

# PROCESE DINAMICE ÎN MAȘINA SINCRONĂ CU MAGNEȚI PERMANENȚI

Aurel CÂMPEANU

Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea din Craiova

acampeanu@em.ucv.ro

**Rezumat.** În lucrare se procedează la un studiu al comportării mașinii sincrone cu magneți permanenți în procese dinamice semnificative, comparativ cu mașina de inducție și cu mașina sincronă cu excitație electromagnetică.

## 1. INTRODUCERE

În sistemele complexe automate actuale, în care procesele dinamice sunt inevitabile, mașinile electrice joacă un rol fundamental în conversia controlată a energiei electromagnetice în mecanică și invers. În cercetare a apărut un nou capitol al teoriei mașinilor electrice în funcționare nestaționară, cu mijloacele matematice aferente, *modelele dinamice* ale mașinilor electrice, bazate pe teoria fazorilor reprezentativi și teoria celor două axe. Pe acest suport se poate determina, încă în stadiul de proiectare, comportarea mașinii supusă unui proces dinamic definit. Rezultă oportunitatea unei *proiectări dedicate*, care să definitiveze parametrii astfel încât solicitările electromagnetice și mecanice, să fie în limite acceptabile.

De nivelul de precizie al modelelor matematice depinde calitatea răspunsului mașinii electrice în procesul dinamic dat și implicit durata ei de viață, eforturile de cercetare actuale sunt orientate în această direcție. În [1] sunt detaliate bazele teoriei dinamicii mașinilor electrice, însoțite de simulări reprezentative, majoritatea în premieră absolută pentru mașinile electrice de curent alternativ și se regăsește și o bibliografie largă actuală, în domeniu. În prezenta lucrare se compară din punctul de vedere al comportării dinamice, mașina sincronă cu magneți permanenți MSMP cu mașina de inducție MI în procesele de pornire și cu mașina sincronă cu excitație electromagnetică MSEE la variația prin salt a sarcinii.

## 2. SIMULĂRI REPREZENTATIVE

Se consideră pentru comparație statoare identice și rotoare dimensionate corespunzător pentru fiecare mașină în parte. Pentru MSMP s-a considerat în rotor o înfășurare în scurtcircuit cu o rezistență astfel încât să răspundă simultan satisfăcător și ca înfășurare de pornire și ca înfășurare de amortizare. Pentru MSEE s-a presupus același câmp magnetic principal la o funcționare staționară. Modelele matematice utilizate sunt precizate în [1]. Parametrii mașinilor sunt dați în Anexa 1.

### 2.1 Caracteristici dinamice de pornire la mersul în gol, comparative MSMP-MI.

În Fig. 1 sunt comparate vitezele unghiulare  $\omega_\psi(t)$ ,  $\omega(t)$ , ale câmpurilor magnetice principale și rotoarelor respectiv ale MSMP și MI. Simulările notate cu indicii a, b se referă la MSMP respectiv MI.

Observăm:

Viteza  $\omega_\psi(t)$  are o evoluție foarte accidentată până la atingerea valorii de sincronism și este caracterizată prin:

- valoarea  $\omega_\psi(0) = 1/2 \omega_1$  pentru mașina de inducție;
- în momentele ulterioare pornirii, sunt prezente reversări de sens, urmate de valori suprasincrone. Reversările de sens sunt sensibil mai numeroase la MSMP;
- procesul oscilant se desfășoară într-un timp semnificativ mai mare la MSMP;
- finalizarea  $\omega_\psi(t) = \omega_1$  este de durată, de același ordin de mărime cu timpul total de pornire;
- în acord cu caracteristica  $\omega_\psi(t)$  viteza unghiulară  $\omega(t)$  a MSMP în primele momente ale pornirii este oscilantă și crește încet încât în final corespunzător, timpul total de pornire devine sensibil mai mare;
- la neglijare pierderilor în rotor și mecanice, condiția  $\omega_\psi(t) = \omega_1$  se realizează *exclusiv* la funcționarea sincronă.

În Fig. 2 se detaliază pentru claritate, primele momente ale proceselor de pornire:

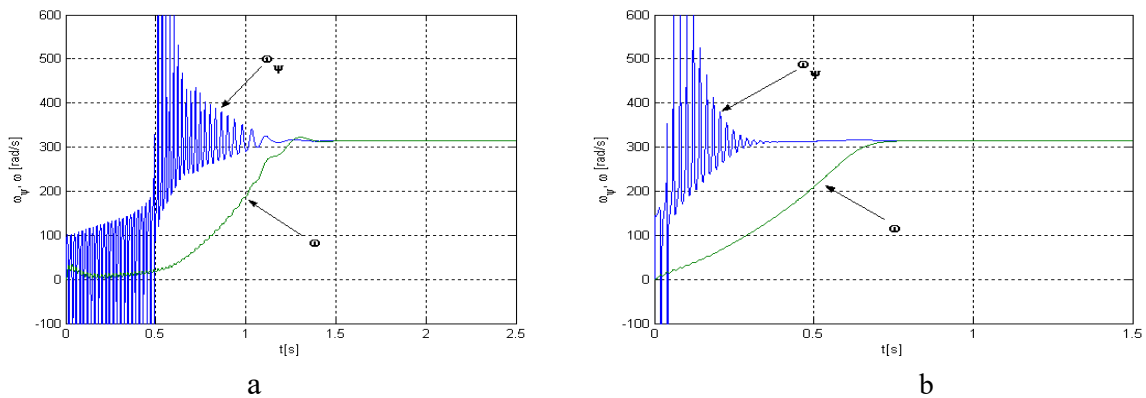


Fig.1. Caracteristicile  $\omega_\psi(t)$ ,  $\omega(t)$ .

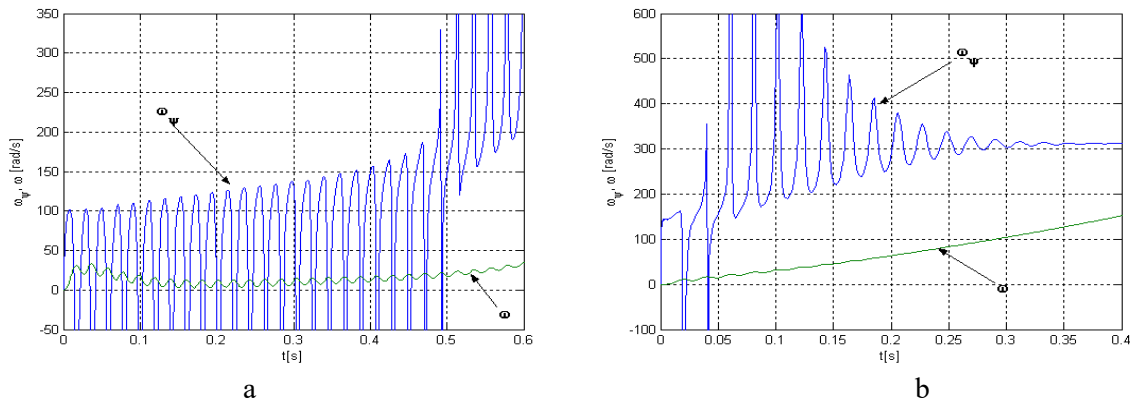


Fig.2. Caracteristicile  $\omega_\psi(t)$ ,  $\omega(t)$  - detaliu.

În Fig. 3 sunt reprezentați comparativ *curenții statorici*  $i_s(t)$ . Se observă:

- practic același curent supra tranzitoriu;
- pornirea este marcată de oscilații importante, mai însemnate ca amplitudine la MSMP. Durata lor este în acord cu oscilațiile  $\omega_\psi(t)$ ,  $\omega(t)$ .

În Fig. 4 sunt reprezentate *caracteristicile*  $m(\omega)$  substanțial diferite:

- la MSMP oscilațiile de cuplu însoțesc practic toată durata pornirii. Prima oscilație poate fi semnificativă (depinde de momentul conectării);
- la MI cu o comportare mai elastică, la scurt timp după conectare, oscilațiile practic dispar (a nu se confunda evoluția ulterioară similară celei de regim cvasistaționar întrucât persistă procesul dinamic și componentele tranzitorii).

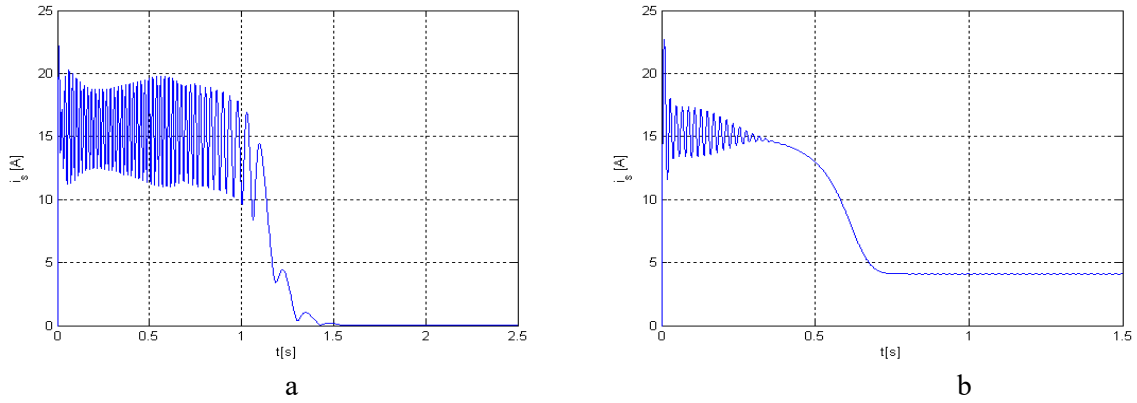


Fig. 3. Caracteristicile  $i_s(t)$

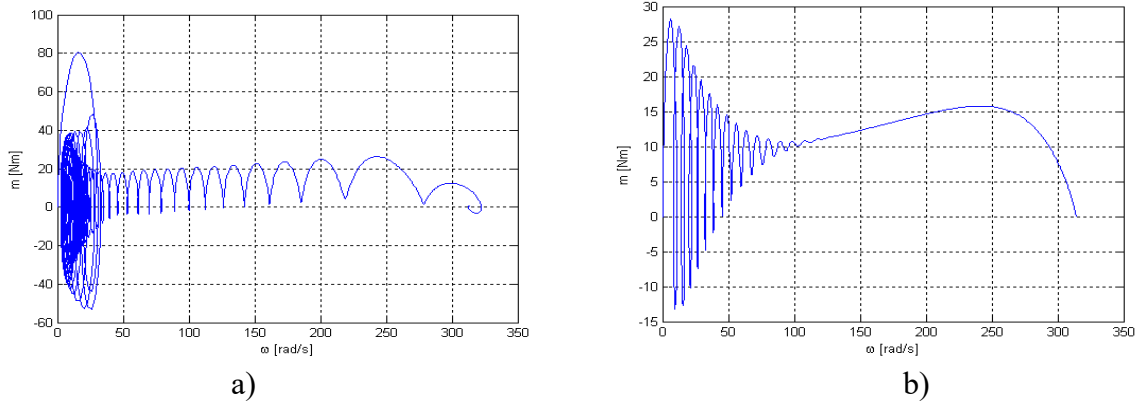


Fig.4. Caracteristicile  $m(\omega)$ .

În Fig. 5 se detaliază pentru claritate primele momente ale pornirii.

## 2.2 Caracteristici dinamice în proximitatea vitezei de sincronism, comparative MSMP-MSEE

Ca mai sus, figurile cu indicele **a** se refera la MSMP. Cum s-a precizat, mașinile sunt identic excitate în rotor în momentul aplicării *cuplului rezistent*  $M_r$ .

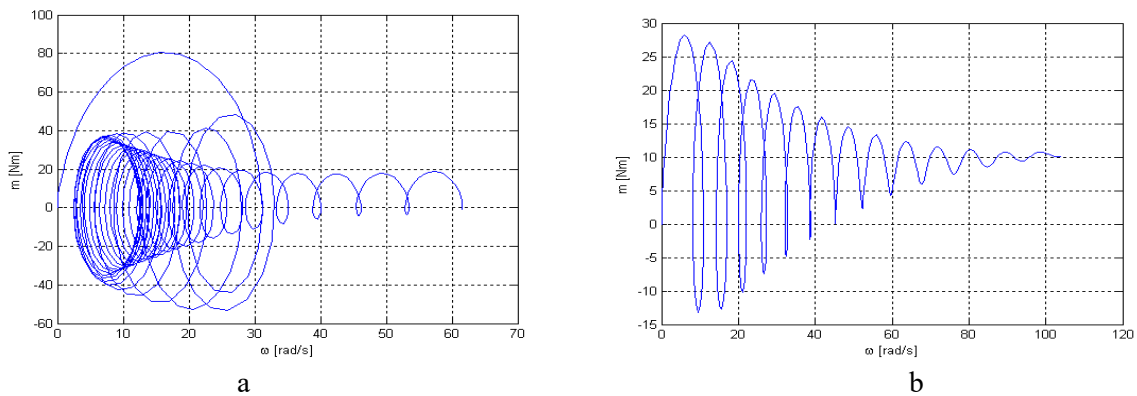


Fig.5. Caracteristicile  $m(\omega)$  -detaliu

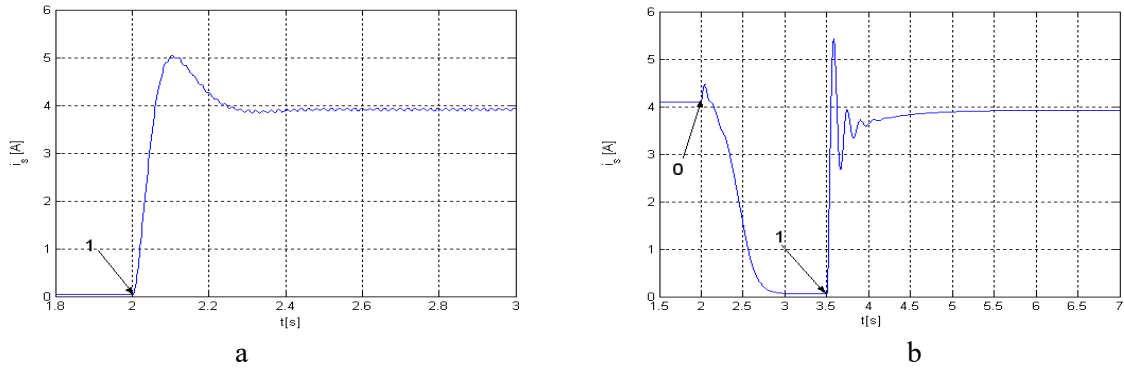


Fig.6. Caracteristicile  $i_s(t)$ .

Figurile 7 definesc *caracteristicile*  $m(t)$ . Ele urmează practic evoluții similare reprezentărilor pentru  $i_s(t)$ .

Figurile 8 precizează *caracteristicile*  $m(\omega)$ . Punctele 2 definesc finalul procesului dinamic. Se constată că sensibil mai multe oscilații se regăsesc în cazul MSMP.

În Fig. 9 precizează *caracteristicile*  $m(\theta)$ . Se observă: caracteristicile unghiulare dinamice sunt mult diferite de cele staționare, cu oscilații mai largi la MSEE. De reținut că se regăsește același unghi intern în punctul 2, rezultat ce validează reciproc modelele matematice dinamice utilizate pentru MSMP și MSEE.

Figurile 10 reprezintă *caracteristicile*  $\omega_{\nu}(t)$ ,  $\omega(t)$ . De reținut prezența simultană a acestor oscilații, mult mai numeroase la MSEE, finalizate cu viteza de sincronism  $\omega_1$ .

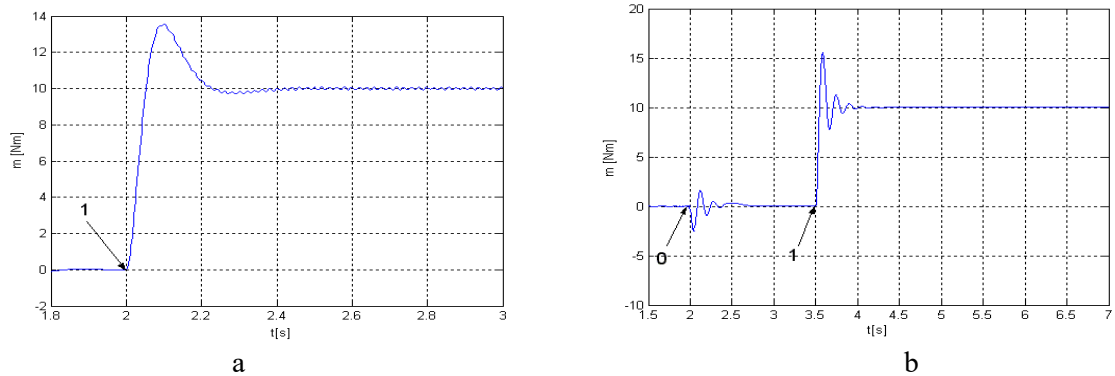


Fig.7. Caracteristicile  $m(t)$ .

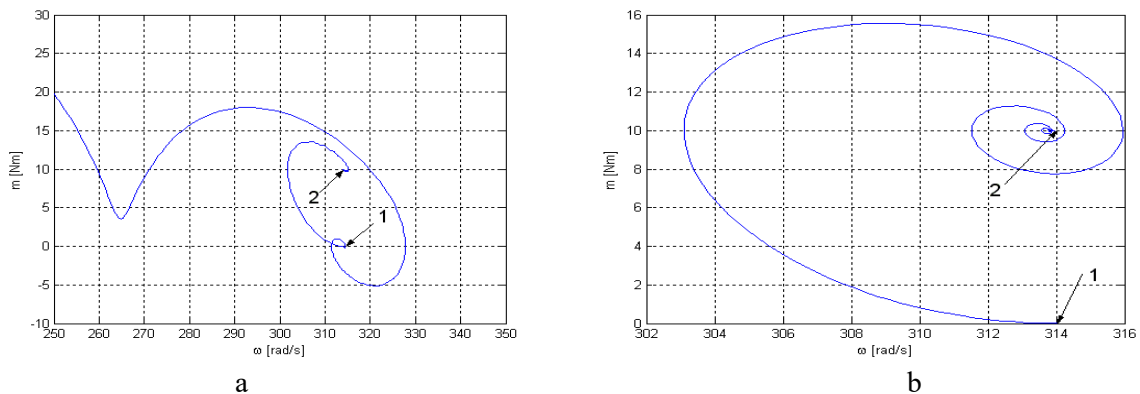


Fig.8. Caracteristicile  $m(\omega)$ .

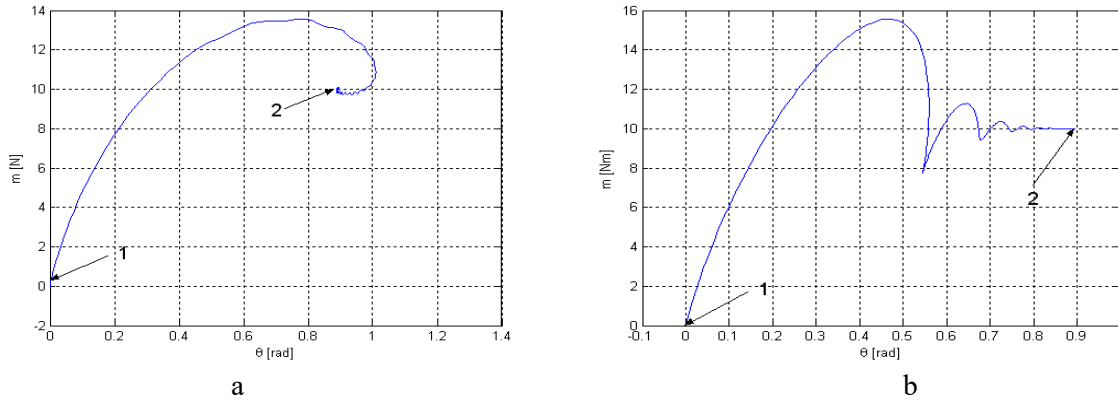


Fig.9. Caracteristicile  $m(\theta)$ .

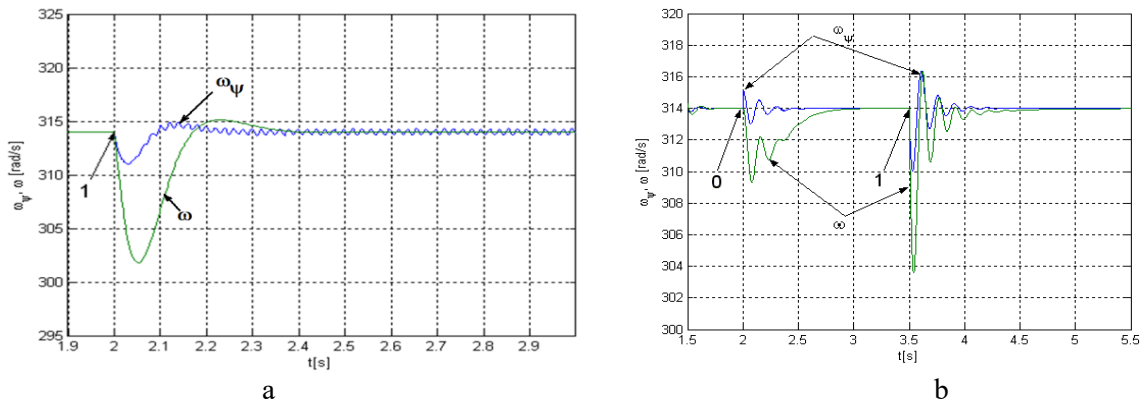
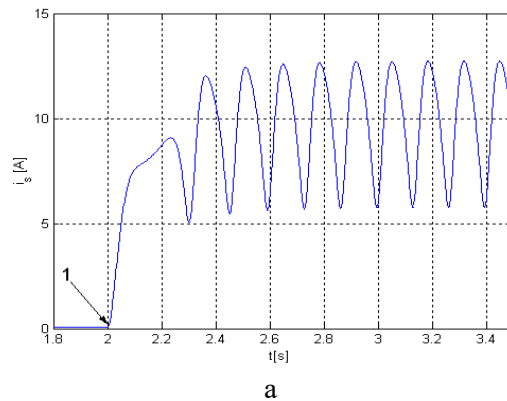


Fig.10. Caracteristicile  $\omega_\psi(t)$ ,  $\omega(t)$ .

Fie  $M_r=15$  Nm. Pentru acest *cuplu*  $M_r$ , mașina sincronă își pierde sincronismul în ambele sisteme de excitație și intră într-o funcționare asincronă oscilantă. Pentru MSEE rămâne șansa restabilirii funcționării sincrone prin forțarea excitației (în reprezentări sunt date evoluțiile spre funcționarea sincronă sau frânarea până la oprire, funcție de momentul aplicării).

Curenții  $i_s(t)$ , (Fig. 11) sunt puternic distorsionați și larg oscilanți (un important regim deformant la MSEE); oscilații importante sunt prezente și la MSMP, dar pe fondul unui regim deformant limitat. În Fig.11.b<sub>1</sub>, 11.b<sub>2</sub>, la aplicarea în momente diferite a excitației sporite la MSEE, se constată nesincronizarea însoțită de curenți sporți, respectiv sincronizarea.



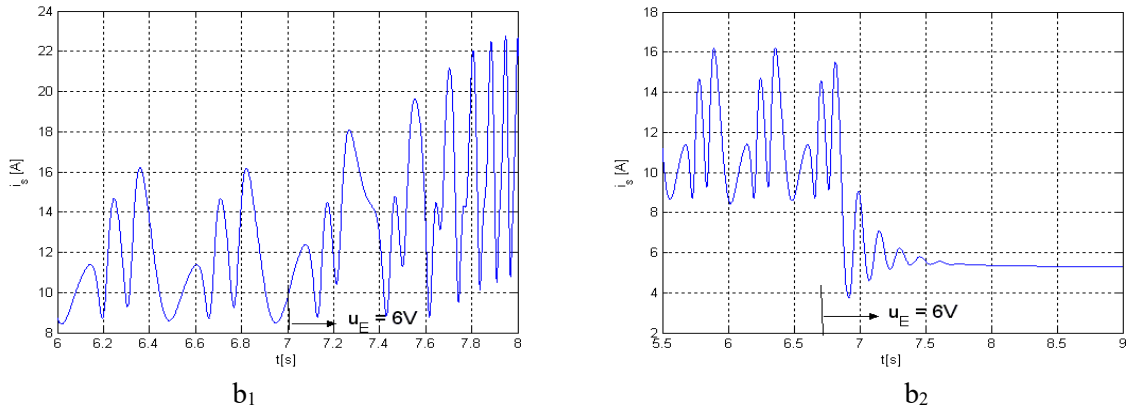


Fig.11. Caracteristicile  $i_s(t)$ .

Caracteristicile  $m(t)$  (Fig. 12), conduc practic la aceleași concluzii ca și pentru  $i_s(t)$ . Figurile 13 privesc reprezentările  $m(\omega)$ . Pentru MSMP este figurată trecerea din punctul de sincronism 1 spre evoluția asincronă, definită de *ciclul limită*. Rezultă, cu claritate, limitele între care oscilează amplitudinile cuplului electromagnetic și vitezele unghiulare ale rotorului. Pentru MSEE trecerea din punctul 1 -> *ciclul limită* este oscilant mai complicată (răspunsul tranzitoriu al înfășurării de excitație); sunt definite și aici zonele de oscilație ale cuplului electromagnetic și vitezei rotorului. În Fig. 13.b<sub>1</sub>, 13.b<sub>2</sub>, la forțarea excitației se detaliază părăsirea ciclului limită și trecerea la o funcționare instabilă, respectiv la oscilații finalizate cu sincronizarea.

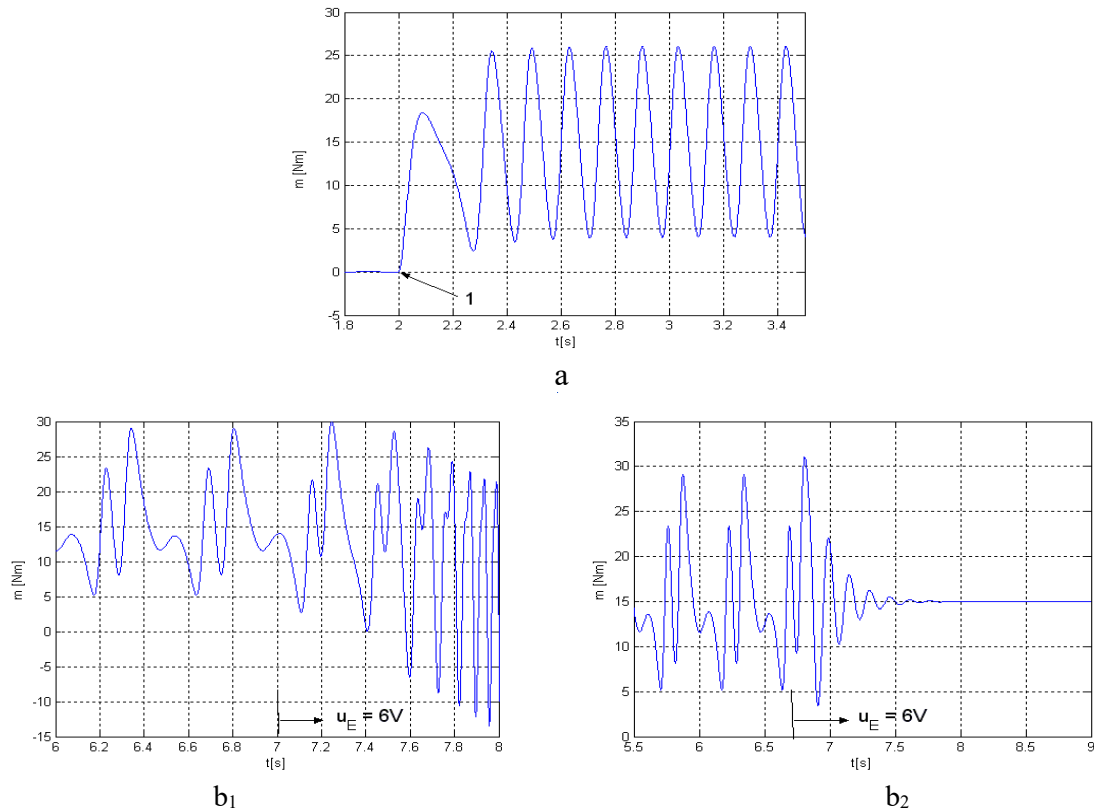


Fig.12. Caracteristicile  $m(t)$ .

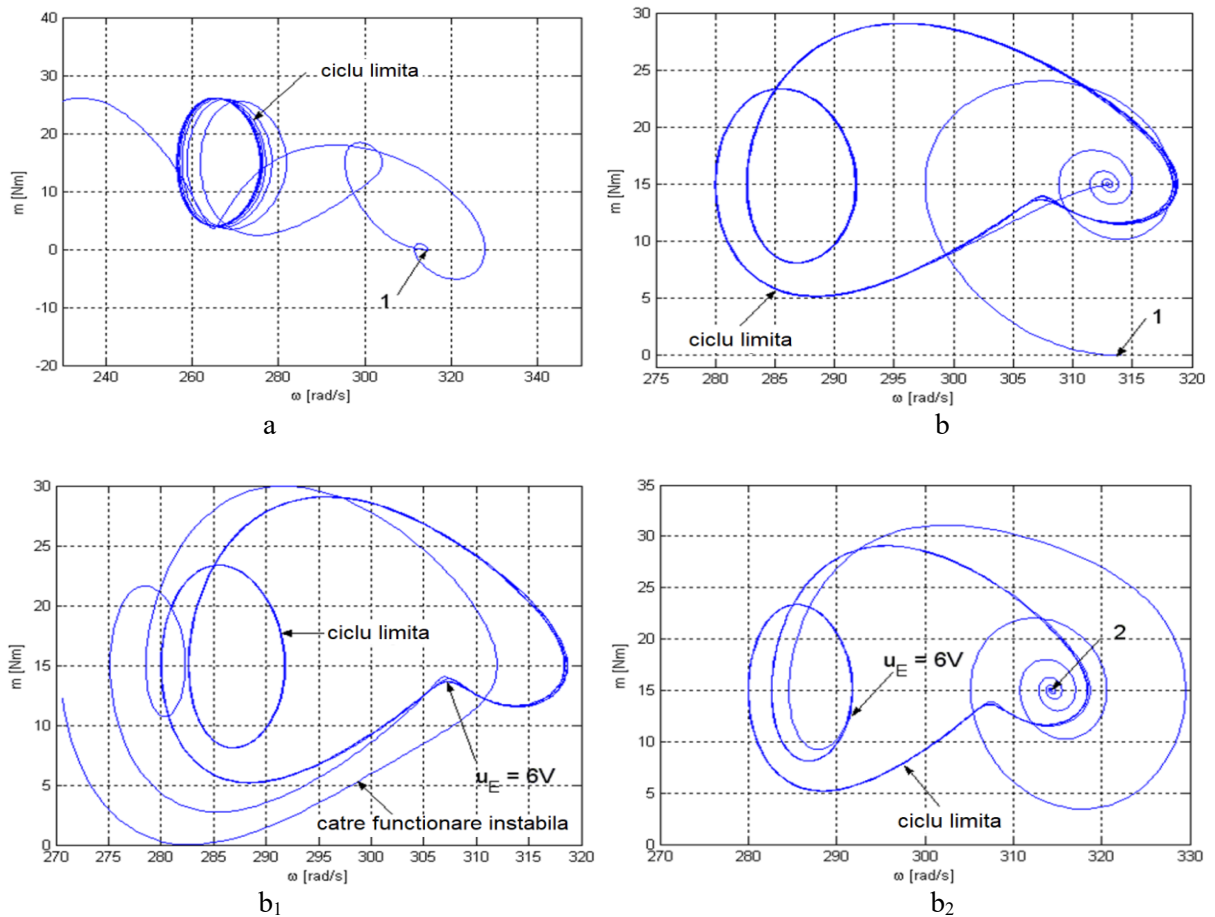
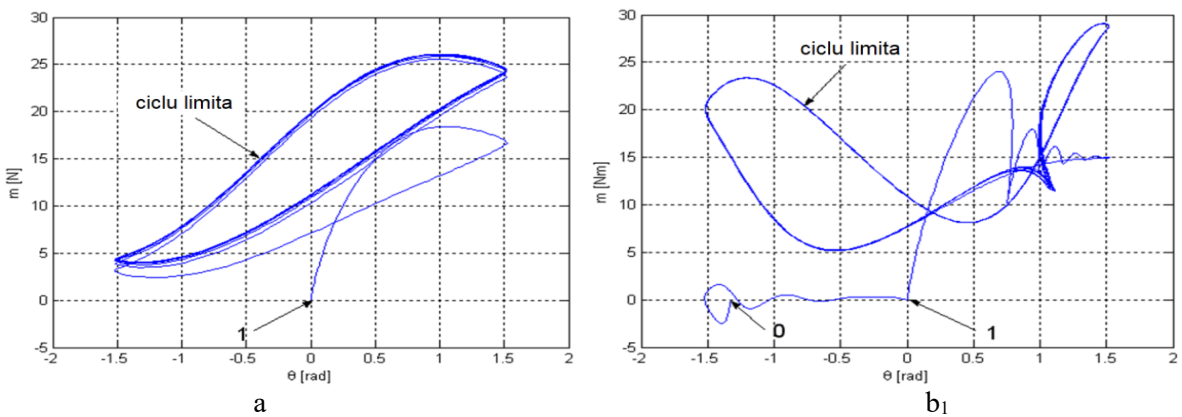


Fig.13. Caracteristicile  $m(\omega)$ .

Figurile 14 reprezintă *caracteristicile*  $m(\theta)$ . cu trecerea la funcționarea asincronă pe ciclurile limită. În Fig. 14.b<sub>1</sub>. este precizata trecerea 1- $\rightarrow$  ciclul limită reprezentat separat în Fig. 14.b<sub>2</sub>. Comparatia ciclurilor limită 14.a și 14.b<sub>2</sub> subliniază regimul puternic deformant de la excitația electromagnetică. În Fig. 14.b<sub>3</sub>, 14.b<sub>4</sub>, se explicitează trecerea spre funcționarea instabilă respectiv sincronă, la forțarea, ca mai sus a excitației. În Fig. 14.b<sub>4</sub>. se reprezintă pentru claritate, finalizarea sincronizării.



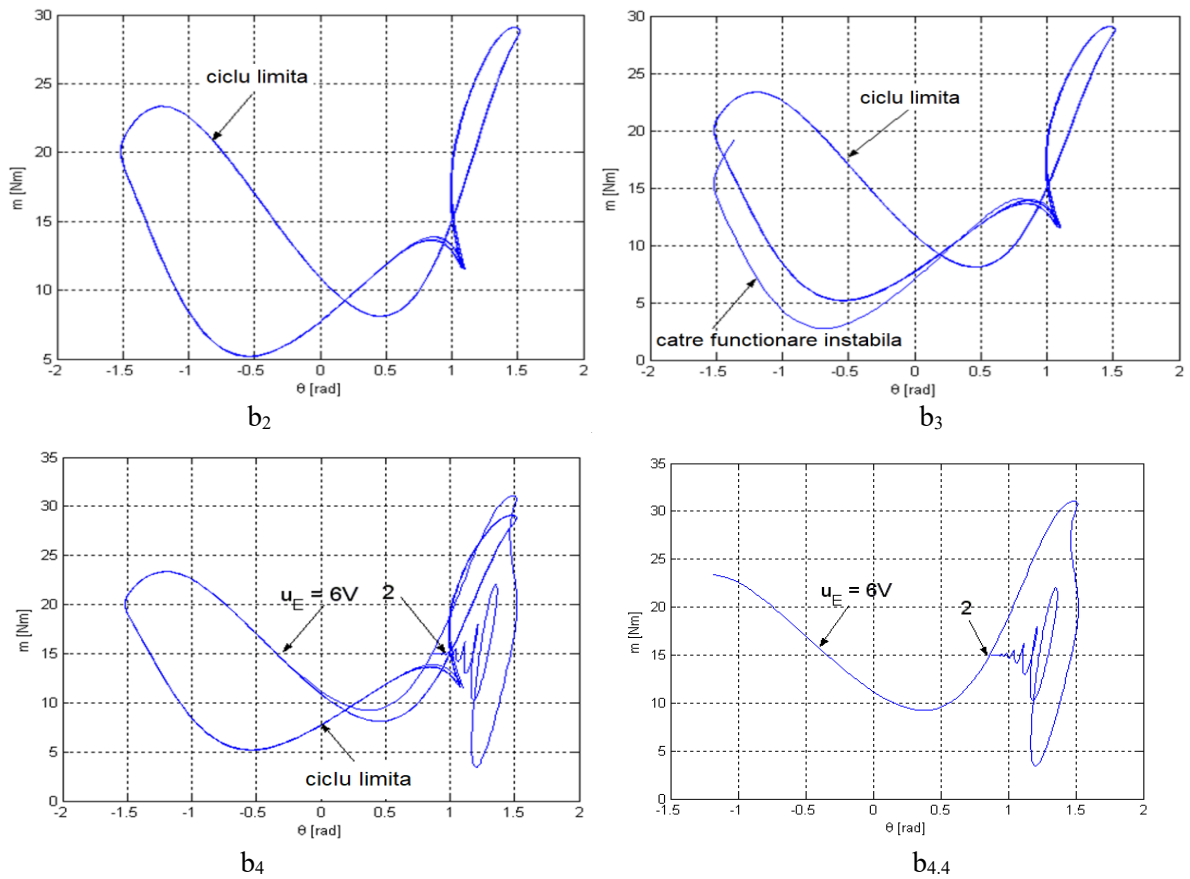
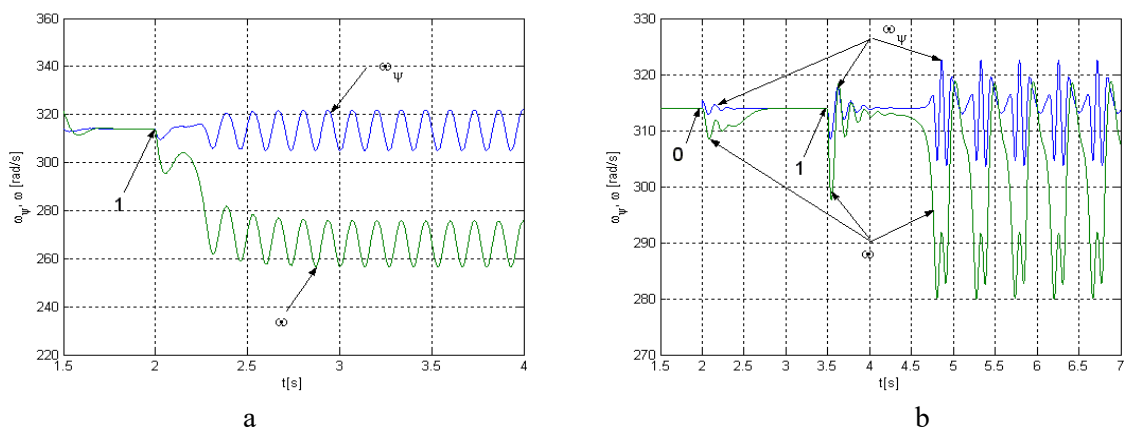


Fig.14. Caracteristicile  $m(\theta)$ .

Simulările din Fig. 15 reprezintă împreună *caracteristicile*  $\omega_\psi(t)$ ,  $\omega(t)$ .

Figura 15.a detaliază pentru MSMP tranziția de la punctul **1** spre o funcționare asincronă cu oscilații practic sinusoidale. Trecerea pentru MSEE la funcționarea asincronă este mult mai zgomotoasă în acord cu regimul deformat evocat. Consecințele aplicării excitației sporite la MSEE sunt evidențiate în Fig. 13.b<sub>2</sub> și 13.b<sub>3</sub>.





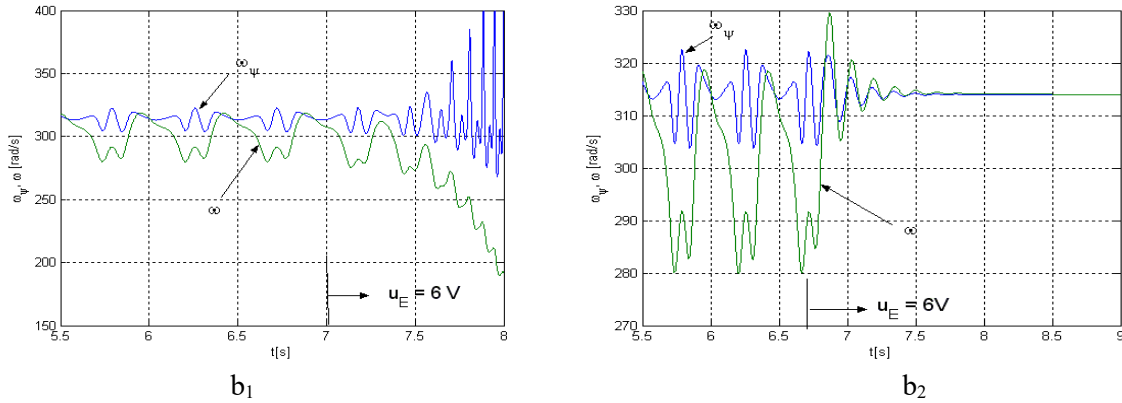


Fig.15. Caracteristicile  $\omega_\psi(t)$ ,  $\omega(t)$ .

### 3. Concluzii

Este reliefat în procesul de pornire cantitativ și calitativ, efectul major negativ al magnetului permanent. Pentru surmontarea acestui efect, MSMP trebuie să dispună de o puternică colivie de pornire.

Pentru ca mașina sincronă cu excitație electromagnetică de comparație, să răspundă favorabil șocurilor majore de sarcină, trebuie să dispună de o puternică colivie de amortizoare. Subliniem problema specială a coliviei rotorice la MSMP care să fie suficient de puternică încât să asigure caracteristici de pornire rezonabile, dar rezistențele  $R_D$ ,  $R_Q$  nu trebuie să fie crescute peste limita necesară, întrucât colivia are și rol de protecție a magnetului permanent și de asigurare a stabilității funcționării la șocurile de sarcină.

Cu valoare de generalitate, în procesul de pornire al mașinilor de curent alternativ, viteza câmpului magnetic principal este foarte accidentată, cu reversări de sens și valori suprasincrone și mult diferită de viteza de sincronism. Aceasta este atinsă la funcționarea staționară simetrică a MI și la sincronismul simetric la mașina sincronă. În afara acestor cazuri particulare, viteza  $\omega_\psi(t)$ , este oscilantă în procesele dinamice, cu atât mai oscilantă cu cât este mai depărtat de  $\omega_l$ . Cu aceeași valoare de generalitate, se subliniază diferența esențială dintre caracteristicile unghiulare dinamice ale mașinii sincrone și cele aferente regimului staționar. Evoluția evocată  $\omega_\psi(t)$ , justifică fundamental dinamica mașinilor de curent alternativ.

### Anexa

- Datele nominale și parametrii MSMP:  $P_n=2,2$  kW,  $U_n=220$  V,  $R_s=2\Omega$ ,  $R_D=R_Q=4,5 \Omega$ ,  $L_{md}=L_{mq}=0,21$  H,  $L_{D\sigma}=L_{Q\sigma}=0,034$  H,  $L_{s\sigma}=0,032$  H,  $p=2$ ,  $J_m=0,048$  km<sup>2</sup>,  $\psi_{pn}=0,98$  Wb;
- Pentru MSEE aceiași parametri ca și ai MSMP, dar cu  $R_D=R_Q=2,4 \Omega$ , înfășurarea de excitație are  $L_{E\sigma}=0,038$  H,  $L_{DE\sigma}=0,015$  H,  $R_E=0,86 \Omega$ ,  $U_E=4$  V ( $\psi_{Ed}=\psi_{pn}$ );
- Pentru MI parametrii sunt identici cu cei ai MSMP.

### CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XIX, ediția 2023.

### Bibliografie

- A. Câmpeanu, *Dinamica mașinilor electrice de curent alternativ*, pp. 399., Ed. AGIR, 2021.