
UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE INGINERIE ÎN ELECTROMECHANICĂ,
MEDIU ȘI INFORMATICĂ INDUSTRIALĂ

**ANALIZA UNOR PROCESE DE BAZĂ
SPECIFICE FUNCȚIONĂRII MOTORULUI SINCRON CU
RELUCTANȚĂ VARIABILĂ**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:
Prof. dr. ing. AUREL CÂMPEANU

DOCTORAND:
Ing. MONICA-ADELA ENACHE

CRAIOVA
2009

CUPRINS

Cuvânt înainte

Lista simbolurilor utilizate

Introducere

1. Stadiul actual în problematica motoarelor sincrone cu reluctanță variabilă (MSRV)
 - 1.1. Introducere
 - 1.2. Variante constructive de MSRV
 - 1.3. Comanda MSRV
2. Modele matematice ale mașinii sincrone în cazul general
 - 2.1. Modelul matematic fără considerarea saturației
 - 2.2. Modelul matematic cu considerarea saturației
3. Modele Matlab-Simulink
 - 3.1. Modele Matlab-Simulink ale MSRV
 - 3.2. Model Matlab-Simulink al unui SA cu convertor static de tensiune și frecvență (CSTF)
4. Influențele parametrilor MSRV pentru cazul funcționării în regim staționar
 - 4.1. Relații de calcul
 - 4.2. Simulări
 - 4.3. Concluzii
5. Influențele parametrilor MSRV pentru cazul funcționării în regim dinamic
 - 5.1. Simularea pornirii în asincron
 - 5.2. Cazul alimentării de la CSTF
 - 5.3. Concluzii
6. Influențele parametrilor MSRV asupra stabilității
 - 6.1. Analiza stabilității statice
 - 6.2. Analiza stabilității dinamice
 - 6.3. Concluzii
7. Determinări experimentale
 - 7.1. Stand de probe pentru încercarea MSRV
 - 7.2. Determinarea parametrilor MSRV
 - 7.3. Determinări experimentale în regim staționar
 - 7.4. Determinări experimentale în regim dinamic
8. Concluzii și contribuții personale

Bibliografie

Anexa 1 - Program de monitorizare a regimurilor dinamice ale MSRV

Anexa 2 - Programe de calcul

Utilizarea pe scară tot mai largă a mașinii sincrone cu reluctanță variabilă ca element de execuție în sistemele automate a impus abordarea tot mai amplă, în lucrările de specialitate, a problemelor referitoare atât la **procesul staționar** cât și la cel **dinamic** al acesteia.

În acest context se impune a fi menționată **problema deosebit de importantă a evaluării corecte a parametrilor și a influențelor acestora asupra comportării mașinii**. Aceasta constituie de fapt subiectul central al tezei de față.

Problemele ce se impun a fi dezvoltate în acest caz sunt imediate.

Astfel, pentru realizarea unui studiu corespunzător în acest domeniu, se impune, în primul rând, evaluarea stadiului actual în problematica analizată.

Apoi, este necesară utilizarea unui model matematic adecvat.

În plus, este nevoie să se cunoască influențele parametrilor asupra comportării mașinii atât în regim staționar cât și dinamic, atât în cazul alimentării convenționale cât și de la convertoare statice, precum și asupra stabilității statice și dinamice.

În final, este nevoie, în mod evident, de verificarea experimentală a concluziilor obținute teoretic, cu accent pe metodele moderne de determinare a parametrilor mașinii.

1. STADIUL ACTUAL ÎN PROBLEMATICA MOTOARELOR SINCRONE CU RELUCTANȚĂ VARIABILĂ

În primul capitol se evaluează stadiul actual al cercetării în problematica analizată. Pentru a evidenția avantajele MSR_V, sunt prezentate o serie de tabele comparative între acestea și motoarele sincrone cu magneti permanenți MSMP, respectiv cele asincrone MA.

Se trec în revistă variantele constructive de MSR_V cu rotație continuă existente, cu avantajele și dezavantajele fiecăreia în parte. Cu acest prilej, sunt evidențiate avantajele construcției laminate axial care permite obținerea celor mai mari valori ale raportului de asimetrie magnetică.

Se insistă, de asemenea, pe metodele actuale de reglare a vitezei acestor motoare, cu reliefarea concluziilor care rezultă dintr-o bibliografie reprezentativă.

2. MODELE MATEMATICE ALE MAȘINII SINCRONE ÎN CAZUL GENERAL

În acest capitol se subliniază importanța pe care o are cunoașterea modelului matematic al MSR_V pentru studiul sistemelor de acționare ce includ asemenea mașini.

În acest context se poate spune că, din punct de vedere al acționării, acesta este optim atunci când generează o structură cât mai simplă a sistemului de reglare. În această situație, întrucât numărul de ecuații și parametri ce intervin în cazul reglării vitezei motoarelor sincrone cu reluctanță variabilă este mare, au fost necesare unele simplificări. Acest fapt duce, însă, la un model care nu reflectă fidel comportarea dinamică a sistemului.

Prin urmare, se impune folosirea unor modele matematice cât mai complete, concretizate într-un număr mare de ecuații diferențiale.

Pornind de la această concluzie, în acest capitol, se prezintă ecuațiile utilizate pentru realizarea analizelor propuse, cu accente pe evidențierea câmpurilor magnetice ale înfășurărilor de excitație, de amortizare și al înfășurării indusului, respectiv pe raportarea înfășurărilor rotorice la stator.

Sunt prezentate aici, în detaliu, ecuațiile de funcționare ale mașinii sincrone nesaturate și saturate, pentru cazul general.

3. MODELE MATLAB-SIMULINK

Capitolul trei este dedicat prezentării modelelor Matlab-Simulink utilizate pentru finalizarea cercetărilor.

Având ca punct de plecare modelele matematice prezentate în capitolul al doilea, au fost realizate două modele Matlab-Simulink ale MSRVR nesaturat (fig. 3.1) și două modele ale MSRVR saturat.

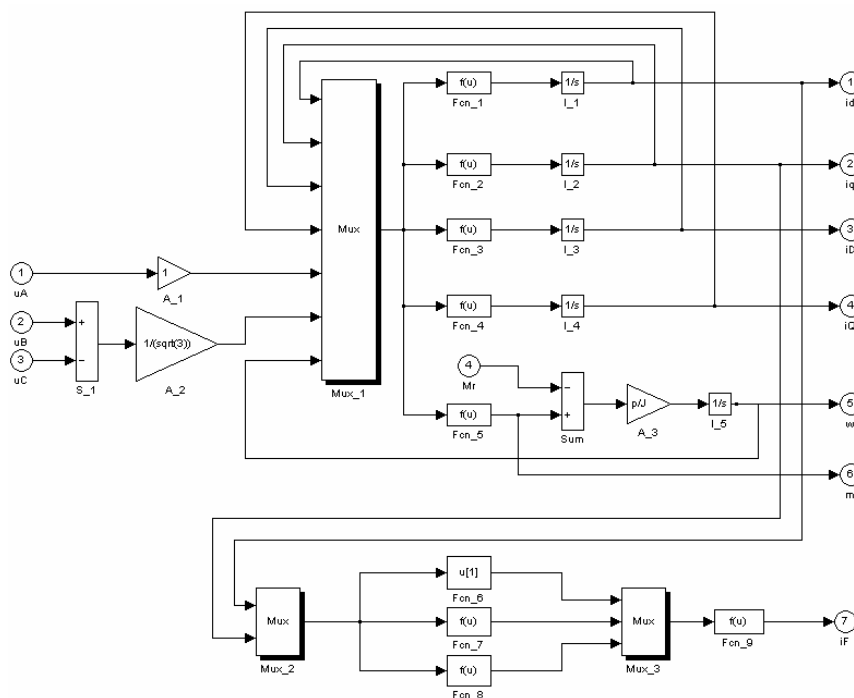


Fig. 3.1. Unul din modelele Matlab-Simulink ale MSRVR nesaturat.

Acest număr relativ mare de modele a fost necesar deoarece, în primul rând, în biblioteca Simulink a ultimelor variante de program nu există un bloc corespunzător și nu este posibilă nici prelucrarea convenabilă a altor blocuri existente și, în al doilea rând, a fost necesară verificarea corectitudinii simulărilor efectuate.

De asemenea, în acest capitol este prezentat și modelul unui convertor static de tensiune și frecvență, considerat reprezentativ (CSTF indirect sursă de tensiune cu comandă PWM și invertor de tensiune cu momente de comutație precalculate). Pentru realizarea acestuia, s-a pus accent pe asigurarea unei construcții modulare, care să permită eventuale adaptări ulterioare.

4. INFLUENȚELE PARAMETRILOR MSRVR PENTRU CAZUL FUNCȚIONĂRII ÎN REGIM STAȚIONAR

În capitolul patru se analizează influențele parametrilor asupra comportării MSRVR în cazul funcționării în regim staționar. Punctul de plecare îl constituie ecuațiile cu considerarea pierderilor în fier care, ulterior, sunt utilizate pentru a surprinde modul în care modificarea parametrilor influențează cuplul electromagnetic.

Sunt prezentate apoi rezultatele rulării unor programe de simulare, realizate într-o manieră modernă, împreună cu **concluziile** care se impun.

Dintre acestea, se pot enumera:

- MSRVR au performanțe tehnice (capacitate de supraîncărcare și factor de putere) cu atât mai bune cu cât gradul de nesimetrie magnetică este mai mare; aceasta justifică preocuparea pentru dezvoltarea soluțiilor constructive ale rotorului cu anizotropie ridicată;
- în cazul motoarelor MSRVR de putere mică se impune luarea în considerare a rezistenței înfășurării indusului, a cărei valoare nu mai poate fi neglijată;
- se constată că acest parametru are influență negativă, concretizată prin scăderea zonei de funcționare stabilă și scăderea valorii cuplului maxim; se menționează că pentru valori relativ crescute ale rezistenței înfășurării ($k_r > 0,15$), avantajele obținute prin creșterea gradului de nesimetrie magnetică devin neesențiale;

- la proiectarea MSR/V se recomandă ca odată cu scăderea puterii nominale să se scadă și tensiunea de alimentare, în acest fel menținându-se valoarea rezistenței înfășurării sub o anumită limită; de asemenea, se urmărește obținerea unei valori cât mai mari a lui X_d , prin adoptarea unui întrefier cât mai mic, ambele soluții ducând la scăderea raportului k_r .

Pentru exemplificare, se prezintă în acest rezumat câteva grafice exemplificative (fig. 4.1).

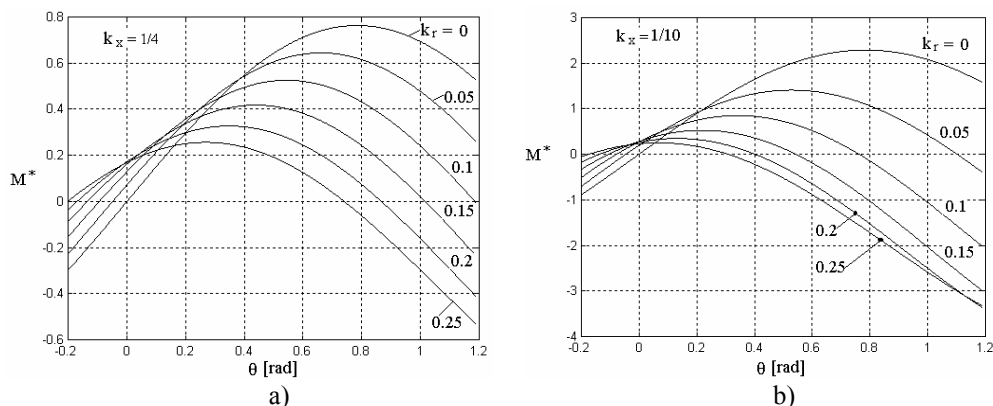
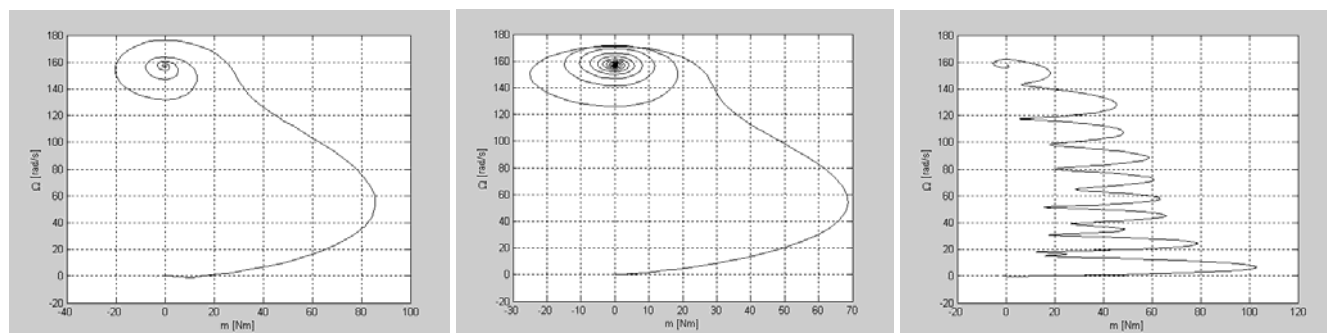


Fig. 4.1. Caracteristici unghiulare statice pentru: a) $k_x=1/4$; b) $k_x=1/10$.

5. INFLUENȚELE PARAMETRILOR MSR/V PENTRU CAZUL FUNCȚIONĂRII ÎN REGIM DINAMIC

În capitolul cinci se analizează influențele parametrilor pentru cazul funcționării în regim dinamic. Pentru aceasta, cu ajutorul programelor detaliate în capitolul 3, s-a simulat cazul pornirii în asincron (fig. 5.1) și cel al alimentării de la CSTF.



a) Parametri reali ($R_D=1,5 \Omega$, $J=0,005 \text{ kgm}^2$)

b) $R_D=3 \Omega$

c) $J=0,05 \text{ kgm}^2$

Fig. 5.1. Caracteristicile $m=f(\Omega)$ pentru diferite valori ale parametrilor MSR/V.

În urma finalizării analizei, au fost obținute următoarele **concluzii** semnificative:

- creșterea valorii rezistenței R_D conduce la creșterea duratei regimului tranzitoriu;
- o valoare mică a rezistenței R_Q , chiar și la un cuplu rezistent nul, și un moment de inerție mic, poate conduce la o funcționare instabilă;
- creșterea valorii inductivității de dispersie a statorului are efect ușor stabilizator;
- creșterea valorii momentului de inerție determină, de asemenea, o sincronizare după un număr mare de oscilații ale curentului;
- viteza este sensibil dependentă de valorile parametrilor aleși, în special de cea a momentului de inerție (pentru un J crescut, se reduc oscilațiile vitezei dar crește timpul de pornire);
- în cazul pornirii în sarcină rotorul are, inițial, o tendință de rotație în sens contrar câmpului inductor; în plus, valoarea de regim staționar a curentului are o tendință firească de creștere;
- curentul de șoc nu este puternic condiționat de variația parametrilor, iar pornirea în sarcină nu determină creșterea semnificativă a acestui curent față de cazul pornirii în gol;

- în cazul alimentării de la CSTF, se observă că pentru situațiile creșterii valorii rezistenței R_D , a scăderii lui R_Q și a creșterii pronunțate a momentului de inerție, crește durata regimului tranzitoriu analizat.

6. INFLUENȚELE PARAMETRILOR MSRVS ASUPRA STABILITĂȚII

În capitolul șase se analizează influențele parametrilor motoarelor sincrone cu reluctanță variabilă asupra stabilității.

S-a dezvoltat aici o demonstrație analitică ce subliniază efectele parametrilor asupra stabilității statice:

- stabilitatea este cu atât mai mare cu cât raportul L_q/L_d este mai apropiat de 1;
- pentru a obține un domeniu de stabilitate cât mai mare, trebuie ca R_s să fie cât mai redusă;
- stabilitatea crește atunci când valoarea inductivității L_{mq} crește.

De asemenea, capitolul cuprinde o serie de simulări ale comportării în regim dinamic, pentru diverse cazuri particulare, care pun în evidență influențele diverselor perturbații asupra stabilității dinamice.

În urma finalizării analizei au fost obținute următoarele **concluzii**:

- MSRVS se comportă diferit față de șocurile de cuplu de valori diferite, la același moment de inerție (ieșirea din sincronism este condiționată de valoarea șocului aplicat);
- stabilitatea dinamică scade odată cu scăderea tensiunii de alimentare (scăderea sub o anumită valoare conduce la pierderea sincronismului) (fig. 6.1);
- același șoc de cuplu are influențe diferite în funcție de momentul de inerție total existent;
- stabilitatea dinamică a MSRVS este dependentă atât de mărimea și caracterul perturbației, cât și de condițiile inițiale;
- cu ajutorul simulărilor realizate, se poate determina limita de stabilitate dinamică pentru orice MSRVS, ceea ce reprezintă un instrument important de lucru pentru proiectanții de asemenea motoare.

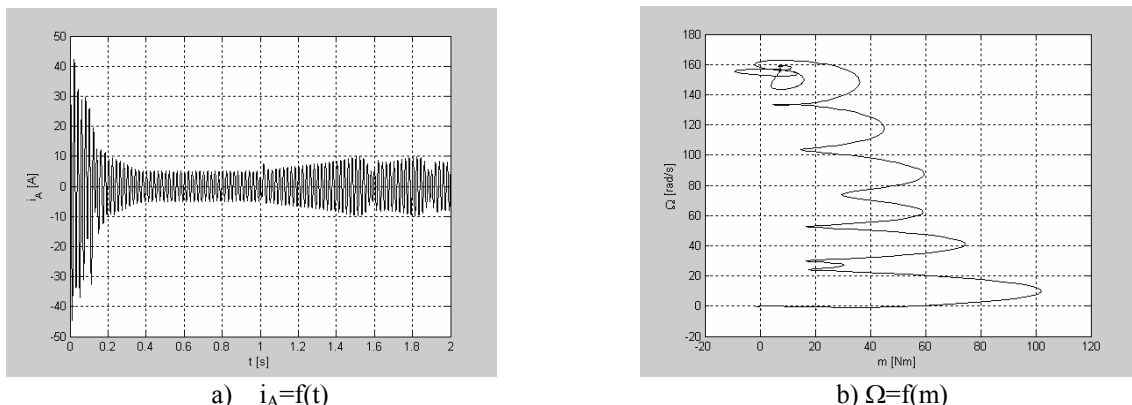


Fig. 6.1. Caracteristici obținute pt. cazul scăderii tensiunii la valoarea $U=170V$ ($M_r=7,6 \text{ Nm}$, $J=0,025 \text{ kgm}^2$).

Se subliniază faptul că MSRVS este foarte sensibil la variația parametrilor. Rezultă de aici **importanța acestor simulări în proiectarea mașinii**. O proiectare fără a se face, în prealabil, simulări privind comportarea în funcție de diferite valori ale parametrilor, este o greșeală. Aceste simulări apar ca o predeterminare utilă a parametrilor. În acest fel, se pun la dispoziția proiectantului informații utile, absolut necesare. El știe astfel care sunt parametrii ce trebuie evitați.

7. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE

Se prezintă aici standul de probe conceput și realizat de autoare în cadrul Facultății de Inginerie în Electromecanică, Mediu și Informatică Industrială din Craiova (fig. 7.1).

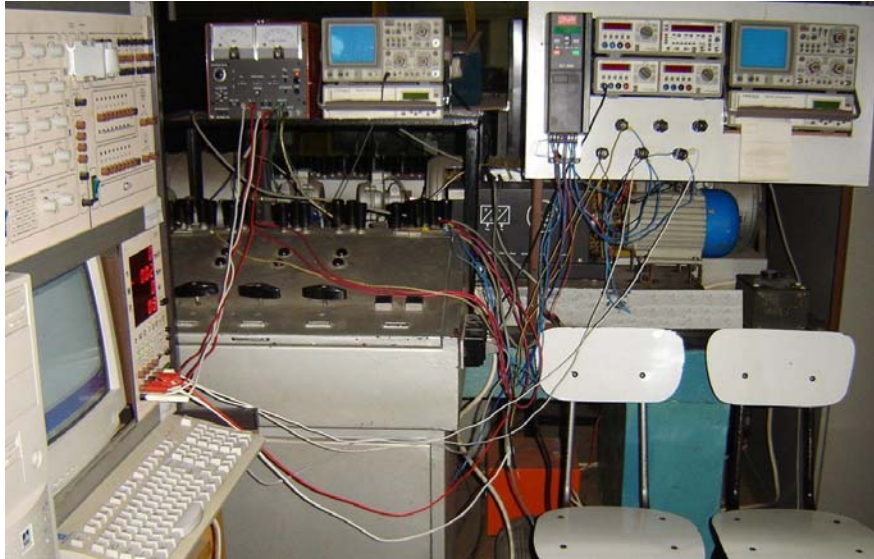


Fig. 7.1. Fotografie montaj experimental.

Se subliniază posibilitatea utilizării acestui stand pentru monitorizarea atât a proceselor staționare, datorită utilizării multimetrului numeric ELWE M13 și a interfeței ELWE Comenius, cât și a proceselor dinamice, datorită utilizării plăcii de achiziție de date Keithley KPCI 3102.

Se exemplifică apoi câteva cazuri concrete de determinări efectuate:

- determinarea parametrilor MSR_V (rezistența statorică, inductivitatea sincronă longitudinală, inductivitatea sincronă transversală, reactanța de dispersie, inductivitatea de magnetizare, reactanțele supratranzitorii și momentul de inerție);
- determinări experimentale în regim staționar (care validează concluziile obținute în capitolul patru);
- determinări experimentale în regim dinamic (ce confirmă concluziile detaliate în capitolele cinci și șase).

O mențiune specială pentru metoda stingerii curentului, ce permite determinarea reactanțelor sincrone, metodă care are, în cadrul acestui capitol, o materializare original.

Această metodă prezintă mai multe avantaje notabile: nu este nevoie de cuplarea MSR_V cu o altă mașină de antrenare, montajul este ușor de realizat, durata probei este foarte mică, consumul de energie este neglijabil.

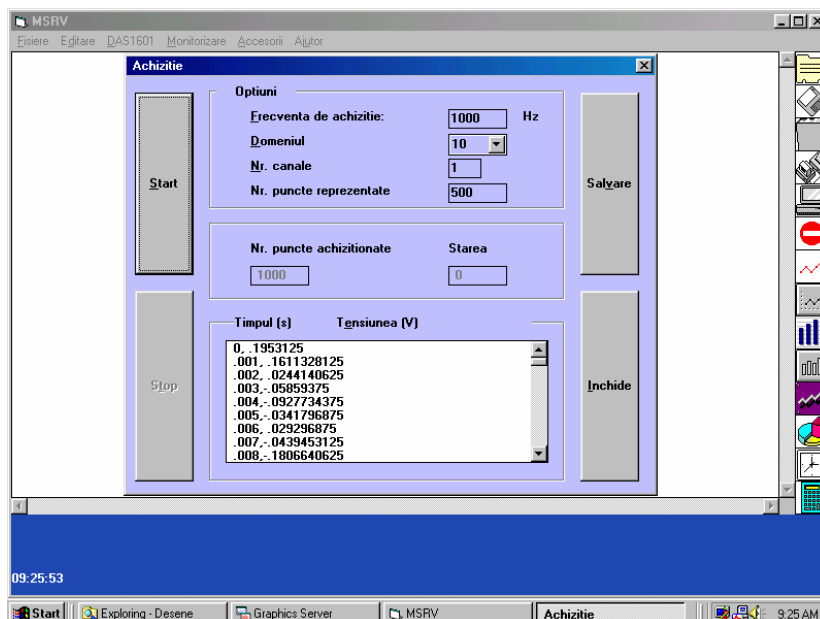


Fig. A.1. Fereastra “Achiziție” a programului realizat în Visual-Basic.

În finalul lucrării sunt prezentate două **anexe** care subliniază complexitatea și nivelul programelor realizate. O mențiune deosebită se impune a fi făcută pentru programul de monitorizare a regimurilor dinamice a MSR_V, realizat în Visual Basic, program care prezintă o serie de facilități: permite configurarea plăcii de achiziții de date, asigură achiziția corespunzătoare a semnalului dinamic dorit (fig. A.1), permite vizualizarea în diferite formate a semnalului achiziționat, permite editarea fișierelor ascii de date obținute, permite salvarea și tipărirea datelor, asigură accesul la o serie de accesorii utile în timpul lucrului, permite configurarea corespunzătoare a interfeței de lucru etc.

8. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Lucrarea de față constituie o sinteză a activității de cercetare fundamentală și aplicativă desfășurată de autoare în domeniul mașinilor electrice speciale.

Obiectivul principal al tezei îl constituie analiza unor procese staționare și dinamice ale motoarelor sincrone cu reluctanță variabilă.

Pornindu-se de la acest obiectiv, a fost dezvoltat un sistem computerizat pentru achiziții de date împreună cu pachetele de programe de analiză și simulare aferente.

Dintre **contribuțiile** aduse de autoare în cadrul acestei lucrări, se pot enumera:

- realizarea unei analize unitare a principalelor modele matematice cu parametri concentrați ale mașinii sincrone, cu și fără considerarea saturației, utilizate în studiul regimurilor dinamice ale acesteia;
- finalizarea unui studiu, în regim staționar, privind influențele parametrilor MSR_V asupra cuplului, capacității de supraîncărcare și factorului de putere;
- realizarea unui studiu care vizează influențele parametrilor asupra funcționării în regim dinamic a MSR_V, în particular pentru cazul pornirii în asincron și al alimentării de la un CSTF indirect sursă de tensiune cu comandă PWM și invertor de tensiune cu momente de comutație precalculate;
- finalizarea unei analize detaliate a efectelor parametrilor MSR_V asupra stabilității statice;
- realizarea unui studiu care vizează stabilitatea dinamică în cazul apariției accidentale a diverselor perturbații externe;
- realizarea unui pachet de programe Matlab pentru studiul influențelor parametrilor asupra cuplului MSR_V;
- realizarea unor variante de modele Matlab-Simulink ale mașinii sincrone cu reluctanță variabilă, cu și fără considerarea saturației;
- realizarea unui pachet de programe Matlab-Simulink de simulare a funcționării MSR_V în regim dinamic;
- realizarea unui model Matlab-Simulink al unui CSTF indirect sursă de tensiune cu comandă PWM și invertor de tensiune cu momente de comutație precalculate (conceput modular pentru a permite eventuale adaptări ulterioare);
- realizarea unor încercări experimentale de determinare a reactanțelor sincrone ale MSR_V prin metoda descreșterii unui curent continuu prin înfășurarea statorului;
- realizarea unor determinări experimentale care vizează influențele parametrilor asupra cuplului MSR_V, ce confirmă simulările efectuate;
- finalizarea unor determinări experimentale în cazul pornirii în asincron a unui MSR_V, care validează simulările efectuate;
- realizarea unui ansamblu de fișiere suport pentru programarea vizuală a plăcii de achiziție KPCI 3102;
- realizarea unui program VISUAL BASIC original de monitorizare a regimurilor dinamice a MSR_V;
- conceperea și realizarea unui stand de monitorizare a funcționării MSR_V în regim dinamic (utilizând o placă de achiziție de date Keithley KPCI 3102).

BIBLIOGRAFIE (selecție)

1. ENACHE, M.A., CÂMPEANU, A.: Aspects Regarding Influences of Reluctance Synchronous Motors Parameters on the Electromagnetic Torque, Proceedings of SIELMEN 2009, 8-9 Octombrie, Iași, ISBN 978-606-520-618-2, p. II-255-259.
2. ENACHE, M.A., CÂMPEANU, A., NICA, C.: Aspects Regarding Asynchronous Starting of Reluctance Synchronous Motors, CNAE 2008, Scientific Bulletin of the POLITEHNICA University of Timișoara, Romania, Transaction of Power Engineering, 2008, ISSN 1582-7194.
3. ENACHE, M.A., ENACHE, S., DOBRICEANU, M: Considerations Regarding Dynamic Regimes of Reluctance Synchronous Motors, Proceedings SPEEDAM 2008, Ischia, Italia, p. 278-283, **ISI** Web of Science.
4. ENACHE, M.A., ENACHE, S., DOBRICEANU, M: Considerations Regarding Determination of the Synchronous Motors Parameters, International Electric Machines and Drives Conference IEMDC '07, Antalya, Turcia, CD version, ISBN: 1-4244-0743-5, Library of Congress: 2006935481, **ISI** Web of Science.
5. ENACHE, M.A., NICA, C., IVANOV, S.: Aspects Regarding Modelling of Reluctance Synchronous Motors, Analele Universității din Craiova, Seria: Inginerie electrică, Anul 31, nr. 31, Vol. II, 2007, ISSN 1842-4805.
6. ENACHE M.A., NICĂ, C.: Aspects Regarding Reluctance Synchronous Motors Electromagnetic Torque, Ploiești, Buletinul Universității Petrol-Gaze din Ploiești 2006, ISSN 1224-8495, p. 59-65.
7. ENACHE, M.A., NICĂ, C.: Influențele parametrilor înfășurării indusului asupra cuplului motoarelor sincrone cu reluctanță variabilă, Simpozionul Zilele electrotehnicii românești, Craiova, 2005.
8. ENACHE, M.A.: Considerations Regarding Advantages of Reluctance Synchronous Motors, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, 2006, Tomul LII (LVI), Fasc. 5A, ISSN 1223-8139, p. 305.
9. ENACHE, M.A.: Stadiul actual de informare în problematica motoarelor sincrone cu reluctanță variabilă, Referat doctorat, Craiova, 2005.
10. ENACHE, M.A.: Determinarea parametrilor mașinii sincrone cu reluctanță variabilă aferenți regimurilor staționar și dinamic, Referat doctorat, Craiova, 2006.
11. ENACHE, M.A.: Modelul matematic al motorului sincron cu reluctanță variabilă și comportarea acestuia în regim dinamic, Referat doctorat, Craiova, 2006.
12. ENACHE, S., ENACHE, M.A.: Noțiuni fundamentale de mașini și micromașini electrice, Editura Universitaria, Craiova, 2008.
13. ENACHE, S., ENACHE, M.A., DOBRICEANU, M., DRIGHICIU, M., PETRIȘOR, A.: Motor Parameters Influence on Stability of Drive for Industrial Robot, 5th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO 2008, Funchar-Madeira, Portugal, May 11-15, 2008, **ISI** Web of Science.
14. ENACHE S., VLAD I., ENACHE M.A.: Test Bench for Reluctance Synchronous Motors, Analele Universității din Craiova, Seria: Inginerie electrică, Anul 31, nr.31, Vol.II, 2007, ISSN 1842-4805, p. 122-125.
15. ENACHE, S., VLAD, I., ENACHE, M.A.: Considerations Regarding Influences of Reluctance Synchronous Motors Parameters on the Asynchronous Starting, Proceedings of SIELMEN 2009, 8-9 Octombrie, Iași, ISBN 978-606-520-618-2, p. II-251-254.
16. ENACHE, S., CAMPEANU, A., VLAD, I., ENACHE, M.A., PETROPOL, G.: Calitatea energiei și compatibilitatea electromagnetică ale sistemelor de acționare cu motoare sincrone reluctante, Contract CNC SIS A, 2007-2008, nr. 27 GR/11.05.2007, cod 627.