

REZUMATUL TEZEI

În condițiile societății contemporane, lucrarea cu titlul „Contribuții privind stabilirea performanțelor motorului asincron de tracțiune”, abordează o temă de cercetare consacrată, deosebit de complexă și îndelung studiată, privită dintr-o nouă perspectivă, cea a utilizării motorului asincron, ca răspuns la rezolvarea problematicii de transport în preocuparea generală pentru un „mediu înconjurător mai curat”.

Prezenta temă de cercetare se înscrie în mod direct între preocupările fundamentale de cercetare privind optimizarea funcționării mașinilor electrice, ale catedrei de „Mașini Electrice și Ingineria Mediului” și face apel și la studiile și experimentările catedrelor de „Electromecanică” (secția Tracțiune Electrică) și „Acționări Electrice” ale Facultății de Inginerie în Electromecanică, Mediu și Informatică Industrială, a Universității din Craiova.

Subiectul propus a impus o amplă documentare bibliografică asupra cercetărilor efectuate și publicate în domeniul tracțiunii electrice, al mașinilor electrice, și nu numai.

De ce tracțiunea electrică? Deoarece transportul feroviar poate fi un răspuns sigur la problematica de mediu privind utilizarea energiilor nepoluante.

De ce motorul asincron? Un prim motiv este dat de avantajele clasice ale motorului asincron, privind robustețea acestuia și siguranța în funcționare, avantaje care îl fac cel mai des întâlnit în diverse aplicații industriale. Pe de altă parte, randamentul energetic superior, câștigul în volum, asigurat de aplicarea noilor tehnologii asupra acestor motoare și invertoare asociate, au făcut din motorul asincron candidatul ideal pentru optimizarea tracțiunii electrice. O componentă importantă a alegerii motorului asincron ca obiect de studiu a fost oportunitatea oferită de dezvoltarea instrumentelor matematice disponibile și puterea crescândă a calculatoarelor, care au permis trecerea de la proiectarea pragmatică a mașinii de inducție la o proiectare și modelare numerică a acesteia, grație unei cunoașteri profunde a fenomenului sintetizării sub formă de unelte de calcul și optimizare.

Prin urmare, *obiectivele* de lucru ale temei de cercetare, propuse și realizate au fost:

1. Sintetizarea cunoștințelor cu privire la problematica transporturilor în contextul politicilor de mediu actuale;
2. Trecerea în revistă a sistemelor de tracțiune cu motoare asincrone existente și a proiectelor viitoare;
3. Sinteza teoretică de bază necesară studiului motorului asincron de tracțiune;
4. Aplicații ale calculului numeric în analiza și simularea unor regimuri dinamice de funcționare specifice motorului asincron de tracțiune.

5. Utilizarea calculului numeric în proiectarea optimală a motorului asincron de tracțiune;
6. Încercări experimentale care simulează funcționarea unui lanț de tracțiune „cale de rulare – motor asincron”.

În *primul capitol* s-a realizat o scurtă prezentare a evoluției în timp a tracțiunii electrice cu motoare asincrone. Pornind de la contextul internațional și național actual al tracțiunii electrice, a fost etapizată această evoluție, încercând să se sublinieze legătura permanentă dintre necesitatea socială la care trebuia să răspundă, la un moment dat, o soluție novatoare propusă și posibilitatea de realizare practică a acesteia.

În lucrare sunt evidențiate patru etape în evoluția tracțiunii electrice: tracțiunea electrică cu motoare asincrone alimentate direct de la linia de contact, tracțiunea electrică cu motoare asincrone alimentate prin intermediul convertoarelor rotative, tracțiunea electrică cu motoare asincrone alimentate prin intermediul invertoarelor și tracțiunea electrică de mare viteză.

Pentru etapa actuală, cea a tracțiunii electrice de mare viteză, a fost realizată o analiză sintetică a problemelor identificate la trecerea la acest tip de tracțiune, însoțită de o clasificare a tipurilor de probleme, de precizarea efectelor negative identificate pentru fiecare problemă și a modului de rezolvare a acestora.

Următorul punct de interes în studiul sistemului de tracțiune a fost particularizarea motorului asincron de tracțiune. Au fost precizate și analizate condițiile impuse motorului de regimurile de funcționare, specifice tracțiunii electrice: funcționare la cuplu constant și la putere constantă.

Sinteza bibliografică realizată a permis prezentarea structurii generale a circuitului energetic al vehiculelor electrice feroviare acționate cu motoare electrice asincrone cu rotorul în scurtcircuit, cu evidențierea funcționării invertoarelor de tensiune asociate acestora.

Tot în acest capitol sunt prezentate evolutiv diferite scheme funcționale ale mașinii de asincrone folosită în tracțiune.

Ultimul paragraf este dedicat sistemului de tracțiune în general. Se analizează fenomenul de aderență și modul în care, prin comanda corespunzătoare a mașinii asincrone, aceasta poate fi folosită eficient.

Tot în acest capitol s-a realizat o sinteză asupra regimului dinamic al tracțiunii feroviare (stabilirea regimurilor de mers și a diagramelor de mers), în scopul evidențierii constrângerilor impuse motoarelor de tracțiune din punct de vedere al vitezei de deplasare.

Ca o concluzie generală a acestui capitol se desprinde faptul că schemele structurale ale mașinii asincrone de tracțiune ilustrează interacțiunile dintre diferitele

variabile care descriu funcționarea motorului și sunt definite de un sistem de ecuații puternic neliniar, a cărui rezolvare impune utilizarea calculului numeric.

În *capitolul al doilea* accentul studiului s-a mutat pe mașina asincronă ca sistem tehnic modelat matematic și numeric.

Pornind de la introducerea fazorului reprezentativ ca instrument de analiză a mașinii asincrone, au fost definite ecuațiile generalizate ale acesteia și schemele echivalente unitare aferente acestora, pentru un *studiu teoretic unitar* al proceselor staționare și tranzitorii dintr-o mașină asincronă, a cărei funcționare se dorește a fi optimizată. *În urma analizei făcute, s-a demonstrat că, pe o cale unitară și directă se pot regăsi scheme echivalente generalizate, valabile atât în regim tranzitoriu cât și staționar.*

Deoarece motorul asincron de tracțiune funcționează la frecvență variabilă, a fost realizată o analiză a funcționării mașinii asincrone la frecvență variabilă, în regim staționar, având drept scop determinarea parametrilor tehnico-economici optimi pentru funcționarea mașinii la frecvențe sub cea nominală astfel încât să rezulte expresii analitice ce permit precizarea tuturor mărimilor ce definesc comportarea mașinii.

Prin particularizarea parametrului α , din ecuațiile generalizate, s-au analizat diverse situații de funcționare ale mașinii: funcționarea la $U_1 / \omega_1 = ct$; la $\psi_{sh} = ct$; la $\psi_{sh\alpha} = ct$. Pentru fiecare situație, modelele matematice obținute au fost simulate numeric folosind programarea în Matlab, pentru a da informații calitative și cantitative asupra variației mărimilor de interes ($\psi_{sh}(\omega_2)$, $I_1(\omega_2)$, $M(\omega_2)$, $M_{kM}(\omega_1)$, $M_p(\omega_1)$, $\omega_{2k}(\omega_1)$, la $U_1 / \omega_1 = ct$; $U_1(\omega_1)$ la $\psi_{sh} = ct$, $\omega_2 = ct$, $U_1(\omega_2)$ la $\psi_{sh} = ct$, $\omega_1 = ct$, pentru mașini de 100 – 1000kW). Analiza modelelor matematice și a simulărilor numerice a fost făcută pentru a evidenția avantajele sau dezavantajele folosirii mașinii asincrone, descrise de acestea, în tracțiunea electrică.

Pentru studiul regimului dinamic al motorului de tracțiune au fost elaborate modelele matematice ale mașinii asincrone saturate, care pot fi folosite în simularea unor aspecte specifice funcționării acesteia (sarcină variabilă, variație a tensiunii de alimentare, etc.). Acest aspect era necesar de surprins în lucrare deoarece înalta precizie a simulării comportării mașinii asincrone în timpul proceselor dinamice este oferită de evidențierea influenței saturației magnetice asupra modelelor matematice utilizate. S-au făcut anumite particularizări ale modelelor de bază pe cazuri concrete ce pot fi întâlnite în tracțiunea electrică.

Originalitatea capitolului constă în conceperea programelor numerice de simulare a funcționării mașinii asincrone la frecvență variabilă.

Capitolul al treilea este destinat proiectării optimale a mașinii asincrone de tracțiune, sub constrângerile de minimizare a dimensiunilor, a temperaturii, a zgomotului, în condițiile dezvoltării durabile, în care sunt abordate aspecte ale reciclabilității. Se urmărește o proiectare optimală bazată atât pe tradiționala experiență cât și pe utilizarea uneltelor matematice și numerice. Este cunoscut faptul că, mult timp, proiectarea mașinilor electrice a fost realizată pe baza capitalizării experienței. Acest aspect pragmatic nu a fost neglijat în lucrare, dar deoarece puterea crescândă a calculatoarelor a permis întoarcerea spre abordări mai formale, care necesită în schimb o bună cunoaștere a fenomenelor fizice ce au loc în mașinile electrice, proiectarea optimală propusă se va baza pe calculul numeric.

Este urmărită metodică de proiectare și construcție a motoarelor asincrone de tracțiune. Sunt prezentate aici cele mai importante etape și relații de calcul. Se fac referiri asupra literaturii de specialitate, sunt prezentate aspectele noi ale proiectării și tehnologiilor existente la S.C. Electroputere S.A. și sunt precizate contribuțiile personale pe această direcție.

Un paragraf de asemenea important și cu întindere mare, este cel al optimizării. Se pornește de la o enumerare succintă și clară a principalelor metode și criterii de optimizare, cu posibilități de aplicare concretă, puse la dispoziția proiectanților de către aparatul de calcul matematic. Se trece apoi la proiectarea optimală a motoarelor de tracțiune asincrone utilizând criteriile selecționate. Astfel, se stabilește funcția obiectiv, variabilele principale, restricțiile constructive și cele impuse variabilelor.

Se fac o serie de optimizări locale din care rezultă influența variabilelor alese (pătura de curent, inducția magnetică din întrefier, densitățile de curent din înfășurările stator și rotor) asupra gabariturii, costului de fabricație și de exploatare ale motoarelor.

Rezultatele și concluziile acestui capitol evidențiază corectitudinea soluțiilor obținute pe baza criteriilor menționate, prin comparație cu un motor de curent continuu deja existent la locomotiva diesel electrică LDE 2100 aflată în exploatare la CFR. În acest fel se justifică propunerea de modernizarea propusă pentru acest tip de locomotivă, de a se înlocui vechile motoare de tracțiune de curent continuu cu altele noi, asincrone mai performante.

În partea finală a capitolului este prezentat programul de trasarea cu ajutorul calculului numeric a caracteristicilor de funcționare și mecanice la motoarelor de tracțiune proiectate, cu considerarea exactă a parametrilor mașinii, a fenomenului de saturație, și refulare la diverse frecvențe.

Sunt prezentate reprezentări grafice, unde sunt analizate criteriul principal costurile și alte criterii: dimensiunile de gabarit, caracteristicile de pornire și funcționare, consumurile de materiale active, pierderile principale. Aceste rezultate sunt trecute și în tabele unde se evidențiază valorile maxime, minime și optime, în cazul considerării criteriilor importante.

În *capitolul al patrulea* se propune o nouă manieră de includere în calcule a efectelor saturației, cu utilizarea ecuațiilor generale cu fazori reprezentativi. Înalta precizie a simulării comportării mașinii asincrone în timpul proceselor dinamice este oferită de evidențierea influenței saturației magnetice asupra modelelor matematice utilizate. Combinațiile posibile ale variabilelor de stare se împart în două clase pentru care se stabilesc direct algoritmi de calcul. Se au în vedere procesele dinamice de pornire și regimurile specifice unui motor de tracțiune. Se demonstrează posibilitățile largi oferite de modelele dinamice neliniare, de prestabilirea solicitărilor electrice, magnetice și mecanice, și se obțin rezultate valoroase practic în vederea finalizării, în etapa de proiectare, a parametrilor mașinii.

În primă instanță se presupun parametrii constanți, în cea de-a doua etapă se consideră saturația pe calea câmpului principal și procesele de refulare pe calea câmpurilor de dispersie.

Pentru motorul dimensionat sunt obținute, practic, toate caracteristicile care-i definesc comportarea în regimuri dinamice. Sunt analizate următoarele regimuri de funcționare: regimul dinamic de pornire cu considerarea parametrilor constanți și diverse momente de inerție și cuplu rezistent nul; regimul dinamic de pornire cu considerarea parametrilor variabili $L_m(i_m)$, $R_r(\omega)$, $L_s\sigma(\omega)$, $L_r\sigma(\omega)$ și $J = J_n$; regimul dinamic de patinare; regimul dinamic la oscilații ale tensiunii aplicate motorului de tracțiune.

Capitolul se încheie cu concluzii.

În *capitolul cinci*, cel experimental, s-a propus și realizat un ștand experimental pentru studiul funcționării mașinii asincrone în regim de motor de tracțiune. Conceperea ștandului experimental a fost un exercițiu de creativitate original, bazat pe analiza detaliată a suportului teoretic sintetizat și pe dotarea de laborator existentă, fiind realizat în laboratorul de „Mașini Electrice” al Facultății de Inginerie Electrică, Energetică și Informatică Aplicată a „Universității Tehnice Gh. Asachi” din Iași. Scopul acestuia era de a simula fizic un lanț de tracțiune compus din „sistemul cale de rulare” și „motorul asincron de tracțiune”.

În lanțul de acționare propus, condițiile de tracțiune au fost create de mașina de lucru, care, prin comandă corespunzătoare, a simulat sistemul cale de rulare, respectiv rezistența la înaintare a unității motoare. Au fost create diverse situații de simulare fiind achiziționate mărimile de interes pentru studiul propus (cuplul mecanic sau puterea mecanică, turația la arbore, curentul și tensiunea de alimentare). Datele achiziționate au fost prelucrate în LabView.

Rezultatele experimentale referitoare la influența greutateii convoiului asupra rezistenței la înaintare, au fost validate în laboratorul de Tracțiune Electrică al Facultății de Inginerie în Electromecanică, Mediu și Informatică Industrială, a

Universității din Craiova, prin utilizarea echipamentului didactic FEREELEC destinat special tracțiunii electrice.

Ultima parte a prezentei teze este dedicată concluziilor generale și perspectivelor. Lucrarea se încheie cu bibliografie și anexe în care sunt completate / detaliate anumite aspecte teoretice sau experimentale.

Contribuții personale

Tratând un domeniu de cercetare foarte complex și cu interconexiuni multiple, teza are un caracter original atât prin descrierea punctuală a bazelor teoretice folosite cât și prin soluția experimentală propusă.

Subiectul tratat în cadrul acestei teze se înscrie printre preocupările de mai mulți ani ale autoarei de utilizare a programelor de calcul matematic și a metodelor numerice în scopul optimizării proiectării motoarelor asincrone, în special a motoarelor asincrone de tracțiune, pentru creșterea performanțelor, de reducere a consumurilor de materiale active, a prețului de fabricație și al cheltuielilor de exploatare.

Problemele prezentate în această teză, rezultatele obținute și concluziile stabilite conferă tezei originalitate, deschizând noi perspective de utilizare a mijloacelor moderne de calcul în proiectarea și realizarea documentației necesare.

Din punct de vedere practic, lucrarea pune la dispoziția proiectanților și constructorilor de motoare asincrone de tracțiune o nouă metodologie de calcul vizând atât regimul staționar cât și regimuri dinamice specifice.

Prin această lucrare s-a urmărit să se răspundă cerințelor actuale și de perspectivă privind proiectarea și construcția motoarelor de tracțiune cu indici tehnico-economici superiori.

Deși în elaborarea lucrării un factor dominant îl constituie informațiile din literatură, în multe privințe ea poartă amprenta originalității, de aceea, în continuare vor fi prezentate pe capitole principalele contribuții originale ale autoarei:

- stabilirea modelului matematic și realizarea programului de calcul pentru proiectarea optimă a motoarelor asincrone de tracțiune având dimensiuni de gabarit impuse;
- stabilirea funcției obiectiv (cost total minim) după care se face optimizarea;
- studiul influenței variabilelor principale considerate cele mai importante în proiectare: A –pătura de curent, B –inducția magnetică din întrefier, r , J_1 -densitatea de curent în înfășurarea statorului, J_2 -densitatea de curent în înfășurarea rotorului (în bara rotor), asupra funcției obiectiv și asupra celor mai importante criterii avute în vedere;
- stabilirea modelului matematic și realizarea programului de calcul pentru calculul și trasarea caracteristicilor de funcționare și mecanice la motoarele asincrone de tracțiune;

- realizarea unui program pentru calculul astfel încât să se realizeze construcția și caracteristicile optime, sau cerute de beneficiar;
- calculul și reprezentarea grafică a inductivităților utile statice și dinamice în raport de curentul de magnetizare, pentru a putea studia influența saturației magnetice asupra regimurilor dinamice specifice locomotivei;
- calculul și reprezentarea grafică a inductivităților de dispersie din stator și rotor în raport de alunecare pentru a reprezenta corect caracteristicile mecanice;
- verificarea caracteristicilor de tracțiune pentru cele două motoare: motorul asincron proiectat propus pentru modernizarea locomotivei diesel electrică LDE 2100, și cel de curent continuu existent;
- conceperea și realizarea unui lanț de simulare a sistemului ‘cale de rulare’ – ‘motor asincron de tracțiune’ și stabilirea metodicii de lucru;
- utilizarea programării MATLAB și LABVIEW pentru a soluționa anumite aspecte problematizate cum ar fi: studiul pornirii motorului asincron; calculul parametrilor motorului asincron pe baza datelor experimentale; calcul numeric de alegere a motorului electric de tracțiune pentru lanțul simplu de acționare a căruciorului; calculul numeric al timpilor de parcurs și spațiului pentru lanțul de tracțiune propus.

Programele întocmite admit o gamă largă de formulări ale problemei de optimizare și acoperă astfel o bună parte din necesitățile fabricilor constructoare de motoare asincrone de tracțiune.

- se propune o nouă manieră de includere în calcule a efectelor saturației, cu utilizarea ecuațiilor generale cu fazori reprezentativi;
- înalta precizie a simulării comportării mașinii asincrone în timpul proceselor dinamice este oferită de introducerea parametrilor variabili în modelele matematice stabilite;
- combinațiile posibile ale variabilelor de stare se împart în două clase pentru care se stabilesc direct algoritmi de calcul originali;
- se demonstrează posibilitățile largi oferite de modelele dinamice neliniare, de prestabilirea solicitărilor electrice, magnetice și mecanice, în condiții de tracțiune și se obțin rezultate valoroase practice în vederea finalizării, în etapa de proiectare, a parametrilor mașinii;

În ansamblu studiile efectuate în prezenta lucrare au fost aplicate la rezolvarea mai multor contracte de cercetare științifică, unde am participat ca membră a colectivului.

Îndrăznesc să afirm că dezvoltarea de care m-am ocupat pe parcursul acestei perioade a deschis noi perspective la finalizarea cărora sper să-mi aduc în continuare contribuția.

Îmi exprim recunoștința și sincere mulțumiri tuturor celor care au contribuit la această cercetare, prin sfaturi și discuții directe utile, care cu certitudine și-au pus amprenta asupra prezentei teze de doctorat.