice respective B_{SL} și B_{RL} se i-au din secțiunile B și C (fig. 5). Curenții închiși prin părțile frontale liniare se calculează conform indicațiilor din [7].

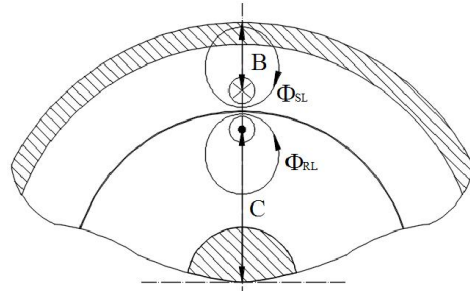


Fig. 5. Determinarea valorilor B_{SL} și B_{RL} .

Anterior s-a menționat că forțele de interacțiune dintre părțile frontale inelare ale înfășurării statorice și rotorice se calculează cu aplicația metodei imaginilor [4]. Forța aplicată părților frontale ale înfășurării statorice (fig. 6) se determină cu expresia

$$F_{SP} = I_{SP} \cdot B_{SP} \cdot \tau_{yS}, \quad (12) \quad \text{unde}$$

unde

$$B_{SP} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_{SP}^2 \cdot \left(\frac{\mu-1}{\mu+1} \right) \cdot \frac{1}{2a}. \quad (13)$$

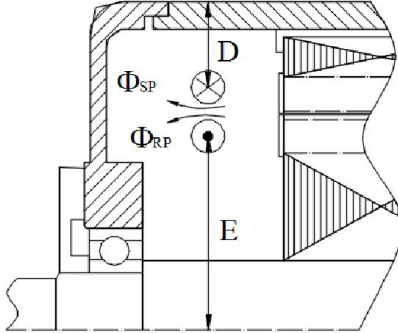


Fig. 6. Determinarea valorilor B_{SP} și B_{RP} .

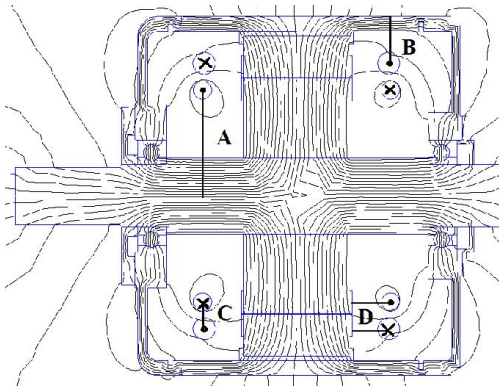


Fig. 7. Tabloul câmpurilor de dispersie ale părților frontale a înfășurărilor

La fel se determină și forța aplicată părților frontale ale înfășurării rotorice

$$F_{RP} = I_{RP} \cdot B_{RP} \cdot \tau_{yR}, \quad (14)$$

$$B_{RP} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_{RP}^2 \cdot \left(\frac{\mu-1}{\mu+1} \right) \cdot \frac{1}{2a}. \quad (15)$$

În figura 7 este prezentat tabloul câmpurilor magnetice de dispersie a părților frontale ale înfășurărilor statorice și rotorice. În aceeași figură sunt indicate secțiunile A, B, C, D prin care se închid fluxurile de dispersie respective.

CONCLUZII

S-a constatat că forțele de interacțiune dintre părțile frontale ale înfășurărilor mașinilor electrice produse de curenți influențează asupra fiabilității izolației.

Ipotezele adoptate au dat posibilitatea de a simplifica determinarea forțelor de interacțiune dintre părțile frontale.

La determinarea forțelor de acțiune asupra materialului izolant s-a aplicat programul FEMM bazat pe teoria elementelor finite.

Pentru efectuarea calculului s-au divizat forțele de interacțiune electromagnetică pe componente.

Rezultatele obținute pot fi folosite pentru elaborarea dispozitivelor respective în vederea compensării acestor forțe.

BIBLIOGRAFIE

- [1] A. I. Voldek, *Electrică și mașini*. Energhia, Leningrad, 1974.
- [2] *Utilizarea seriei asinronit de mașini*. Interelectro, Energhizdat, Moscva, 1990.
- [3] *Asinronit de mașini obșego naznacenia*. Energhia, Moscva, 1980.
- [4] K. J. Binns, P. J. Lawrenson "Analysis and computation of electric and magnetic field problems", *Oxford*, pp. 51-56, pp. 72-75, 1963.
- [5] T. Ambros, *Convertizoare electrice și electromecanice speciale*. Ed. Tehnica-Info, Chișinău, 2008, ISBN 978-9975-910-95-8, p.288.
- [6] A. Simion ș.a. "Novel core design for improving performance of the induction machines" *Buletinul AGIR nr. 4/2011, Anul XVI, ISSN 1224-7928*, pp. 23-26.
- [7] T. Ambros, M. Burduniuc, N. Ursatii, "Fluxes and dispersion reactances of the asynchronous machine". *Proceedings of the 8th International Conference on Electromechanical and Power Systems. SIELMEN'2011, October 13-15 2011 Chișinău*, p. 414-419. ISBN: 978-606-520-623-6.