

## ASPECTE ACTUALE REFERITOARE LA UTILIZAREA SIMULĂRII ÎN CADRUL PROCESULUI DE PROIECTARE AL MOTOARELOR ASINCRONE CU DESTINAȚII DE LUCRU SPECIFICATE

<sup>1</sup>Nicolae DIGĂ, <sup>1</sup>Valentin NĂVRĂPESCU, <sup>2</sup>Silvia-Maria DIGĂ și <sup>3</sup>Camelia DINA

<sup>1</sup>Scoala Doctorală de Inginerie Electrică, Universitatea POLITEHNICA din București  
nicolae.diga@gmail.com; valentin.navrapescu@upb.ro

<sup>2</sup>Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea din Craiova, sdiga@elth.ucv.ro

<sup>3</sup>INAS S.A. Craiova, cdina@inas.ro

**Rezumat.** În această lucrare, autorii abordează aspecte ale simulărilor efectuate în cadrul procesului de proiectare a motoarelor asincrone cu destinații speciale, folosind suporturile software moderne specializate. În acest sens, prin elaborarea și exemplificarea unor proceduri clare privind definirea și simularea numerică performantă cu metoda elementului finit (MEF) folosind modulele (softuri specifice) de analiză - ANSYS, a modelului generic al unui motor asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit pentru tracțiune electrică, se creează posibilitatea de a răspunde cu rapiditate solicitărilor beneficiarilor și de a le furniza acestora variante constructive optime.

### 1. INTRODUCERE

Afișarea instantanee a modului în care deciziile de proiectare influențează calitatea modelului unui produs, îmbunătățește procesul de proiectare al produsului. Firme de cercetare independentă cum este Tech-Clarity [1] au cercetat și au publicat sub formă de infografice, rezultatele sondajelor lor de opinie referitoare la modul în care companiile cu performanțe înalte utilizează simularea în timpul procesului de proiectare. S-a desprins clar concluzia că se pot realiza produse mai competitive, prin autorizarea inginerilor proiectanți în ceea ce privește procesul de simulare.

Astfel s-a constatat că deși 95% dintre firmele de inginerie știu că ar trebui să utilizeze simularea în procesul de proiectare, aproximativ 65% nu utilizează suficient simularea în timpul procesului de proiectare al produselor lor [2]. Această realitate are o serie de cauze, printre aceste cauze putându-se enumera: proiectanții nu au expertiză; instrumentele de simulare sunt prea greu de utilizat; simularea durează prea mult; inginerii se bazează pe analiști, pentru a simula în locul lor etc.

Deciziile luate în cadrul procesului de proiectare pot să ducă la succesul sau eșecul în ceea ce privește realizarea unui produs.

Elementele caracteristice ale produselor care vor face ca produsele să fie cele mai competitive în următorii 5 ani sunt: calitatea, fiabilitatea, costul, reputația brandului, inovarea. Procentele în care companiile raportează că aceste caracteristici sunt importante pentru competitivitate sunt următoarele: 80% - calitatea, 67% - fiabilitatea, 58% - costul, 42% - reputația brandului, 42% - inovarea. Un procent de 76% dintre companiile respondente evaluează deciziile de proiectare care afectează aceste calități ale produselor ca fiind luate „oarecum greu” până la „**extrem de dificil**”. Un procent de 63% dintre aceste companii spun că o perspectivă imediată asupra impactului deciziilor de proiectare îi va ajuta pe ingineri să ia decizii mai bune pentru a îmbunătăți **competitivitatea** produselor [1], [2].

Un procent de 95% din companii recunosc că atunci când inginerii proiectanți folosesc simularea apar o serie de beneficii, dintre care pot fi enumerate următoarele:

- Se anticipează apariția dificultăților de execuție.
- Este necesară producerea de mai puține prototipuri.
- Se fac mai puține operații de re prelucrare.

- Se dezvoltă modele mai inovatoare.

Dar un procent de 65% din companii consideră că inginerii proiectanți nu realizează atât de multe simulări pe cât ar trebui, iar cauzele sunt multiple cum ar fi:

- lipsa expertizei (58%)
- considerarea instrumentelor de simulare ca fiind prea dificile (36%)
- găsierea soluției de simulare durează prea mult (34%), etc.

Marea majoritate a companiilor participante la aceste studii de piață (96%) este de acord că, dacă rezultatele simulării ar fi imediat aplicate în mediul de modelare și inginerii proiectanți ar putea efectua numărul ideal de simulări, compania ar înregistra următoarele beneficii [1]:

- mai puține probleme în etapele următoare (59%)
- timp mai scurt pentru comercializare (55%)
- mai multe modele optimizate (54%)
- mai multe modele inovatoare (48%).

Pornind de la aceste realități incontestabile, autorii și-au propus în această lucrare, să treacă în revistă și să exemplifice posibilitatea de a efectua modelări / simulări numerice performante cu metoda elementului finit (MEF) folosind modulele (softuri specifice) de analiză - ANSYS, a mașinilor electrice.

## 2. ASPECTE DE MODELARE 2D/3D, SIMULARE NUMERICĂ ȘI OPTIMIZARE A UNUI MOTOR ASINCRON CU DESTINAȚIE SPECIALĂ (TRACȚIUNE ELECTRICĂ)

Avantajul utilizării calculatorului în proiectarea motoarelor asincrone cu destinații speciale, este faptul că prin modificarea diverselor elemente constructive, proiectarea poate fi direcționată către varianta constructivă de motor care se dorește a fi realizată, efortul de calcul fiind minim [2].

Suporturile software moderne specializate furnizează interfețe atractive și permit o interacțiune permanentă cu utilizatorii, suscitându-le acestora interesul până la stabilirea soluției finale [3], [4].

În cadrul acestui studiu a fost folosit suportul software “ANSYS Electronics Desktop” pentru studiul din punct de vedere electromagnetic al unui motor asincron cu rotorul în scurtcircuit, destinat tracțiunii electrice.

Astfel au fost utilizate o serie de produse ANSYS Electronics Desktop [5]: ANSYS RMaxprt Design, ANSYS Maxwell 2D/3D Design, ș.a.

### 2.1 Analiza cu ANSYS® RMaxprt a motorului studiat

Au fost analizate câteva variante de motor asincron de tracțiune (MAT). Una dintre variantele analizate - care corespunde configurației originale a motorului - cu ajutorul căreia s-au realizat modelările și simulările numerice, este un motor asincron trifazat având următoarele date nominale și constructive [6]:

- puterea nominală  $P_n = 630$  kW;
- tensiunea nominală  $U_n = 1200$  V (conexiune stea pe stator);
- turația nominală  $n_n = 2688$  rot/min;
- frecvența nominală  $f_n = 91$  Hz;
- numărul de perechi de poli  $p = 2$ ;
- numărul de creștături statorice  $Z_1 = 60$ ;
- numărul de creștături rotorice  $Z_2 = 70$ ;
- temperatura maximă suportată de motor  $T = 160$  °C;

- lungimea armăturilor feromagnetice (stator/ rotor) 315 mm;
- întrefierul mașinii are lățimea de 1,5 mm.

În Fig. 1 se prezintă semnificația principalelor mărimi aferente creștăturii statorice/rotorice a motorului, pentru tipurile de creștături selectate din biblioteca ANSYS® *RMxprt*.

Semnificațiile notațiilor din Fig. 1a sunt următoarele:  $B_{s1}$  – lățimea penei creștăturii statorice;  $B_{s2}$  – lățimea creștăturii statorice;  $H_{s0}$  – înălțimea istmului creștăturii statorice;  $H_{s1}$  – înălțimea penei creștăturii statorice;  $H_{s2}$  – înălțimea creștăturii statorice.

Valorile mărimilor care apar în Fig. 1a sunt următoarele:  $B_{s2} = 9,3$  mm,  $B_{s1} = 13,3$  mm,  $H_{s0} = 2,5$  mm,  $H_{s1} = 2,5$  mm,  $H_{s2} = 32,6$  mm.

Semnificațiile notațiilor din Fig. 1.b sunt următoarele:  $B_{s0}$  – lățimea istmului creștăturii rotorice;  $B_{s1} = B_{s2}$  – lățimea creștăturii rotorice;  $H_{s0}$  – înălțimea istmului creștăturii rotorice;  $H_{s1}$  – înălțimea penei creștăturii rotorice;  $H_{s2}$  – înălțimea creștăturii rotorice,  $R_s$  – raza de curbură a fundului creștăturii rotorice.

Valorile mărimilor care apar în Fig. 1.b sunt următoarele:  $B_{s0} = 2,5$  mm,  $B_{s1} = B_{s2} = 6,2$  mm,  $H_{s0} = 3$  mm,  $H_{s1} = 0$  mm,  $H_{s2} = 16,2$  mm,  $R_s = 0$  mm.

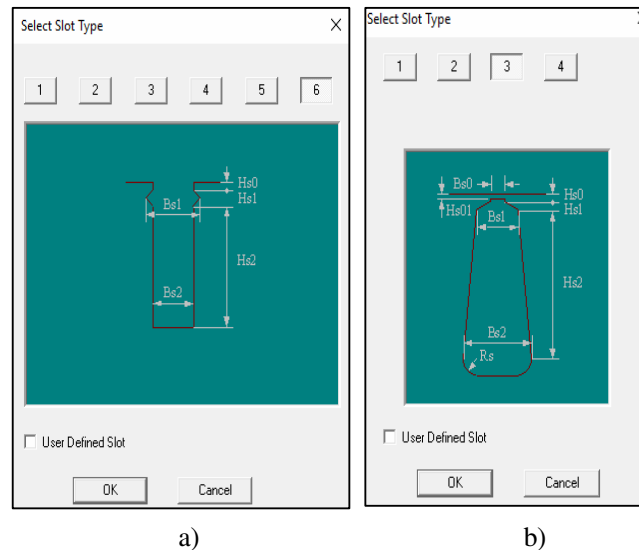


Fig. 1. Notarea mărimilor caracteristice ale creștăturii: a- stator, b- rotor.

Produsul ANSYS *RMxprt Design* este un instrument software adițional la soluția ANSYS Maxwell Design, dedicat proiectanților de mașini electrice care oferă un sistem standardizat de instrumente de proiectare în domeniu. Acesta poate calcula performanțele mașinii, face recomandări cu privire la dimensiunile inițiale și poate rula sute de analize „what-if” în doar câteva secunde.

Programul generează sub formă de interfețe, rezultatele simulării analizei efectuate asupra motorului studiat (performanțe, date complete detaliate de proiectare, curbe).

Performanțele motorului studiat vor constitui datele de intrare pentru analiza ulterioară a câmpului electromagnetic efectuată prin metoda elementului finit.

Simularea este făcută atât în regim de *funcționare la sarcina nominală* cât și în *regim de mers în gol*, *pornire*, *funcționare cu rotor cald*, programul furnizând și consumul de materiale necesar construcției motorului.

Programul generează un *fișier personalizat* cu datele de proiectare ale motorului asincron trifazat de tracțiune analizat, care conține: date generale; date stator; date rotor; consum de

materiale; funcționare la sarcina nominală; funcționare la mers în gol; pornire; funcționare cu rotor calat; date detaliate la funcționarea la sarcină nominală; dispunerea înfășurărilor.

Software-ul folosit pentru analiza motorului studiat - ANSYS® RMxprt permite introducerea în baza de date proprie, a curbei de magnetizare pentru materialul magnetic ales, precizându-se coordonatele punctelor sale, alocându-i-se un nume, modificările fiind preluate automat în baza de date. Pentru revenirea la varianta inițială trebuie notate setările inițiale și acestea se refac manual de la tastatură.

Programul generează de asemenea o serie de curbe, pentru analiza cărora permite o serie de facilități, cum este *de exemplu* afișarea valorii maxime:

- variația randamentului funcție de viteză,  $\eta = f(n)$ ;
- variația factorului de putere funcție de viteză,  $\cos\varphi = f(n)$ ;
- variația puterii de ieșire (utile) dezvoltate funcție de viteză,  $P_2 = f(n)$ ;
- variația cuplului dezvoltat funcție de viteză,  $M = f(n)$  (Fig. 2);
- variația curentului de alimentare din înfășurarea statorică, funcție de viteză,  $I = f(n)$  (Fig. 3).

## 2.2 Modelarea și simularea cu ANSYS® Maxwell 2D/3D Design a câmpului electromagnetic din motorul studiat

Astfel proiectul realizat în urma analizei cu ANSYS® RMxprt a fost transferat în ANSYS® Maxwell (2D/3D), unde au fost definite materialele, condițiile la limită, incluzând aici și cazurile de simetrie, excitațiile și apoi putând fi cuplat cu topologia circuitelor pentru o analiză electromagnetică variabilă în timp necesară unui proces complex de optimizare multicriterială [7].

ANSYS® Maxwell Design este unul dintre cele mai evolute software de simulare a câmpului electromagnetic destinat inginerilor angrenați în proiectarea și analiza 2D și 3D a dispozitivelor electromecanice și electromagnetice, precum și a motoarelor, dispozitivelor de acționare, transformatoarelor, senzorilor și bobinelor.

Acesta utilizează metoda elementului finit (MEF) pentru a rezolva analize cu câmpuri statice, în domeniul de frecvență și timp variabil pentru câmpuri electromagnetice și electrice. Un beneficiu cheie al soluției software ANSYS Maxwell Design îl reprezintă ușurința în utilizare, astfel *soluționarea este realizată în mod aproape automat*, fiind necesară doar definirea geometriei, a proprietăților de material și a condițiilor la limită [8], [9].

## 2.3 Rezultate și concluzii privind optimizarea motorului studiat

Există o valoare optimă pentru care un anumit criteriu de optimizare se minimizează, acesta putând fi: *costul de fabricație, costul de exploatare, costul total, curentul de pornire, dimensiunile de gabarit, consumul de materiale active, pierderile totale, sau o anumită categorie de pierderi (de exemplu pierderile din înfășurarea (barele) rotorului).*

Funcția obiectiv avută în vedere la proiectarea optimală a motoarelor asincrone de tracțiune este  $C_t$  - costul total minim al mașinii.

În studiile de optimizare realizate se au în vedere și alte criterii importante în proiectarea motorului:

- criteriile costuri ( $C_f$  - cost de fabricație,  $C_e$  - cost de exploatare);
- criteriile caracteristici de funcționare ( $\eta$  - randament,  $\cos\varphi$  - factor de putere,  $k_s$  - factorul de saturație magnetică);
- criteriile dimensiuni de gabarit ( $D_{s \text{ exterior}}$  - diametrul exterior al mașinii,  $l_s$  - lungimea totală a mașinii);
- criteriile consumuri de materiale ( $m_M$  - masa motorului,  $m_{Cu}$  - consumul de cupru,  $m_{Fe}$  - consumul de fier);

- criteriile pierderi importante ( $p_{Cu}$  - pierderile în cupru (pierderi Joule în înfășurarea statorică și rotorică),  $p_{Fe}$  - pierderile principale în fier,  $p_s$  - pierderi suplimentare în fier).

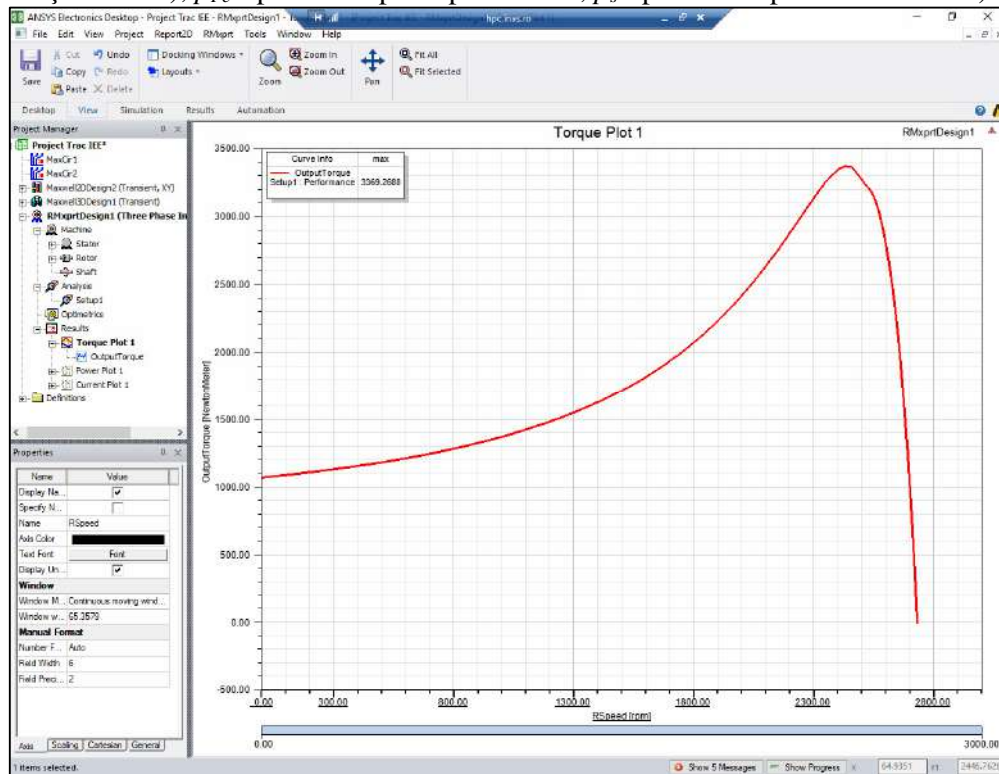


Fig. 2. Interfața ANSYS Electronics Desktop - variația cuplului dezvoltat funcție de viteză,  $M = f(n)$ .

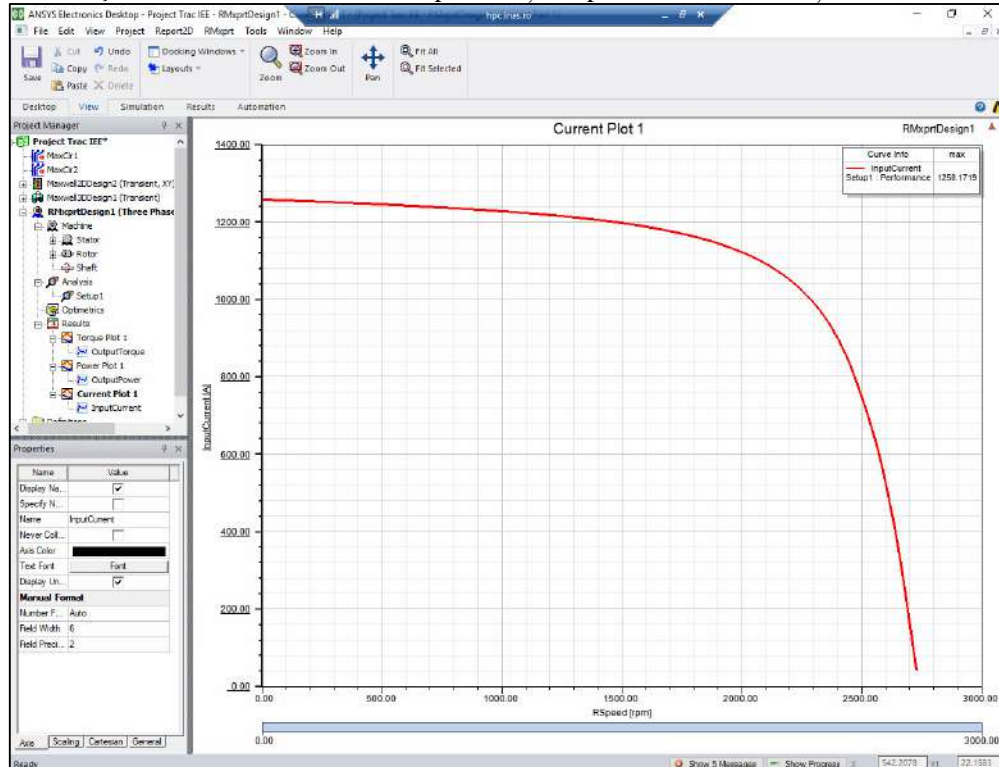


Fig. 3. Interfața ANSYS Electronics Desktop - variația curentului de alimentare din înfășurarea statorică, funcție de viteză,  $I = f(n)$ .

Cantitățile utilizate (masele) de cupru și tablă silicioasă sunt calculate în cadrul analizei cu ANSYS® RMxpert, folosindu-se următoarele valori pentru densitățile masice:  $\rho_{CuS} = 8900 \text{ kg/m}^3$  - densitate cupru utilizat la înfășurarea statorică;  $\rho_{CuR} = 8933 \text{ kg/m}^3$  - densitate cupru utilizat la înfășurarea rotorică (bare rotorice + inelul de scurtcircuitare);  $\rho_{Fe} = 7872 \text{ kg/m}^3$  - densitate oțel (tabla silicioasă) utilizat la stator și rotor.

Mai departe, ANSYS® Maxwell Design va genera automat o rețea de elemente finite (mesh), adaptată tipului de analiză ales. Această adaptare automată a procesului de discretizare elimină complexitatea etapei de pre-procesare îmbunătățind astfel eficiența întregului proces de analiză. Un element cheie în ANSYS® Maxwell Design îl reprezintă posibilitatea de a genera modele de înaltă fidelitate și de a utiliza condiții de simetrie în scopul reducerii timpului de soluționare.

Cu ajutorul acestui program se obține atât modelul integral care poate fi vizualizat în Fig. 4, dar se pot selecta și diferite regiuni ale motorului în funcție de necesități (ansamblul stator - întrefier - rotor - arbore; ansamblul stator - întrefier - rotor; stator, rotor (Fig. 5) etc.).

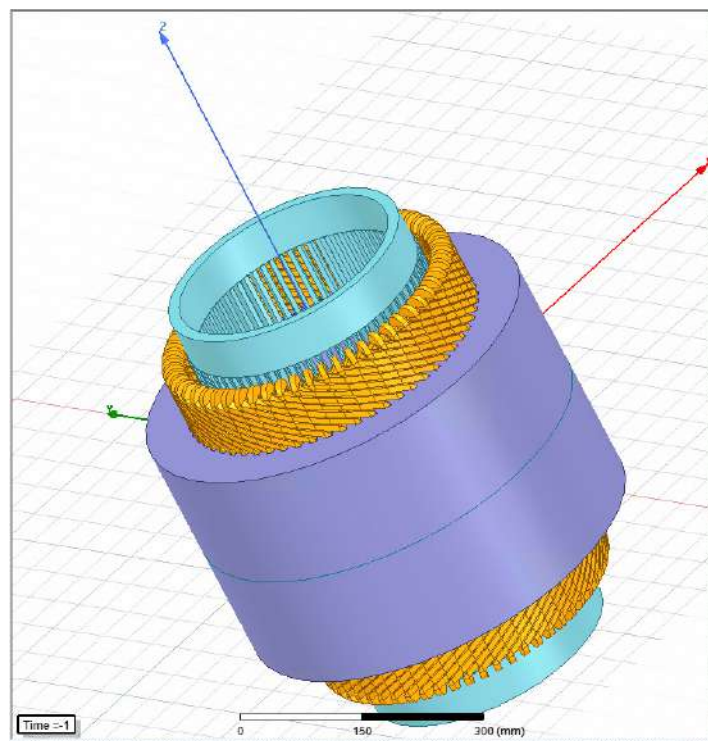


Fig. 4. Interfața Maxwell 3D - modelul 3D generat în regim tranzitoriu al motorului studiat.

Se pot reprezenta grafic **criteriile de optimizare analizate** în funcție de fiecare dintre variabilele alese dimensiuni constructive / solicitări electromagnetice.

*S-au făcut simulări pornindu-se de la configurația originală a motorului, caracterizată de următoarele date:*

- Diametrele: diametrul exterior al statorului,  $D_{se} = 520 \text{ mm}$ ; diametrul interior al statorului,  $D_{si} = 330 \text{ mm}$ ; diametrul exterior al rotorului,  $D_{re} = 327 \text{ mm}$ ; diametrul interior al rotorului,  $D_{ri} = 125 \text{ mm}$ .
- Numărul de creștături statorice:  $Z_s = 60$
- Aria geometrică a creștăturii:  $S_{crs \text{ reală}} = 349,68 \text{ mm}^2$ ; secțiunea conductorului de cupru  $S_{Cu} = k_{uc} S_{crs \text{ reală}} = 0,57 \cdot 349,68 = 199,32 \text{ mm}^2$  ( $k_{uc} = 0,57$  coeficientul de umplere a creștăturii statorice).

- Pasul dentar statoric (la nivelul întrefierului):  $t_{zs} = \pi D_s / Z_s = 17,78 \text{ mm}$ .
- Dimensiunile creștăturii statorice sunt conform Fig. 1a.
- Dimensiunile jugului statoric: înălțimea jugului statoric,  $h_{js} = 57,4 \text{ mm}$ .

În cadrul optimizării după variabilele dimensiuni constructive se prezintă ca *exemplu* studiul optimizării după o singură variabilă.

Toate mărimile aferente motorului rezultate în urma unei proiectări tradiționale (cunoscute conform literaturii de specialitate) sunt considerate în continuare ca mărimi de referință (de raportare). Aceste mărimi au fost obținute în urma unei analize cu ANSYS® RMxprt a motorului studiat.

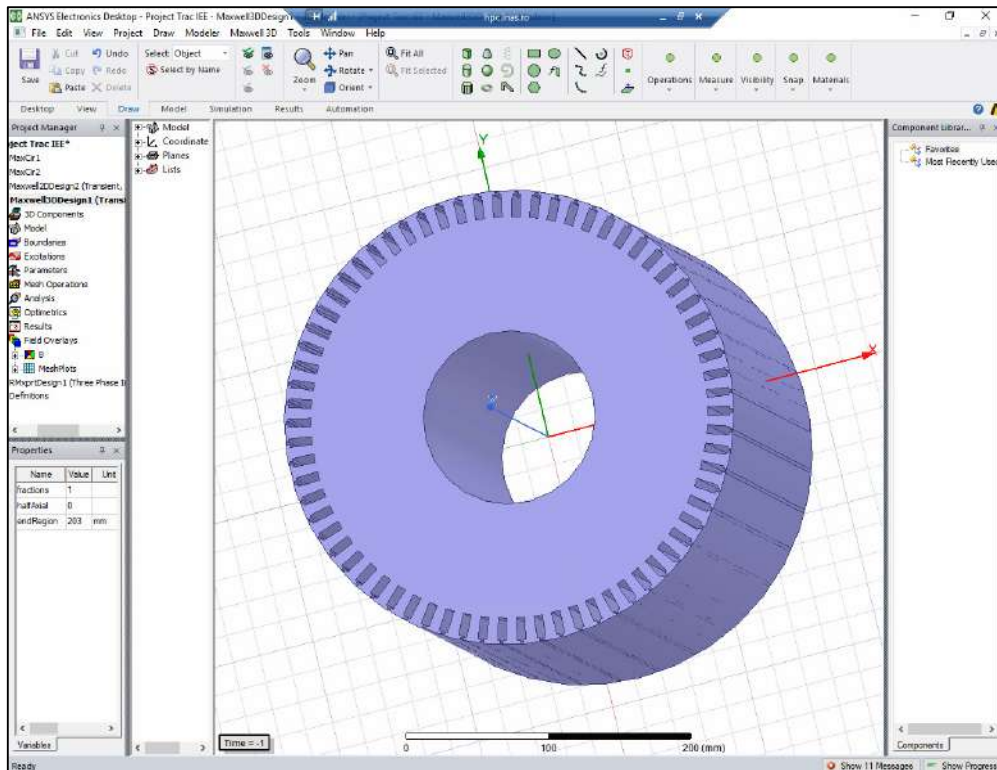


Fig. 5. Interfața Maxwell 3D - modelul 3D generat în regim tranzitoriu al rotorului, pentru motorul studiat.

a) Optimizarea în raport cu  $B_{s2}$  - lățimea istmului creștăturii statorice

Pentru început, este indicat să se realizeze simulările numerice în element finit ale motorului existent, fără modificări constructive. După aceea se pot modifica anumiți parametri constructivi și se vor face modelările numerice în toate aceste cazuri.

S-au simulat motoarele având  $B_{s2} = (7,9...10,7) \text{ mm}$  care reprezintă o variație de  $\pm 15 \%$  față de valoarea de referință cunoscută  $B_{s2} = 9,3 \text{ mm}$ . S-a ales pasul de variație al acestei mărimi 0,5 mm (7,9 mm; 8,4 mm; 8,9 mm; 9,3 mm; 9,8 mm; 10,4 mm; 10,9 mm).

Trebuie făcută observația că în acest caz  $B_{s2}$  este și lățimea creștăturii statorice iar modificarea acesteia fără alte restricții (de exemplu menținerea solenației în creștătură) este un scenariu interesant și util, dar poate duce la dezechilibrări în funcționarea motorului (instabilitate termică, saturații excesive, solicitări mecanice suplimentare etc.) sau dimpotrivă o construcție supradimensionată, iar variantele rezultate pot prezenta abateri semnificative.

Se face mențiunea că programul permite două opțiuni: să se fixeze numai variabila modificată sau să se fixeze toate variabilele.

Astfel *pentru exemplificare* în Fig. 6 se prezintă interfața Maxwell 2D prin care s-a selectat valoarea minimă atribuită lățimii istmului crestăturii statorice,  $B_{s2} = 7,9$  mm.

Iar în Fig. 7 și Fig. 8 pentru această configurație modificată a motorului, se prezintă harta valorilor inducției magnetice inductoare, dintr-o secțiune transversală și respectiv un spectru al liniilor de câmp magnetic inductor.

Similar s-a procedat în cazul celorlalte motoare simulate, atribuindu-se lățimii istmului crestăturii statorice, celelalte valori menționate  $B_{s2} = (7,9...10,7)$  mm.

Rezultate obținute în *etapa de postprocesare* în urma rezolvării problemei 2D de câmp electromagnetic cu ajutorul metodei elementului finit (utilizând programul ANSYS® Maxwell 2D) pentru regimul tranzitoriu constau în obținerea variației în timp a câtorva mărimi de interes general cum ar fi: cuplul dezvoltat de motor; pierderile tehnologice pentru înfășurarea statorică; curentul din înfășurarea statorică pe fazele A, B și C, etc. ale căror valori maxime s-au reprezentat funcție de parametrul după care se poate face optimizarea,  $B_{s2}$  - lățimea istmului crestăturii stator (Fig. 9).

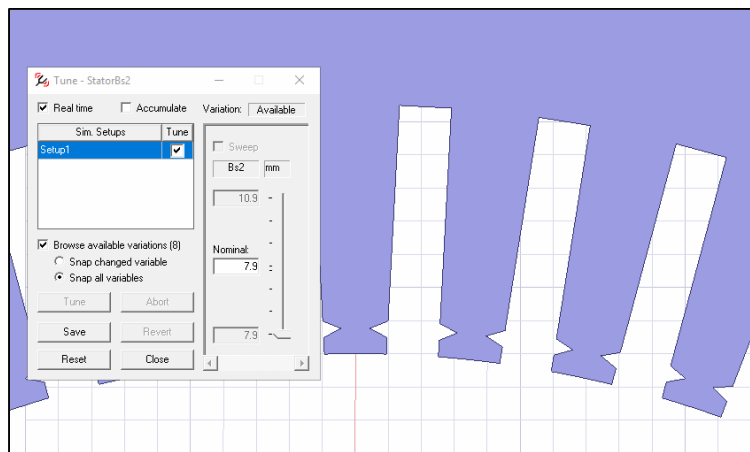


Fig. 6. Interfața Maxwell 2D - selectare valoare  $B_{s2}$  - lățimea istmului crestăturii statorice ( $B_{s2} = 7,9$  mm - valoarea minimă atribuită).

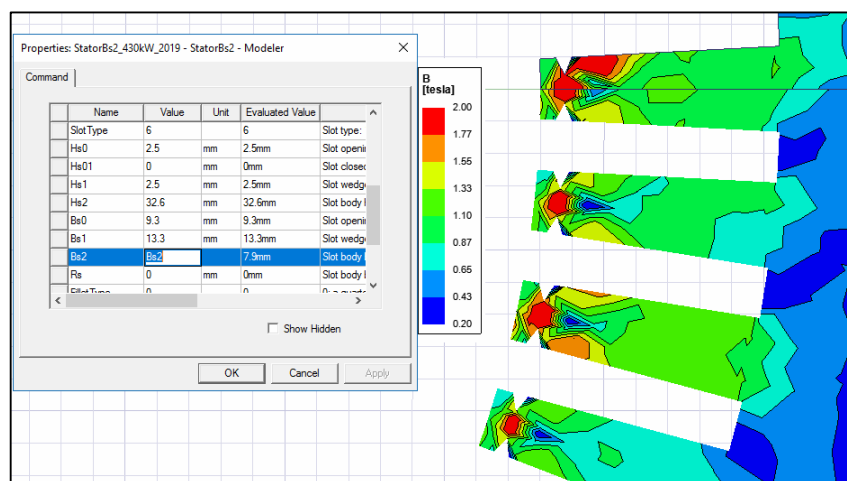


Fig. 7. Harta inducției magnetice într-o secțiune transversală pentru configurația modificată a motorului ( $B_{s2} = 7,9$  mm - valoarea minimă atribuită).



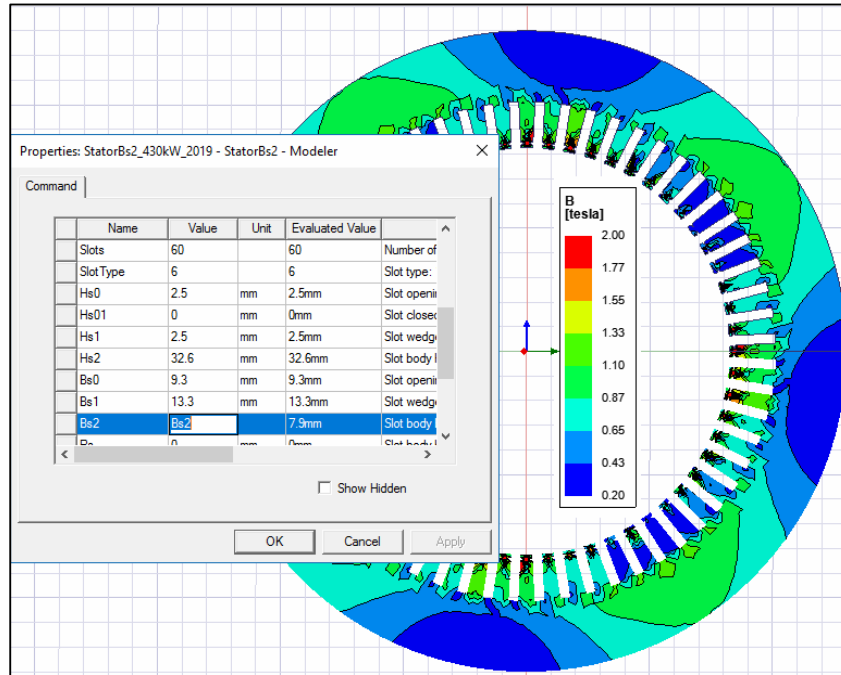


Fig. 8. Spectrul liniilor de câmp magnetic într-o secțiune transversală pentru configurația modificată a motorului ( $B_{s2} = 7,9$  mm - valoarea minimă atribuită).

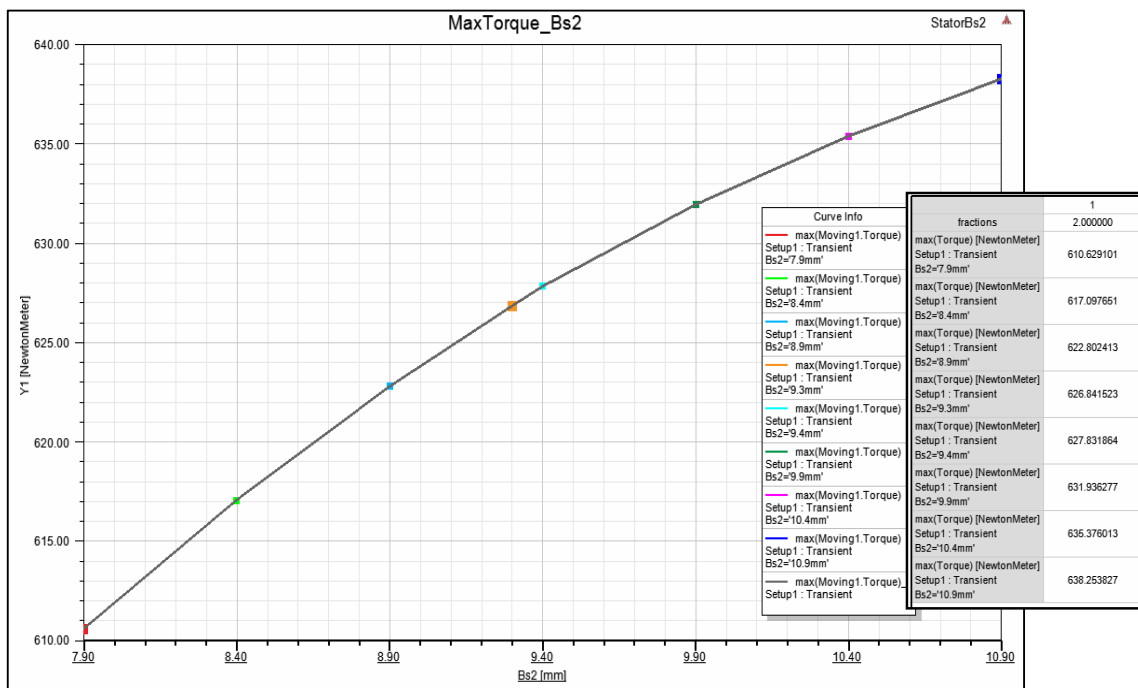


Fig. 9. Curba de variație a cuplului maxim dezvoltat de motor, în funcție de variabila  $B_{s2}$  - lățimea istmului creștăturii statorice.

În Tabelul 1 și Tabelul 2 sunt centralizate valorile puterilor și pierderilor de putere și respectiv consumurilor de materiale active obținute pentru motoarele simulate, cărora li s-au atribuit valorile menționate pentru lățimea istmului creștăturii statorice,  $B_{s2}$ .

Tabelul 1. Puteri și pierderi de putere funcție de  $B_{s2}$

Power_Bs2								
Bs2 [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8
InputPowerParameter [kW] Setup1 : Performance	475.627000	471.131000	469.444000	467.991000	467.977000	466.654000	465.280000	464.190000
IronCoreLossParameter [mW] Setup1 : Performance	84.339500	86.509800	88.181800	89.632800	89.904200	71.691300	73.568900	75.553900
NoLoadInputPowerParameter [kW] Setup1 : Performance	6.299300	6.249910	6.254870	6.254010	6.266280	6.282130	6.306550	6.349930
NoLoadIronCoreLossParameter [mW] Setup1 : Performance	76.063600	77.791800	79.879600	80.013300	80.292100	81.704800	83.276700	85.016600
OutputPowerParameter [kW] Setup1 : Performance	420.594600	430.034000	430.004000	430.076000	430.056000	430.003000	429.305000	429.320000
RotorOhmicLossParameter [kW] Setup1 : Performance	8.686700	8.508800	8.411290	8.335180	8.326230	8.250150	8.191070	8.138590
StatorOhmicLossParameter [kW] Setup1 : Performance	30.695700	26.948300	26.388900	23.939900	23.957500	22.655600	21.481300	20.468800
StrayLossParameter [kW] Setup1 : Performance	4.300000	4.300000	4.300000	4.300000	4.300000	4.300000	4.300000	4.300000
TotalLossParameter [kW] Setup1 : Performance	45.033200	41.096800	39.440600	37.916000	37.928500	36.554900	35.315000	34.240300

Tabelul 2. Consumuri de materiale active funcție de  $B_{s2}$

Material Consumption_Bs2								
Bs2 [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8
ArmatureCopperWeightParameter [kg] Setup1 : Performance	17.989400	20.461500	21.814600	23.290700	23.302900	24.933800	26.678000	28.544500
ArmatureCoreSteelConsumptionParameter [kg] Setup1 : Performance	442.869000	442.869000	442.869000	442.869000	442.869000	442.869000	442.869000	442.869000
ArmatureCoreSteelWeightParameter [kg] Setup1 : Performance	255.863000	253.294000	250.725000	248.570000	248.156000	245.587000	243.018000	240.449000
RotorBarMaterialWeightParameter [kg] Setup1 : Performance	32.768500	32.768500	32.768500	32.768500	32.768500	32.768500	32.768500	32.768500
RotorCoreSteelConsumptionParameter [kg] Setup1 : Performance	201.482000	201.482000	201.482000	201.482000	201.482000	201.482000	201.482000	201.482000
RotorCoreSteelWeightParameter [kg] Setup1 : Performance	161.540000	161.540000	161.540000	161.540000	161.540000	161.540000	161.540000	161.540000
RotorRingMaterialWeightParameter [kg] Setup1 : Performance	14.427100	14.427100	14.427100	14.427100	14.427100	14.427100	14.427100	14.427100
TotalNetWeightParameter [kg] Setup1 : Performance	472.588000	472.491000	471.275000	470.896000	470.194000	469.258000	468.432000	467.729000

Similar se pot reprezenta grafic în raport cu variabila  $B_{s2}$  - lățimea istmului creștăturii statorice și alte criterii de optimizare, cum ar fi:

- pierderi de putere (Tabelul 1);
- consumul de materiale active ( $m_{Cu}$ ,  $m_{Fe}$ ,  $m_M$ ) ale motorului asincron de tracțiune feroviară (Tabelul 2).

Creșterea lățimii istmului creștăturii statorice, scoate în evidență următoarele:

- *avantaje*: crește cuplul maxim dezvoltat de motor cu 4,52 % conform valorilor prezentate în Fig 9; scad: puterea absorbită, pierderile în înfășurarea statorică/rotorică și pierderile totale (Tabelul 1), masa miezului statoric, masa totală (Tabelul 2).
- *dezavantaje*: cresc pierderile tehnologice pentru înfășurarea statorică, pierderile în miez (Tabelul 1), consumul de cupru statoric (Tabelul 2), curentul maxim (absorbit de motor) din înfășurarea statorică pe toate cele trei faze A, B și C.

b) Optimizarea în raport cu  $H_{s0}$  - înălțimea istmului creștăturii statorice

S-au simulat motoarele având  $H_{s0} = (2,13...2,87)$  mm care reprezintă o variație de  $\pm 15\%$  față de valoarea de referință cunoscută  $H_{s0} = 2,5$  mm. S-a ales pasul de variație al acestei mărimi 0,1 mm (2,13 mm; 2,23 mm; 2,33 mm; 2,43 mm; 2,53 mm; 2,63 mm; 2,73 mm; 2,83 mm).

De asemenea tot pentru exemplificare în Fig. 10 se prezintă interfața Maxwell 2D prin care s-a selectat valoarea maximă atribuită înălțimii istmului creștăturii statorice,  $H_{s0} = 2,83$  mm.

Iar în Fig. 11 pentru această configurație modificată a motorului, se prezintă harta valorilor inducției magnetice inductoare, dintr-o secțiune transversală.

Din Fig. 12 în care se poate vedea curba de variație pentru cuplul maxim dezvoltat de motor în funcție de variabila  $H_{s0}$  - înălțimea istmului crestăturii statorice, se constată că, cuplul maxim dezvoltat de motor are valoarea minimă pentru  $H_{s0} = 2,5$  mm - valoarea de referință cunoscută, care corespunde configurației originale a motorului.

Pentru valori mai mici și respectiv mai mari decât  $H_{s0} = 2,5$  mm, se constată că, cuplul maxim dezvoltat de motor, crește sensibil (având o creștere maximă cu  $\approx 0,22$  % față de valoarea minimă) pe măsură ce crește înălțimea istmului crestăturii statorice.

Creșterea înălțimii istmului crestăturii statorice conform Fig. 12, scoate în evidență următoarele:

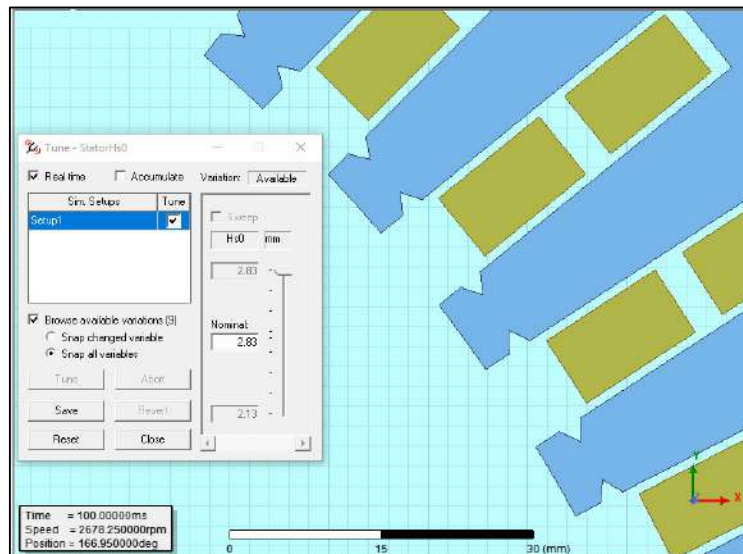


Fig. 10. Interfața Maxwell 2D - selectare valoare  $H_{s0}$  - înălțimea istmului crestăturii statorice ( $H_{s0} = 2,83$  mm - valoarea maximă atribuită).

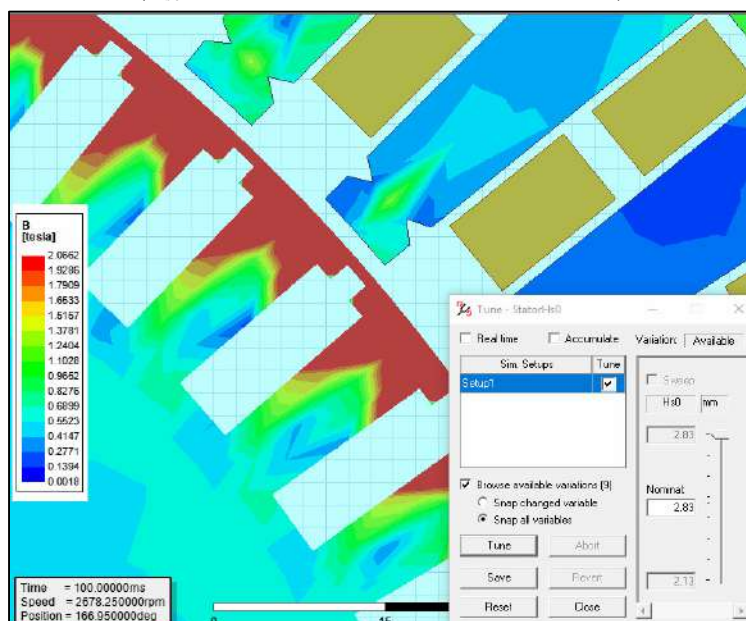


Fig. 11. Harta inducției magnetice într-o secțiune transversală pentru configurația modificată a motorului ( $H_{s0} = 2,83$  mm - valoarea maximă atribuită).

- *avantaje*: crește sensibil cuplul maxim dezvoltat de motor așa cum se poate observa din Fig. 12 și scade curentul maxim absorbit de motor pe faza C, față de valoarea corespunzătoare pentru înălțimea istmului creștăturii statorice  $H_{s0} = 2,5$  mm - valoarea de referință cunoscută care corespunde configurației originale a motorului, așa cum se poate observa din Fig. 13.

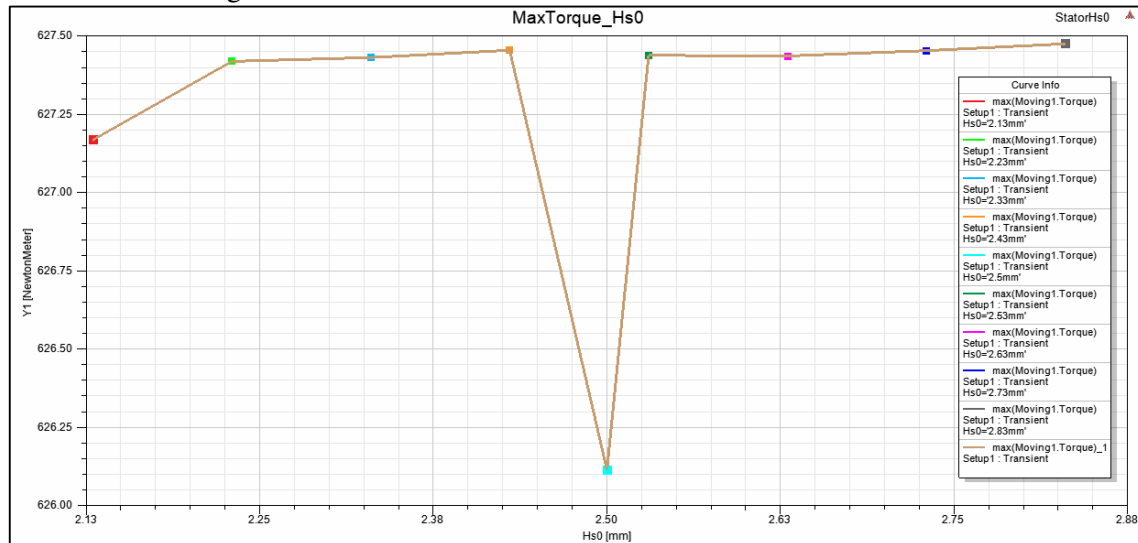


Fig. 12. Curba de variație a cuplului maxim dezvoltat de motor, în funcție de variabila  $H_{s0}$  - înălțimea istmului creștăturii statorice.

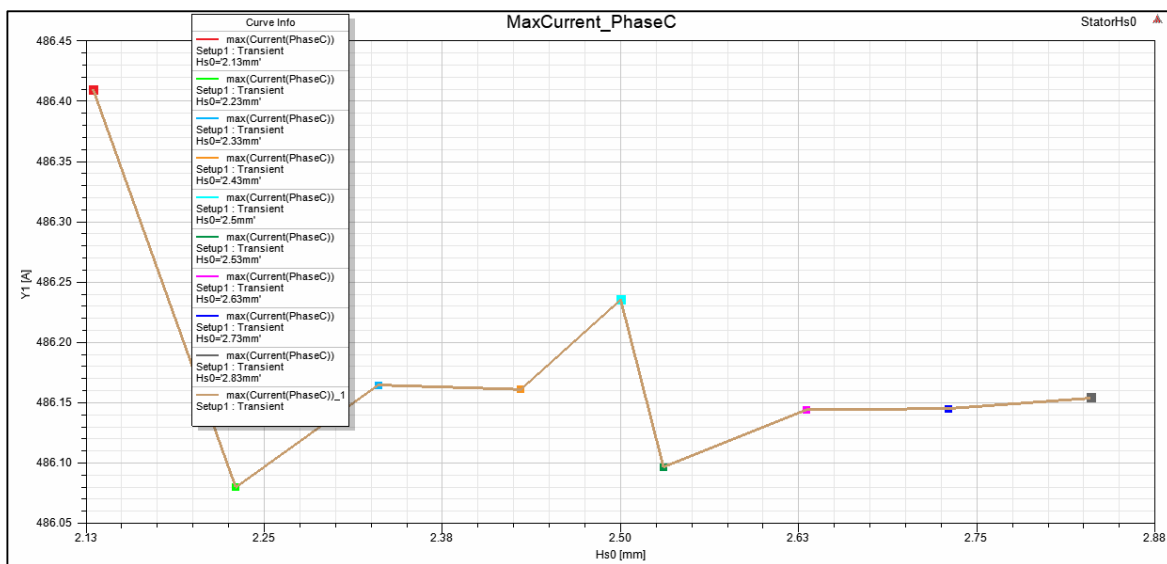


Fig. 13. Curba de variație a curentului maxim din înfășurarea statorică pe faza C, în funcție de variabila  $H_{s0}$  - înălțimea istmului creștăturii statorice.

- *dezavantaje*: crește curentul maxim absorbit de motor, acesta având valori minime pe fazele A și B, pentru înălțimea istmului creștăturii statorice  $H_{s0} = 2,5$  mm - valoarea de referință cunoscută care corespunde configurației originale a motorului și de asemenea cresc pierderile în miez așa cum se poate observa din Fig. 14, în care au fost reprezentate curbele de variație corespunzătoare valorii maxime atribuite înălțimii istmului creștăturii statorice și uneia din valorile inferioare atribuite acesteia.

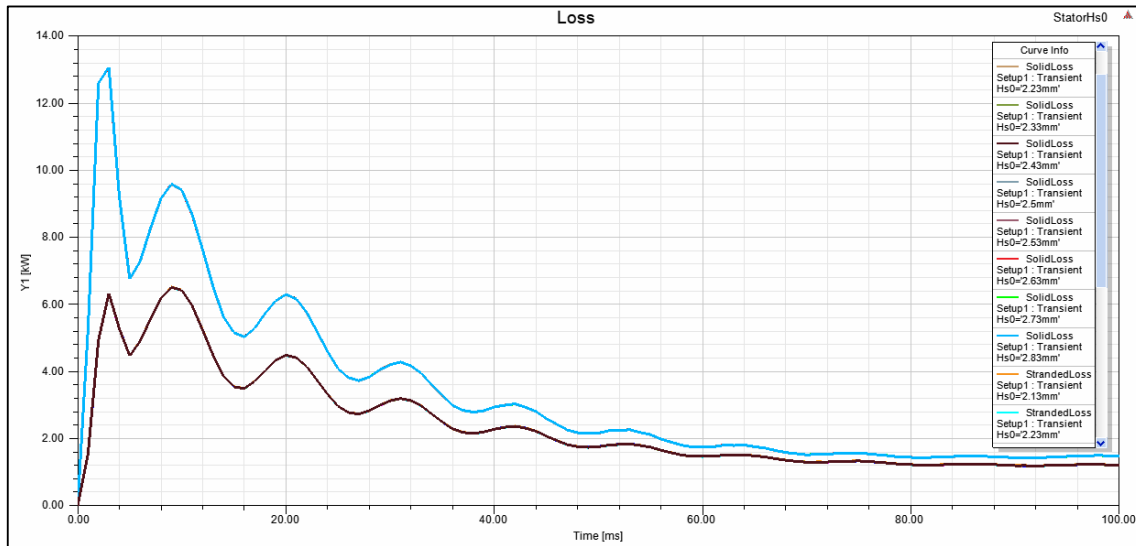


Fig. 14. Curbele de variație ale pierderilor în miez, în raport cu variabila  $H_{s0}$  - înălțimea istmului creștăturii statorice, în funcție de timp:  $H_{s0} = 2,83$  mm - valoarea maximă atribuită (albastru);  $H_{s0} = 2,43$  mm (maron).

#### Acknowledgments

Autorii mulțumesc Consiliului de Administrație al companiei S.C. INAS S.A. Craiova, reprezentant în România al companiei ANSYS Inc., deținător al licențelor de distribuitor de soluții software CAD/CAM/CAE/PLM, care prin Domnul Director General Ing. Constantin Ciolofan, le-a permis accesul la tehnologii și echipamente performante, asigurându-le suportul hardware și software ANSYS Electromagnetics Low Frequency (Maxwell 2D/3D, RMXprt) - produse ale companiei ANSYS Inc. și i-a sprijinit nemijlocit în elaborarea unei game diverse de aplicații care fac obiectul acestui studiu.

Lucrarea a fost elaborată în cadrul proiectului: Dezvoltarea competențelor de antreprenariat ale doctoranzilor și postdoctoranzilor – cheie a succesului în carieră (A-Succes) Cod MySMIS: 125125, Proiect cofinanțat din Fondul Social European, prin Programul Operațional Capital Uman, Axa Prioritară 6 - Educație și competențe.

### 3. CONCLUZII

Originalitatea acestei lucrări constă tocmai în argumentarea de către autori a necesității de a se introduce în mod obligatoriu în cadrul procesului de proiectare a motoarelor asincrone (cu destinații speciale) a unei etape de simulare numerică și optimizare. În acest sens aceștia propun și exemplifică proceduri clare, logice și consistente privind simularea numerică a acestor motoare asincrone prin utilizarea a o serie de produse ANSYS *Electronics Desktop* (analiză cu ANSYS® *RMxpert*, simularea câmpului electromagnetic cu ANSYS® *Maxwell 2D/3D Design* etc.).

Studiul de caz prezentat de autori sistematizează anumite proceduri actuale de proiectare a mașinilor asincrone cu destinații speciale, așa cum este motorul asincron trifazat de tracțiune, folosind în acest sens suporturile software moderne ANSYS *Electronics Desktop*.

Acest studiu se va continua cu crearea modelelor de simulare utilizând editorul schematic de circuite (Schematic Editor) din interfața *ANSYS Simplorer*. Simularea propriu-zisă a schemei echivalente se va face utilizând setările necesare pentru tipul de analiză standard urmărit în care modelele de proiectare sunt evaluate cu un software de simulare specificat. Astfel în etapa de postprocesare se pot obține rezultate pentru o serie de caracteristici corespunzătoare analizei tranzitorii în cazul pornirii motorului asincron (de exemplu pornire prin conectare directă la rețea). Se va folosi de asemenea posibilitatea de cuplare a programului de simulare *Maxwell 2D/3D* cu platforma de analiză de sisteme *Twin Builder*.

Cu *Twin Builder* se pot realiza analize pentru sisteme complexe cum este sistemul electric de tracțiune, acesta oferind posibilitatea de a integra rezultatele multiple și diferite ca și domeniu de analiză într-o singură platformă în vederea anticipării funcționării acestui sistem complex.

## BIBLIOGRAFIE

- [1]. [www.tech-clarity.com](http://www.tech-clarity.com)
- [2]. <https://www.inas.ro/ro/noutati/simularea-in-mediul-actual-de-lucru>, Revolutionizing Simulation for Design Engineers, Tech-Clarity, 2019.
- [3]. Vlad, I., Câmpeanu, A., Enache, S.: “*Proiectarea asistată a mașinilor asincrone. Probleme de optimizare*“, Editura Universitaria Craiova, 2011.
- [4]. Prakash, R., Akhtar, M. J., Behera, R. K., Parida, S. K.: “Design of a Three Phase Squirrel Cage Induction Motor for Electric Propulsion System”, Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems, March 13-15, 2014, Kanpur, India.
- [5]. Ansys-Maxwell Help 19.1 release, April 2018, <http://www.ansys.com>
- [6]. Ghiță, C.: “*Regimurile permanente ale convertoarelor electromecanice*“, Editura MATRIX ROM, București, 2008.
- [7]. Sadiku, M. N. O.: “*Numerical Techniques in Electromagnetics*“, ISBN 13: 9780849313950, CRC Press, New York, 2000.
- [8]. Marcsa, D.: “Induction Motors Simulation by Finite Element Method and Different Potential Formulations with Motion Voltage Term”, B.Sc. Thesis, Department of Automation, Laboratory of Electromagnetic Fields, Széchenyi István University, Győr, 2008.
- [9]. Zhu, Y., Cangellaris, A. C.: “*Multigrid Finite Element Methods for Electromagnetic Field Modeling*“, ISBN 13: 9780471741107, Wiley - IEEE Press, 2006, p. 14.