

# **Bobinaje trifazate întrun singur strat cu poli comutabili în raportul 4:6 pentru motoare asincrone**

## **Three phase single-layer windings with pole changing in the ratio 4:6 for induction motors**

MIHAIL V. CISTELECAN, MIHAIL POPESCU, IOAN DĂNUȚ COSTEA-MARCU<sup>1</sup>  
ICPE-ME (Institutul de Cercetări pentru Mașini Electrice) București

### **1. Introducere**

Metoda de reglare a vitezei motoarelor asincrone prin schimbarea numărului de poli permite o modificare în trepte a vitezei de rotație în cazul existenței unei înfășurări care, parcursă de curenți, să creeze tensiuni magnetice de polarități diferite în funcție de conexiunea terminalelor. Bobinele existente în înfășurările de fază ale motorului sunt utilizate în totalitate în ambele conexiuni, fiind schimbate doar sensurile curenților în unele porțiuni ale înfășurării. Înfășurările cu poli comutabili cunoscute pînă în prezent în raportul 4:6 sunt realizate cu bobine în două straturi și au la bază două concepții constructive complet distincte după cum urmează:

-înfășurările dezvoltate în sistemul PAM (Pole Amplitude Modulation), avînd la bază cercetările lui Rawcliffe [1] începînd cu 1958, materializate în brevete de invenție, la care o parte din bobinele fiecărei faze se comută schimbîndu-și sensul curentului, bobinele rămînînd în aceeași fază pentru fiecare din cele două turații. Înfășurarea este prevăzută cu 6 terminale iar în schemele de alimentare este necesară o conexiune suplimentară (o scurtcircuitare a trei terminale) în afara comutării alimentării la cele trei faze ale rețelei [2]

-înfășurările dezvoltate de Auinger (Siemens) și breveteate în Germania și SUA [3, 4], avînd la bază sistemul denumit PPM (Pole Phase Modulation) la care bobinele unei faze într-o anumită conexiune (turație) pot trece în altă fază la cealaltă conexiune (turație). Avantajul principal al acestui sistem se referă la faptul că cele șase terminale sunt independente și se alimentează la rețea independent, fără condiționări suplimentare pentru cele două turații. O caracteristică principală a sistemului PPM se bazează pe faptul că la una dintre turații există trei bobine care nu produc efecte magnetice dar nici nu deranjează cîmpul celorlalte [4].

Deși avantajul utilizării înfășurărilor în două straturi este recunoscut în principiu pentru posibilitatea de a modela mai bine forma de undă a tensiunii magnetice rezultante din întrefier, dezavantajele legate de coeficientul de umplere mai mic al creștăturilor, cantitatea mai mare de materiale izolante și dificultățile bobinării automate ridică problema de principiu a realizării acestora întrun singur strat. Cu toate că în mediul bobinatorilor și reparatorilor de motoare electrice se vehiculează ideea că motoarele cu două turații într-un strat au probleme de pornire cel puțin pe o turație (chestiune verificabilă la schemele Dahlander în raportul 2:1), în lucrare se va arăta că aceste motoare se pot realiza cu bobinaje într-un strat, cu performanțe de pornire suficiente, cel puțin pentru raportul de turații 2:3 (număr de poli 4:6), pentru care sunt prezentate soluții constructive și rezultate experimentale pertinente.

### **2. Analiza tensiunii magnetice din întrefier**

La baza analizei și sintezei înfășurărilor cu poli comutabili, la care problema armonicilor spațiale ale tensiunii magnetice din întrefier este esențială, trebuie să stea metode evolute bazate pe analiza Fourier a solenației din creștături. O asemenea metodă a fost elaborată în [5] și se bazează pe suprapunerea efectelor curenților din toate creștăturile statorului cu considerarea apartenenței acestora la cele trei faze ale mașinii. Tensiunea magnetică produsă în întrefier de curentul ce parcurge bobinele unei faze poate fi obținută prin considerarea unei analize de tip Fourier a solenației existente în creștăturile aferente acestei faze. Astfel [5], dacă se notează cu  $K_A$  mulțimea

<sup>1</sup> Informații despre autori se găsesc la sfîrșitul lucrării împreună cu un rezumat scurt în româna și engleză.

În materie de scriere "ortopedică", unele probleme legate de recentele niciun nicio întrun întro și \*\*tui sunt pręcis scapate de sub control, lucru pentru care autorii își cer scuze anticipat

crestăturilor în care o fază (pentru exemplificare faza A) are conductoare, cu  $\theta_k$  coordonata spațială (în raport cu o origine arbitrară prestabilită) a unei crestături notată cu indicele  $k$ , cu  $N_{ck}$  numărul de conductoare din crestătura  $k$ , cu  $w$  numărul total de spire înseriate pe fază și cu  $k_{wvA}$  factorul de înfășurare al armonicii spațiale de ordin  $v$ , cu  $c$  numărul de căi de curent în paralel și cu  $\varphi_{vA}$  faza spațială a armonicii  $v$ , următoarele relații sunt demonstrate:

$$k_{wvA} = \frac{1}{2cw} \sqrt{\left( \sum_{k \in \{K_A\}} N_{ck} \cos v\theta_k \right)^2 + \left( \sum_{k \in \{K_A\}} N_{ck} \sin v\theta_k \right)^2}; \quad \varphi_{vA} = \frac{1}{v} \operatorname{arctg} \frac{\sum_{k \in \{K_A\}} N_{ck} \sin v\theta_k}{\sum_{k \in \{K_A\}} N_{ck} \cos v\theta_k} \quad (1)$$

Numărul de conductoare  $N_{ck}$  include și semnul ( $\pm$ ) care ține seama dacă conductorul se află în latura de *ducere* sau de *întoarcere* a bobinei. Cu notațiile de mai sus, dacă  $I_A$  este curentul efectiv care parcurge faza A, tensiunea magnetică din întrefierul mașinii corespunzătoare fazei A va fi [9]:

$$F_A(\theta, t) = \frac{2wI_A \sqrt{2} \sin \omega t}{\pi} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{k_{wv}}{v} \sin(v\theta - \varphi_{vA}) \quad (2)$$

Ținând seama că cele trei înfășurări ale mașinii sunt parcurse în general de un sistem trifazat simetric de curenți (se neglijează nesimetria indusă de însăși o eventuală nesimetrie structurală de amplasare spațială a înfășurărilor), tensiunea magnetică rezultantă ca urmare a suprapunerii celor trei tensiuni magnetice de fază este o suma de unde directe și inverse după cum urmează:

$$F_{rez}(\theta, t) = \frac{3wI \sqrt{2}}{\pi} \sum_{v=1}^{\infty} \left[ \frac{k_{wdv}}{v} \sin(v\theta - \omega t) + \frac{k_{wiv}}{v} \sin(v\theta + \omega t) \right] \quad (3)$$

Coefficienții  $k_{wdv}$ ,  $k_{wiv}$  care caracterizează amplitudinea undelor directe, respectiv inverse ale tensiunii magnetice din întrefier sunt exprimabili în raport cu elementele de fază și sunt definiți în sistemul de referință ai factorilor de înfășurare prin relațiile:

$$k_{wdv} = \frac{2}{3} \sqrt{C_{1v}^2 + C_{2v}^2}; \quad k_{wiv} = \frac{2}{3} \sqrt{D_{1v}^2 + D_{2v}^2} \quad (4)$$

$$C_{1v} = \frac{1}{2} [k_{wAv} \cos \varphi_{A} + k_{wBv} \cos(\varphi_B + \frac{2\pi}{3}) + k_{wGv} \cos(\varphi_C - \frac{2\pi}{3})]; C_{2v} = -\frac{1}{2} [k_{wAv} \sin \varphi_{A} + k_{wBv} \sin(\varphi_B + \frac{2\pi}{3}) + k_{wGv} \sin(\varphi_C - \frac{2\pi}{3})]$$

$$D_{1v} = \frac{1}{2} [k_{wAv} \cos \varphi_{A} + k_{wBv} \cos(\varphi_B - \frac{2\pi}{3}) + k_{wGv} \cos(\varphi_C + \frac{2\pi}{3})]; D_{2v} = -\frac{1}{2} [k_{wAv} \sin \varphi_{A} + k_{wBv} \sin(\varphi_B - \frac{2\pi}{3}) + k_{wGv} \sin(\varphi_C + \frac{2\pi}{3})]$$

În cazul cel mai general analiza bazată pe relațiile (1-4) trebuie făcută în sistemul coordonatelor unghiulare geometrice și doar în cazuri particulare, când există periodicitate structurală la o pereche de poli, se poate simplifica analiza considerând sistemul de referință al unghiurilor electrice. Corespunzător, rezultatele analizei pun în evidență factorii de înfășurare în sistemul geometric și, prin transpunerea lor în sistemul electric pot rezulta, în anumite situații, așa numite armonice *fracționare*, inclusiv *subarmonice*. În urma analizei rezultă prin coeficienții  $k_{wdv}$ ,  $k_{wiv}$  mărimea tensiunilor magnetice învîrtoare ca unde directe, respectiv inverse, în baza cărora se poate aprecia calitatea unei soluții tehnice de bobinaj.

O performanță sintetică interesantă a unei soluții de înfășurare trifazată este coeficientul reactanței de scăpări diferențiale. În cazul cel mai general al mașinilor nesimetrice, în care coexistă unde directe și inverse de amplitudini diferite în general, este demonstrat [5] că coeficientul reactanței diferențiale, calculat pe baza metodei energetice [6] conține, în afara unui termen constant, un termen variabil cu frecvență dublă frecvenței fundamentale:

$$\tau_d = \left( \frac{p}{k_{wp}} \right)^2 \sum_{v \neq p} \left[ \left( \frac{k_{wdv}}{v} \right)^2 + \left( \frac{k_{wiv}}{v} \right)^2 + 2 \frac{k_{wdv} k_{wiv}}{v^2} \cos 2\omega t \right] = \tau_{dc} + \tau_{dv} \cos 2\omega t \quad (5)$$

Pentru toate înfășurările simetrice spațial, pentru care nu există decît unde *pure*, se poate constata prin calcul direct că termenul din (5) variabil cu timpul reprezintă o serie convergentă la zero; termenul constant ( $\tau_{dc}$ ) reprezintă chiar coeficientul scăpărilor diferențiale așa cum este cunoscut

din literatură [6, p.43; 7, p.143; 8, p.137 ] și rezultatele de calcul pentru cazuri cunoscute converg către cele existente în îndrumările de proiectare ale mașinilor de curent alternativ. În cazul infășurarilor cu nesimetrii constructive coeficientul care dă variația în timp  $\tau_{dV}$  este diferit de zero și exprimă o limitare esențială în caracterizarea mașinilor electrice nesimetrice prin scheme electrice echivalente cu coeficienți constanți.

### 3. Analiză de caz: bobinaje cu 4/6 poli la 36 de crestături

După cum este cunoscut din literatură [9] există limitări importante în realizarea de înfășurări într-un strat în afara celor regulate cu pas diametral. În cazul înfășurărilor cu poli comutabili, la care pasul bobinelor trebuie adaptat la valori intermediare celor două turații pentru care se face proiectarea, există puține soluții de înfășurări într-un strat și ele trebuie studiate de la caz la caz din punct de vedere al performanțelor. Pentru cazul în speță de înfășurări cu poli comutabili în raportul 4:6 se vor dezvolta două soluții constructive pentru care se vor prezenta și rezultatele de analiză a caracteristicilor funcționale.

#### 3.1 Structura înfășurării în varianta constructivă I

În figura 1 este prezentată o primă soluție constructivă (36 crestături, 4/6 poli), înfășurarea trifazată fiind constituită din trei înfășurări de fază nesimetrice. Fiecare înfășurare de fază conține două căi de curent în paralel cu câte trei bobine înseriate. De exemplu înfășurarea U are începutul marcat  $U_4$  și se derivă în două căi de curent, prima care are sfârșitul în X și a doua care are sfârșitul în  $U_6$ . Dacă fazele notate cu U și W au toate bobinele realizate cu pasul de 7 crestături, faza notată V are pe fiecare cale de curent două bobine cu pasul 6 crestături și una cu pasul 7 crestături. Din acest motiv tensiunile magnetice, atât din punct de vedere al armonicii fundamentale cât și al altor armonice spațiale, pot constitui sisteme trifazate nesimetrice.

Astfel, în tabelul 1 sunt prezentate rezultate de calcul pentru situația înfășurării din figura 1 conectată în varianta de 4 poli adică alimentarea pe terminalele  $U_4, V_4, W_4$  și legate împreună  $U_6, V_6, W_6$  pentru a dispune de două căi de curent în paralel. Deoarece nu există subarmonice, rezultatele din tabelul 1 sunt cele din sistemul de referință electric.

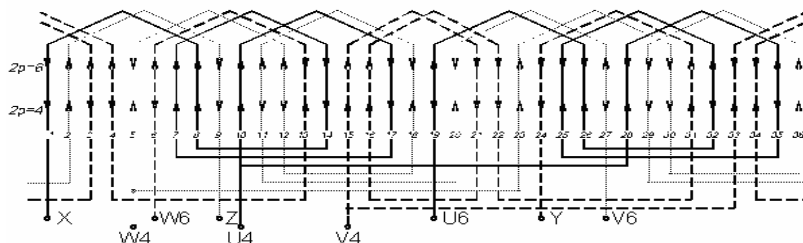


Figura 1. Varianta constructivă I cu înfășurări de fază nesimetrice

Așa cum se observă, fundamentală electrică ( $2p=4$ ) este nesimetrică, existînd o componentă directă cu amplitudinea (în sistemul de referință al factorilor de înfășurare a fazelor) de 0,8464 și o componentă inversă cu amplitudinea de 0,0103. Cimpul rotațional fundamental are deci un caracter eliptic, el avînd o amplitudine variabilă între 0,8567 (valoare maximă, cînd viteza de rotație este minimă) și 0,8361 (valoare minimă, cînd viteza de rotație este maximă). O caracteristică interesantă a înfășurării prezentate în figura 1 este faptul că toate armonicile spațiale superioare (pare sau impare) sunt nesimetrice, constituindu-se în *unde impure*, cu excepția celor de ordin multiplu de 3 care, spre deosebire de înfășurările regulate, sunt toate diferite de zero dar de valori suficient de mici pentru a nu deranja în funcționare. În tabelul 1 rezultatele de calcul sunt prezentate pînă la prima armonică de dantură care este armonică de ordin 17 în sistemul electric.

În figura 2 (a, b) sunt date reprezentările grafice ale tensiunii magnetice rezultante, fundamentală și diferențială pentru înfășurarea din figura 1 conectată în varianta de 4 poli. Se constată că unda rezultantă este suficient de "curată", coeficienții calculați pentru reactanța de scăpări diferențială fiind  $\tau_{dC} = 0.0371$  și  $\tau_{dV} = 0.0221$  (unda impură). Cele două momente de timp la care sunt date

reprezentările din figura 1 sunt alese aproximativ pentru valorile maximă, respectiv minimă ale fundamentalei electrice.

Tabelul 1. Rezultate de calcul al tensiunii magnetice, varianta constructivă I (4 poli)

Ordinul armonicii spațiale electrice v	$k_{wUv}$	$k_{wVv}$	$k_{wWv}$	$k_{wlv}$ (unda inversa)	$k_{wDv}$ (unda directa)	Observatii: toate armonicile spațiale sunt unde nesimetrice impure (co-există componente directe și inverse simultan)
1	-0.8287	0.8818	0.8287	<b>0.0103</b>	<b>0.8464</b>	Fundamentală electrică
2	0.2143	0.3283	-0.2143	0.1342	0.0248	Armonică pară impură
3	-0.1667	-0.1667	0.1667	0.1111	0.0556	Armonică $3k \neq 0$
4	-0.3283	-0.1140	0.3283	0.2056	0.1676	
5	0.1531	-0.4290	-0.1531	0.0933	0.2451	
6	0.2887	-0.2887	-0.2887	0.0962	0.1925	Armonică $3k \neq 0$
7	0.6756	0.4528	0.6756	0.0681	0.0803	
8	0.1140	0.2143	0.1140	0.0132	0.0582	
9	0.3333	-0.3333	0.3333	0.2222	0.2222	Armonică $3k \neq 0$
10	0.1140	0.2143	0.1140	0.0582	0.0132	
11	0.6756	0.4528	0.6756	0.0803	0.0681	
12	-0.2887	-0.2887	-0.2887	0.1925	0.0962	Armonică $3k \neq 0$
13	0.1531	-0.4290	-0.1531	0.2451	0.0933	
14	-0.3283	-0.1140	0.3283	0.1676	0.2056	
15	-0.1667	-0.1667	0.1667	0.0556	0.1111	Armonică $3k \neq 0$
16	0.2143	0.3283	-0.2143	0.0248	0.1342	
17	-0.8287	0.8818	0.8287	0.8464	0.0103	Prima armonică de dantură

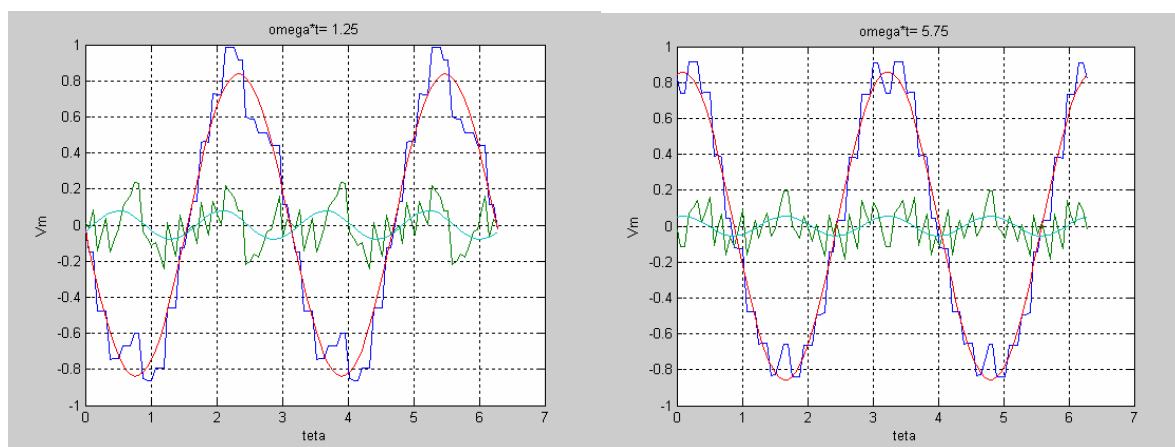


Figura 2 (a, b) Tensiunea magnetică rezultantă, 4 poli, varianta constructivă I ( $\tau_{dC} = 0.0371$ ;  $\tau_{dV} = 0.0221$ , undă nesimetrică)

Pentru situația în care schema din figura 1 se comută pentru funcționarea la 6 poli (alimentare pe la terminalele  $U_6, V_6, W_6$  și terminalele  $U_4, V_4, W_4$  lăsate libere), se obține o înfășurare simetrică din punct de vedere al fundamentalei electrice având factorul de înfășurare 0,72. Unda rezultantă conține o subarmonică (1) precum și o serie de armonice spațiale de ordin  $6k \pm 1$  impure (nesimetrice). Armonicile de ordin  $3k$  sunt unde pure, inclusiv fundamentala, cele de ordin 9, 27, etc., anulându-se. Având în vedere prezența subarmonicii geometrice, în tabelul 2 armonicile sunt prezentate în sistemul de referință geometric. Prima armonică spațială de dantură este armonică 33 (în sistemul electric de ordin 11).

În figura 3 (a, b) sunt reprezentate variațiile spațiale ale tensiunii magnetice pentru mașina de 6 poli pentru cele două momente de timp la care subarmonică nesimetrică are valorile maximă, respectiv minimă. Valoarea maximă a acestei subarmonică este triplul sumei componentelor directă și inversă

din tabelul 2 (0,575) iar valoarea minimă este triplul diferenței (0,054). Se constată caracterul “murdar” al tensiunii magnetice rezultante, îndeosebi atunci când subarmonica trece prin valoarea maximă, ceea ce se reflectă și în valori excesive ale coeficienților diferențiali ( $\tau_{dC}= 0.462$  și  $\tau_{dV}=0.1983$ ). Oricum mașina cu rotor în scurtcircuit funcționează în prezența acestei tensiuni magnetice deoarece colivia amortizează componentele diferite de cea fundamentală pe seama unor pierderi suplimentare în rotor care, măsurate la mersul în gol, deformează procedura de separare a pierderilor, avînd o dependență de tensiunea de fază diferită de cea pătratică.

Tabelul 2. Rezultate de calcul al tensiunii magnetice, varianta constructivă I (6 poli)

Ordinul armonicii spatiale geometrice $v$	$k_{wUv}$	$k_{wVv}$	$k_{wWv}$	$k_{wIv}$ (unda inversa)	$k_{wDv}$ (unda directa)	Observatii: unde mixte pure si impure [undele de rang $3(6k\pm 1)$ sunt pure, restul sunt impure; cele de rang $3k$ sunt nule in rezultantă]
1	0.3694	0.3832	0.0990	0.1048	0.0868	Fundamentala mecanica (impura)
3	-0.7200	-0.7200	0.7200	<b>0.0000</b>	<b>0.7200</b>	Fundamentala electrica (pura)
5	0.0150	-0.3035	-0.0561	0.1214	0.0868	
7	-0.1564	0.4072	-0.5836	0.3789	0.1048	
9	0.5270	0.5270	0.5270	0.0000	0.0000	Armonica electrica $v=3$
11	0.2721	0.2375	0.0729	0.0901	0.1214	
13	-0.6415	0.3607	0.1719	0.1931	0.3789	
15	0.1929	-0.1929	0.1929	0.1929	0.0000	Armonica “pura” inversa
17	0.1413	-0.2746	0.5275	0.1931	0.0901	
19	0.1413	-0.2746	0.5275	0.0901	0.1931	
21	0.1929	-0.1929	0.1929	0.0000	0.1929	Armonica “pura” directa
23	-0.6415	0.3607	0.1719	0.3789	0.1931	
25	0.2721	0.2375	0.0729	0.1214	0.0901	
27	0.5270	0.5270	0.5270	0.0000	0.0000	Armonica electrica $v=3k$
29	-0.1564	0.4072	-0.5836	0.1048	0.3789	
31	0.0150	-0.3035	-0.0561	0.0868	0.1214	
33	-0.7200	-0.7200	0.7200	0.7200	0.0000	Prima armonica de dantura (Z-p)

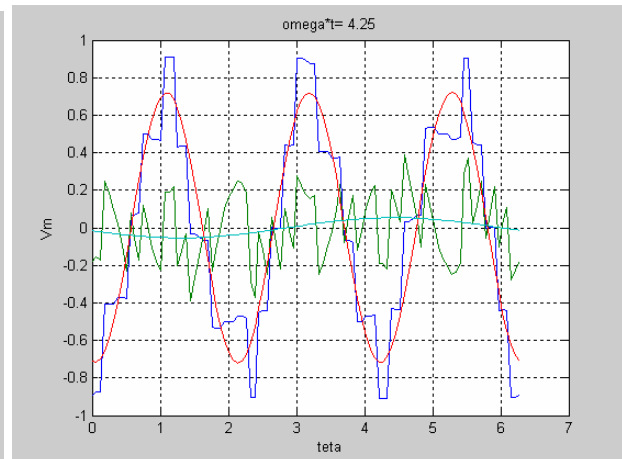
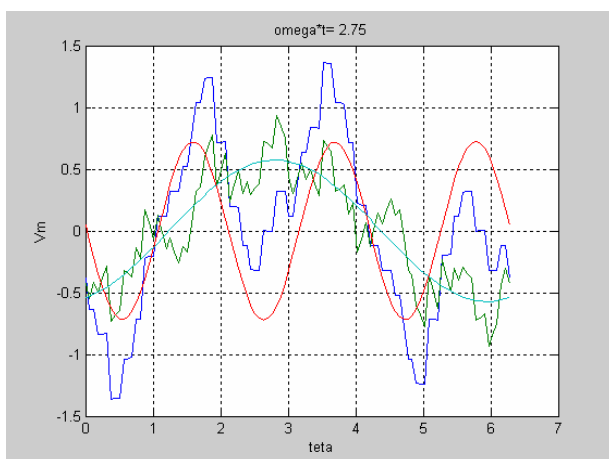


Figura 3 (a, b) Tensiunea magnetică rezultantă, 6 poli, varianta constructivă I ( $\tau_{dC}=0.4682$ ;  $\tau_{dV}=0.1983$ )

### 3.2 Structura înfășurării în varianta constructivă II

În figura 4 este prezentată a doua soluție constructivă analizată (36 crestături, 4/6 poli), înfășurarea fiind realizată din bobine egale, avînd deschiderea de 7 cretături, în lanț. Din punct de vedere al sistemului de conectare pentru comutarea de pe o turație pe cealaltă nu există deosebiri față de varianta anterioară. Analiza armonică realizată pentru cele două variante de comutate arată că din

punctul de vedere al înfășurării de 4 poli aceasta este perfect simetrică atât pe fundamentală, cât și pe toate armonicile spațiale existente. Așa cum se vede din tabelul 3 fundamentală are factorul de înfășurare 0,9019 și există armonicile spațiale „pure” atât de ordin par cât și impar cu excepția armonicilor de ordin  $3k$  care lipsesc. Coeficientul scăparilor diferențiale este pentru 4 poli  $\tau_{dC}=0.0233$  și  $\tau_{dV}=2.5947e-016$  (înfășurare simetrică).

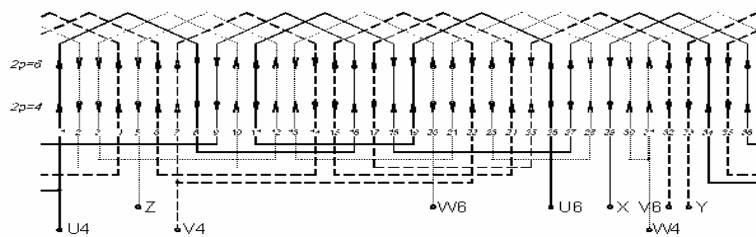


Figura 3. Varianta constructivă II. Înfășurare în lanț

Tabelul 3. Rezultate de calcul al tensiunii magnetice, varianta constructivă II (4 poli)

Ordinul armonicii spațiale electrice $v$	$k_{wAv}$	$k_{wBv}$	$k_{wCv}$	$k_{wDv}$ (unda directă)	$k_{wIv}$ (unda inversă)	Observatii: toate armonicile spațiale sunt unde pure (conțin doar componenta directă sau inversă, nu simultan)
1	0.9019	-0.9019	-0.9019	<b>0.9019</b>	<b>0.0000</b>	Fundamentală electrică
2	-0.1140	-0.1140	0.1140	0.0000	0.1140	Armonică para pură
3	0.3333	0.3333	0.3333	0.0000	0.0000	Armonică $3k=0$
4	-0.2143	-0.2143	0.2143	0.2143	0.0000	
5	-0.0378	0.0378	0.0378	0.0000	0.0378	
6	0.5774	0.5774	0.5774	0.0000	0.0000	Armonică $3k=0$
7	0.1359	-0.1359	-0.1359	0.1359	0.0000	
8	0.3283	0.3283	-0.3283	0.0000	0.3283	
9	0.3333	0.3333	0.3333	0.0000	0.0000	Armonică $3k=0$
10	-0.3283	0.3283	-0.3283	0.3283	0.0000	
11	0.1359	-0.1359	-0.1359	0.0000	0.1359	
12	-0.5774	-0.5774	-0.5774	0.0000	0.0000	Armonică $3k=0$
13	-0.0378	0.0378	0.0378	0.0378	0.0000	
14	-0.2143	-0.2143	0.2143	0.0000	0.2143	
15	0.3333	0.3333	0.3333	0.0000	0.0000	Armonică $3k=0$
16	0.1140	-0.1140	0.1140	0.1140	0.0000	
17	0.9019	-0.9019	-0.9019	0.0000	0.9019	Prima armonică de dantură

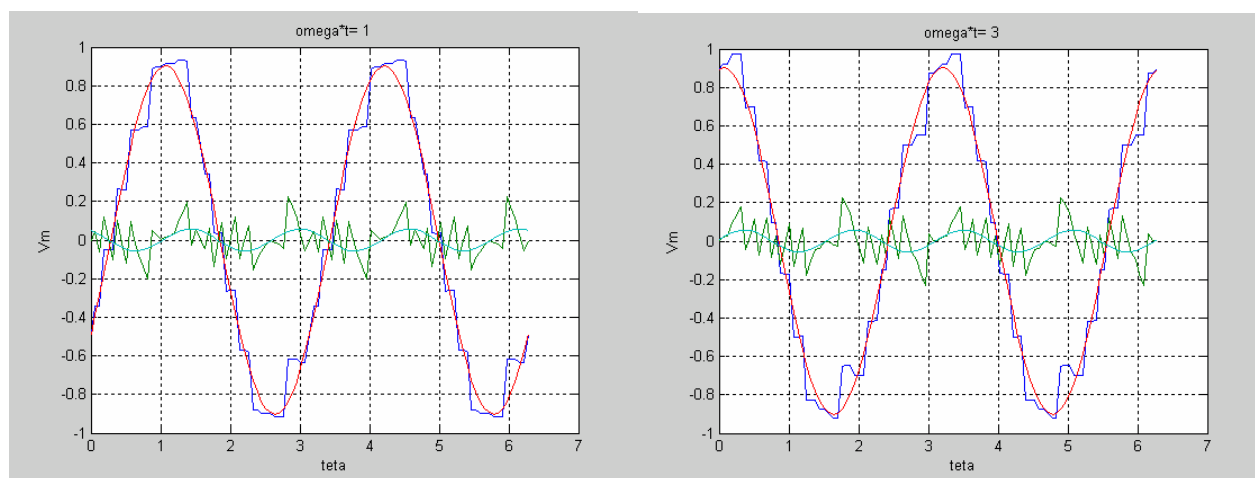


Figura 4 (a, b) Tensiunea magnetică rezultantă, 4 poli, varianta constructivă I ( $\tau_{dC}=0.0233$ ;  $\tau_{dV}=2.5947e-016$ , undă fundamentală simetrică)

Rezultatele corespunzătoare de calcul pentru varianta constructivă II, partea de 6 poli sunt prezentate în tabelul 4, respectiv figura 5. Există o subarmonică importantă care modulează fundamentală electrică (de lucru) și care, la fel ca în cazul I va conduce la pierderi suplimentare în rotor. Reacția coliviei la undele tensiunii magnetice diferite de cea fundamentală, îndeosebi la subarmonica geometrică, face ca în realitate acestea să fie atenuate, prețul fiind tocmai pierderile suplimentare care pot fi puse în evidență prin experimentări.

Tabelul 4. Rezultate de calcul al tensiunii magnetice, varianta constructivă II (6 poli)

Ordinul armonicii spatiale electrice $v$	$k_{wAV}$	$k_{wBV}$	$k_{wCV}$	$k_{wIV}$ (unda inversa)	$k_{wDV}$ (unda directa)	Observatii: toate armonicile spatiale sunt unde nesimetrice impure (componente directe si inverse simultan)
1	0.1248	-0.4223	0.4223	0.0859	0.3227	Subarmonica geometrica impura
3	0.6440	0.6440	-0.6440	<b>0.0000</b>	<b>0.6440</b>	Fundamentala electrica pura
5	0.0155	-0.0473	-0.0473	0.0170	0.0245	
7	0.8699	0.3660	0.3660	0.0886	0.2713	
9	0.2357	0.2357	0.2357	0.0000	0.0000	Armonica electrica 3 nula
11	0.4056	0.1707	0.1707	0.1265	0.0413	
13	0.1767	-0.5408	-0.5408	0.2803	0.1947	
15	-0.1725	0.1725	-0.1725	0.1725	0.0000	Armonice pure de ordin $3(6k\pm 1)$
17	-0.1782	-0.6032	0.6032	0.4609	0.1226	
19	-0.1782	-0.6032	0.6032	0.1226	0.4609	
21	-0.1725	0.1725	-0.1725	0.0000	0.1725	Armonice pure de ordin $3(6k\pm 1)$
23	0.1767	-0.5408	-0.5408	0.1947	0.2803	
25	0.4056	0.1707	0.1707	0.0413	0.1265	
27	0.2357	0.2357	0.2357	0.0000	0.0000	
29	0.8699	0.3660	0.3660	0.2713	0.0886	
31	0.0155	-0.0473	-0.0473	0.0245	0.0170	
33	0.6440	0.6440	-0.6440	0.6440	0.0000	Prima armonica de dantura Z-p

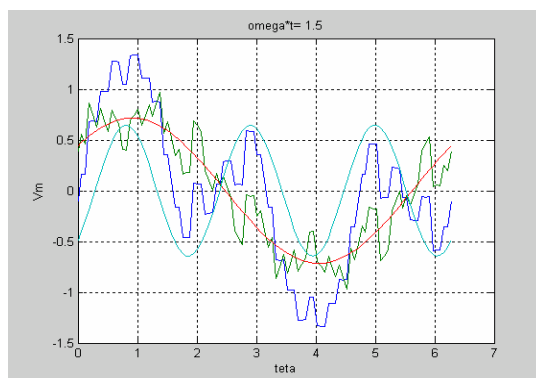


Figura 5. Tensiunea magnetică rezultantă, 6 poli, varianta constructivă II

#### 4. Aspecte privind nesimetria curenților de linie

O caracteristică impusă implicit prin standardele generale de motoare (de exemplu CEI 60034, preluat în prezent și în România prin SR EN 60034) este asimetria curenților trași din linie de motor la o funcționare simetrică a rețelei. În prescripțiile curente un receptor trifazat este admisibil din punctul de vedere al furnizorului de energie electrică în cazul în care componenta inversă a sistemului de curenți nu depășește 5% din componenta directă, în absența componentei homopolară. Există întotdeauna o nesimetrie a curenților motoarelor asincrone, îndeosebi la mersul în gol, datorită anizotropiei magnetice a sistemului magnetic realizat din tole magnetice laminate la rece. Alte nesimetrii structurale, cum este de exemplu cazul înfășurărilor în speță, pot conduce la

creșterea peste limită a componentei inverse a curenților. Este cazul variantei constructive I care are, prin construcție, o nesimetrie indusă de înfășurare.

Există posibilitatea pragmatică a aprecierii încadrării sitemului de curenți în 5% (sau 3%) din punct de vedere al limitării componentei inverse față de cea directă prin simpla măsurare a celor trei curenți în valori efective și calculul a două rapoarte, de exemplu  $I_2/I_1$  și  $I_3/I_1$ , în cazul (frecvent) al lipsei componentei homopolare (exemplul înfășurărilor de fază conectate în stea). Astfel, dacă se consideră cele două componente, directă (d) și inversă (i) de curenți exprimate prin relațiile cunoscute:

$$I_d = \frac{1}{3}(I_1 + aI_2 + a^2I_3); I_i = \frac{1}{3}(I_1 + a^2I_2 + aI_3) \quad (6)$$

$$a = \cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3}$$

și se utilizează notațiile:

$$x = \frac{I_2}{I_1}; y = \frac{I_3}{I_1}; \lambda = \frac{1 + 2\varepsilon^2}{1 - \varepsilon^2} \quad (7),$$

ecuația  $I_i/I_d = \varepsilon$  se poate scrie, prin transformări, sub forma:

$$x^2 + y^2 - \lambda xy - \lambda x - \lambda y + 1 = 0 \quad (8)$$

În figura 6 sunt reprezentate două elipse din familia de elipse definite de ecuația (8) și anume cele corespunzătoare lui  $\varepsilon=3\%$  și  $\varepsilon=5\%$ . Motoarele care se încadrează, din punct de vedere al nesimetriei curenților, în aceste limite trebuie să aibă punctul determinat din cele trei măsurători de curenți în interiorul elipselor corespunzătoare. Așa cum rezultă din ecuațiile (7) și (8), centrul familiei de elipse depinde el însuși de  $\varepsilon$ , avînd coordonatele:

$$x_c = y_c = \frac{1 + 2\varepsilon^2}{1 - 4\varepsilon^2} \quad (9),$$

ceea ce conduce la rezultatul că, dacă componenta inversă a curentului dispare, atunci  $\varepsilon=0$ ,  $\lambda=1$  și familia de elipse se restrînge în mod degenerativ la punctul (1, 1) în coordonatele x, y alese.

Trebuie făcută observația că rezultatele de calcul de mai sus (care se regăsesc în unele cataloage de motoare [13] chiar dacă cu unele erori) pleacă de la supoziția fundamentală că nesimetria curenților este una de amplitudine și că defazajul în planul timp este constant și egal cu  $120^\circ$ . Pentru cazurile de asimetrii pronunțate această supoziție trebuie verificată prin metode care sunt orientate spre măsurători ale puterilor absorbite pe fiecare fază iar rezultatele sintetice prezentate în figura 6 trebuie tratate cu circumspecție.

Din figura 6 rezultă că un raport între doi curenți oarecare ai unei mașini trifazate de 1,185 (sau 0,845) este acceptabil condiționat de celălalt raport dacă acesta din urmă nu depășește 1,1 (sau 0,925) sub aspectul încadrării componentei inverse în limita de 5% din cea directă.

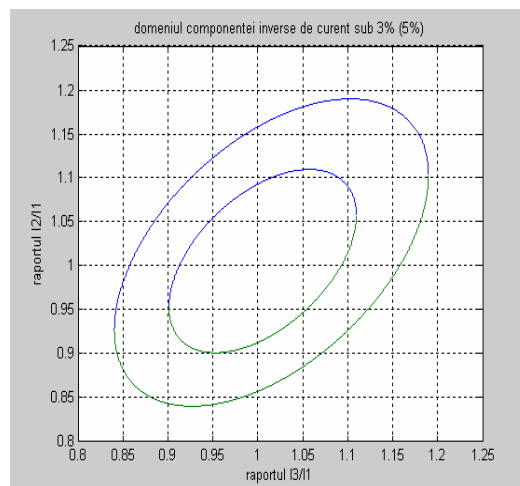


Figura 6. Reprezentarea grafică a elipselor limită de 3% și 5% pentru componenta inversă de curent

## 5. Rezultate experimentale

### 5.1. Caracteristici constructive de bază

Cele două bobinaje analizate au fost experimentate pe un motor asincron cu rotor în scurtcircuit din gabaritul 100 în structura motorului de bază de 2,2 kW/1500 rpm. având următoarele elemente constructive de bază:

Diametrul exterior al tolei stator:	162 mm
Diametrul interior al tolei stator:	102 mm
Lungime pachet stator:	80 mm
Număr creștături stator/rotor:	36/28
Secțiune netă creștătură stator:	65,30 mm <sup>2</sup>
Număr de spire pe bobină/fază (4 poli)/fază (6 poli) și diametru conductor de bobinaj:	
-varianta constructivă I:	94/282/564, Ø 0,65 mm
-varianta constructivă II:	86/258/516, 2xØ 0,48 mm
Secțiune conductor de bobinaj pe fază:	
-varianta constructivă I:	0,6636 mm <sup>2</sup> (4 poli), 0,3318 mm <sup>2</sup> (6 poli)
-varianta constructivă II:	0,7238 mm <sup>2</sup> (4 poli), 0,3619 mm <sup>2</sup> (6 poli)

Au fost experimentate prin încercări complete la standul de probă ambele variante constructive analizate mai sus. Puterile nominale de încercare au fost 2 kW pentru motorul de 4 poli și 0,6 kW pentru motorul de 6 poli, anticipând o funcționare în sarcină nominală pentru aplicații centrifugale (caracteristică mecanică de tip ventilator).

### 5.2. Rezultate obținute

În tabelul 5 sunt prezentate sintetic rezultate de încercare pentru fiecare variantă constructivă, respectiv pentru fiecare turație. Motoarele realizate ca modele au fost supuse unui program de încercări de tip care ale căror rezultate validează concepția bobinajelor punând în evidență de asemenea limitele existente. Prezența armonicilor de spațiu în tensiunea magnetică rezultantă conduce la pierderi suplimentare la mers în gol atât în fier cât și în colivia rotorică funcționând ca amortizor al tuturor armonicilor asincrone. Corespunzător, curentul de mers în gol raportat la cel nominal este mai mare decât la motoarele asincrone de aceeași putere și turație. Cuplurile de pornire respectiv cele maxime sunt în bună corelație cu cele ale unor motoare cu două turații echivalente așa cum sunt ele oferite în cataloage reprezentative de motoare [13]. În raport cu performanțele obținute se pot defini aplicații, respectiv servicii tip de funcționare, la care motoarele bobinate într-un singur strat să corespundă din punct de vedere calitativ.

Din punct de vedere al componentei inverse de curent, aceasta se poate calcula prin determinarea a oricăror două rapoarte de curenți de forma  $x$ ,  $y$  (ec. 7) și apoi întoarcerea ecuațiilor (7, 8) pentru a determina  $\varepsilon$ . Valorile din tabelul 5 sunt determinate prin ecuațiile de mai jos:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\lambda - 1}{\lambda + 2}}; \quad \lambda = \frac{x^2 + y^2 + 1}{x + y + 1} \quad (10)$$

Se constată că în cazul cel mai defavorabil al înfășurării nesimetrice din varianta constructivă I, la motorul de 4 poli componenta inversă de curent la mers în gol este de 4,47% adică se păstrează în limite admisibile.

În figura 7 sunt prezentate caracteristicile de funcționare ale motorului de 2 kW la 4 poli și 0,6 kW la 6 poli în varianta constructivă I (curentul și puterea absorbită în stînga, parametri energetici în dreapta funcție de puterea utilă). Se observă că performanțele energetice sunt comparabile cu acelea ale motorului normal de 2,2 kW la 1500 rpm avînd însă performanțe de pornire ușor inferioare.

Tabelul 5. Rezultate experimentale de bază pentru puterile nominale de 2 kW/0,6 kW la tensiunea de linie 380 V

Performanță	Varianta constructivă I		Varianta constructivă I	
	2p=4	2p=6	2p=4	2p=6
Rezistență de fază la 20°C, $\Omega$	2,96	11,77	2,314	9,21
Pierderi de mers în gol, W	324	209	315	355
Pierderi în fier, W	172	81	165	126
Curent de mers în gol, A	3,10	1,62	3,62	2,60
Curent nominal, A	4,98	2,04	5,29	2,82
$I_{0d}/I_{0i}$ (%)	4,47	2,71	<1	2,9
Randament nominal	0,762	0,638	0,777	0,563
Factor de putere nominal	0,80	0,70	0,739	0,574
Supratemperatură bobinaj în serviciu tip S1, K	76,5	79	72	73,7
Cuplu de pornire raportat	1,62	0,81	2,30	1,30
Cuplu maxim raportat	2,68	1,71	3,1	2,15
Cuplu minim în perioada de pornire	1,62	0,81	2,25	1,25

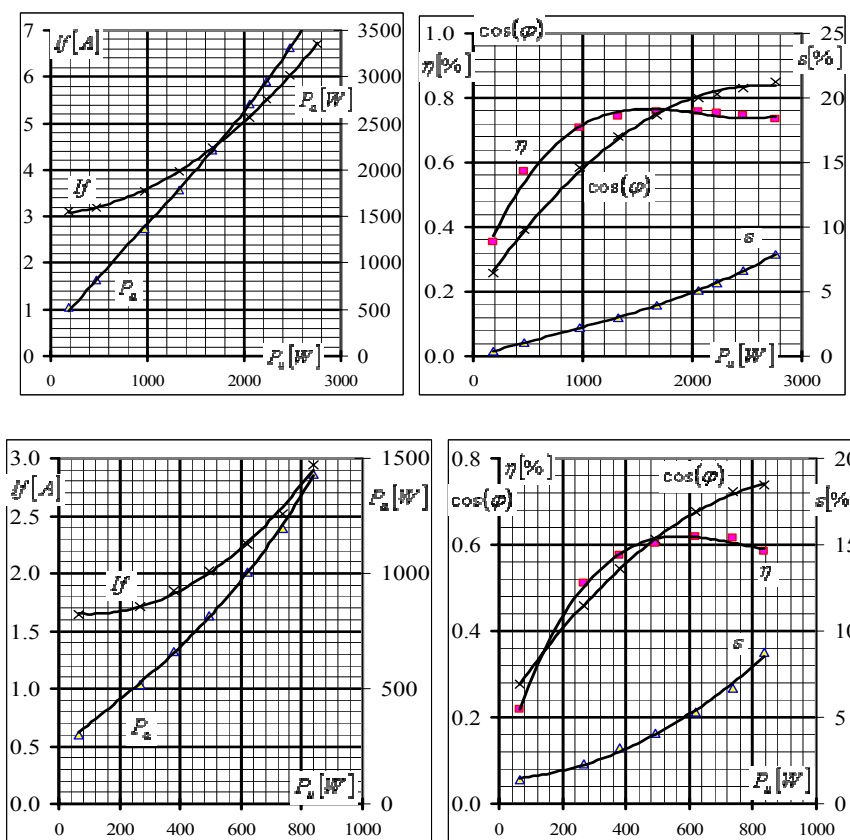


Figura 7. Caracteristici de funcționare ale motorului în varianta constructivă I (a-2 kW/1500 rpm; b-0,6 kW/1000 rpm).

Motorul dezvoltat în varianta constructivă II are, datorită nivelului diferit de saturație dar și datorită armonicilor de spațiu în exces, performanțe energetice inferioare la funcționarea în sarcină nominală. Caracteristica mecanică este însă net superioară celei din varianta constructivă I, așa cum se poate observa și din figura 8. Nudoar valorile tipice pentru cuplul de pornire, respectiv cuplul maxim sunt corespunzătoare dar și comportamentul cuplului în perioada de pornire se remarcă prin lipsa cuplurilor de agatare, respectiv a „inseuarilor” care pot apărea în cazul înfășurării comutabile.

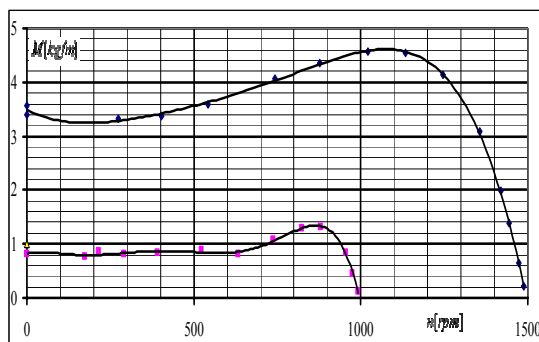


Figura 8. Caracteristici mecanice ale motorului în varianta constructivă II.

## 5. Concluzii

În lucrare problema proiectării înfășurărilor comutabile într-un strat pentru motoare cu două turații în raportul 4:6 este abordată la nivel conceptual și pragmatic plecând de la o metodă generală de analiză a tensiunii magnetice din întrefier bazată pe analiza Fourier a pînzei de curent și ajungînd la verificarea soluțiilor tehnice elaborate la nivel de modele experimentate la bancul de probă.

Studiul gradelor de libertate pe care le are la dispoziție proiectantul de înfășurări cu poli comutabili pentru un caz concret de motor cu 36 de creștături pe sator a pus în evidență modul cum performanțele globale ale înfășurărilor realizate într-un singur strat, ca formă de undă a tensiunii magnetice, conținut de armonice spațiale și simetrie a acestora, coeficientul scăpărilor diferențiale, pot fi balansate între înfășurarea corespunzătoare motorului de 4, respectiv de 6 poli.

Aplicarea practică a înfășurărilor cu poli comutabili dezvoltate în raportul 4:6 pentru motoare de bază din fabricația ELECTROPRECIZIE Săcele a dovedit posibilitatea dezvoltării de bobinaje cu poli comutabili într-un singur strat și de asemenea, prin limitele performanțelor funcționale a pus în evidență clasa aplicațiilor centrifugale pentru care soluțiile elaborate sunt fezabile.

Lucrarea a pus în evidență de asemenea avantajele generale ale bobinajelor unice comutabile pentru motoare cu două turații în raport cu un motor de bază realizat cu înfășurări distincte, motorul cu bobinaj unic și comutație de poli poate livra în condiții termice similare puteri mărite sau, în alternativa conservării puterilor, este posibilă realizarea de economii de materiale active (cupru și tablă electrotehnică).

## Bibliografie

1. Rawcliffe, G.H., Burbidge, R.F., Fong, W.: “Induction motor speed changing by pole-amplitude modulation”, Peoc.IEE, 1958, paper nr.2597U, p.411-19
2. Cistelean, M., Ciumbulea Gloria, Covrig M., Popescu M. - Probleme specifice motoarelor asincrone cu două turații cu poli comutabili, EEA-Electrotehnica nr.2/2004, pp.1-10
3. Auinger, H.: “Changeable pole three phase winding”, US Patent 4,127,787/1978
4. Auinger, H.: “Drehstrom-Kafigmotoren mit neuartiger polumschaltbarer Wicklung”, EMA, 1978, p.3-10

5. Cistelean, M., Covrig, M. - Asupra calculului reactanței de dispersie diferențială la mașinile de curent alternativ trifazate, EEA-Electrotehnica, nr.5-6/1995, pp.9-16
6. Heller, B., Hamata, V. - Harmonic field effects in induction machines, Academia Publishing House, Prague, 1977
7. Richter, R. - Mașini electrice. Vol. IV, Mașini asincrone, București, ET, 1960
8. Richter, R. - Infășurările mașinilor electrice, București, ET 1958
9. Bălă, C. - Mașini electrice. Teorie, încercări, București, EDP, 1979
10. Neven, Srb - Winding technique of electric motors, Tehnicka knjiga, Zagreb, 1990
11. Cistelean M., Popescu M.: "Bobinaj într-un strat pentru mașini electrice trifazate cu poli comutabili în raportul 4:6", brevet RO 120115/2002, titular ICPE-ME
12. SR EN 60034:2005. Mașini electrice rotative. Partea 1: Valori nominale și caracteristici de funcționare.
13. 3-phase TEFV cage induction motors, aluminium alloy frame 0.09 to 160 kW technical catalogue. Catalog Leroy Somer 1994

**Rezumat.** În lucrare este abordată problema motoarelor asincrone cu poli comutabili în raportul 4:6 cu infășurări trifazate într-un singur strat. Sunt tratate două soluții constructive cu armatura bobinată de 36 creștături, sub aspectul tensiunii magnetice din întrefier și al conținutului de armonice spațiale și sunt analizate rezultatele obținute pe modele experimentale construite și încercate la bancul de probă.

**Abstract.** In the paper the pole changeable, single layer induction motors in the ratio 4:6 are analysed. Two types of 36 stator slots, single layer windings motors are investigated, from the point of view of the air gap magneto-motive force and the space harmonic content. The results obtained on the manufactured and tested motors are reported.

Colectivul de autori:

Mihai V. CISTELECAN	- cercetător științific gr.I, director științific	ICPE-ME
Mihail POPESCU	- cercetător științific gr.II	ICPE-ME
Ioan Dănuț COSTEA-MARCU	- cercetător științific gr.III	ICPE-ME