

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMISOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICA

ING. NICUSOR LELEA

TEZA DE DOCTORAT

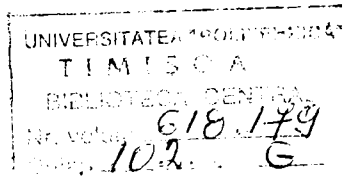
**MASINA DE INDUCTIE PENTRU ACTIONARE DIRECTA
A ROTILOR DE TRAMVAI**

**BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA**

CONDUCATOR STIINTIFIC:

ĂCAD. TOMA DORDEA

TIMISOARA 1996



CUPRINS

INTRODUCERE	1
1. ACTIONAREA VEHICULELOR DE TRAMVAI	3
1.1. EVOLUTIA TRAMVAIULUI DE LA ORIGINI PANA IN PREZENT.....	3
1.2. ACTIONAREA INDIRECTA.....	5
1.2.1. ACTIONAREA INDIRECTA CU MOTOARE DE C.C.....	5
1.2.2. ACTIONAREA INDIRECTA CU MOTOARE DE INDUCTIE.....	7
1.3. ACTIONAREA DIRECTA.....	9
1.3.1. ACTIONAREA DIRECTA CU MOTOARE DE INDUCTIE CU ROTOR INTERIOR.....	10
1.3.2. ACTIONAREA DIRECTA CU MOTOARE DE INDUCTIE CU ROTOR EXTERIOR.....	10
2. CERINTELE CARE TREBUIE SA LE SATISFACA UN MOTOR DE INDUCTIE PENTRU TRACTIUNE ELECTRICA	12
2.1. PARTICULARITATI CONSTRUCTIVE ALE MOTORULUI DE INDUCTIE CU ROTOR IN COLIVIE.....	12
2.2. CUPLUL MOTORULUI DE INDUCTIE.....	14
2.3. REGLAREA VITEZEI MOTORULUI DE INDUCTIE.....	21
3. ALIMENTAREA MOTOARELOR DE INDUCTIE PRIN CONVERTOARE STATICE DE FRECVENTA	24
3.1. INVERTORUL DE TENSIUNE.....	25
3.1.1. MODULATIA IN DURATA A IMPULSURILOR TENSIUNII DE IESIRE.....	27
3.1.2. ANALIZA ARMONICA A UNDEI DE TENSIUNE DE LA IESIREA INVERTORULUI.....	30
3.2. INVERTORUL DE CURENT.....	35
3.2.1. EFECTELE ARMONICELOR SUPERIOARE DE LA IESIREA INVERTOARELOR DE CURENT.....	36
3.2.2. ELIMINAREA CUPLURILOR PULSATORII PRIN MODULAREA IN DURATA A UNDEI DE CURENT.....	39
4. CALCULUL MOTORULUI DE INDUCTIE PENTRU ACTIONARE DIRECTA	43
4.1. CARACTERISTICILE TRAMVAIULUI TIMIS-2.....	43
4.2. CALCULUL OPTIMIZAT CU PROGRAMUL IND.....	45
4.3. VARIANTE POSIBILE ALE MOTORULUI DE INDUCTIE PENTRU ACTIONARE DIRECTA.....	46
4.4. ALEGEREA VARIANTEI OPTIME A MOTORULUI DE INDUCTIE PENTRU ACTIONARE DIRECTA.....	92
4.5. CONCLUZII.....	96
5. APLICAREA MOTORULUI DE INDUCTIE PENTRU ACTIONARE DIRECTA	97
5.1. SISTEMUL DE ACTIONARE PENTRU VARIANTA MIAD3.....	97
5.2. SISTEMUL DE ACTIONARE PENTRU VARIANTA MIAD8.....	98
5.3. CARACTERISTICILE DE REGLARE ALE MOTORULUI DE INDUCTIE PENTRU ACTIONARE DIRECTA.....	99
5.4. DIAGrameLE DE MERS ALE TRAMVAIULUI.....	105
5.4.1. DIAGrameLE DE MERS ALE TRAMVAIULUI ECHIPAT CU MOTOARE MIAD3.....	106
5.4.2. DIAGrameLE DE MERS ALE TRAMVAIULUI ECHIPAT CU MOTOARE MIAD8.....	114

5.5. COMPARAREA SOLUTIILOR PROPUSE CU SOLUTIA EXISTENTA IN TIMISOARA.....	123
5.6. CONCLUZII.....	128
6. CONCLUZII GENERALE.....	129
ANEXE.....	131
A1. SEMNIFICATIA MARIMILOR DIN DATE DE INTRARE.....	131
A2. SEMNIFICATIA MARIMILOR DIN REZULTATE FINALE.....	139
A3. TREN DE ROTI CU MIAD3.....	144
A4. TREN DE ROTI CU MIAD8.....	145
BIBLIOGRAFIE.....	146
LISTA ACRONIMELOR UTILIZATE.....	150

INTRODUCERE

Dezvoltarea oricarei economii duce la sporirea continua a volumului de transport care are un rol foarte important.

Sistemele de transport bazate pe tractiunea electrica, atat cea feroviara cat si cea urbana, se afla intr-o concurenta continua cu transportul realizat cu alte mijloace de transport, automobile personale, autocaruri, camioane, toate consumatoare de combustibili fosili si poluante prin gazele emanate.

Evolutia productiei si a consumului de energie electrica pe plan mondial indica tendinta ca o parte cat mai importanta din consumul de energie sa-l constituie cel sub forma de electricitate. Industria cel mai mare consumator de resurse de energie atat in scopuri energetice cat si pentru prelucrare, continua sa-si mareasca ponderea si in consumul de energie electrica. Din cele expuse mai sus se impun doua imperative:

- ridicarea treptata a ponderii ramurii energiei electrice in consumul total de resurse energetice primare in scopul contributiei ei la dezvoltarea si modernizarea economiei.
- accentuarea rationalizarii consumului de energie electrica in industrie, prin alegerea unei structuri corespunzatoare si reducerea consumurilor specifice.

Aceste imperative favorizeaza expansiunea continua a transporturilor bazate pe tractiunea electrica.

Pentru a mari randamentul si a reduce pierderile de energie electrica trebuie imbunatatit randamentul si fiabilitatea masinilor electrice si al sistemelor de actionare. Astfel pentru o eficacitate sporita in utilizarea masinilor electrice se impun a fi luate urmatoarele masuri:

- proiectarea masinilor sa se faca in asa fel incat in regimul nominal de functionare valorile randamentului si a factorului de putere sa fie maxime iar cheltuielile de exploatare minime.
- introducerea unor noi sisteme de actionare care sa faca tractiunea electrica mai simpla, mai fiabila si care sa aiba un randament mai bun.

Dupa cum se stie, o proiectare rationala are intodeauna in vedere obtinerea unei variante optime a masinii. Criteriile de considerare a acestui optim pot varia de la un caz la altul, in functie de o serie de factori legati fie de procesul de productie, fie de cel de exploatare.

In timp ce din punct de vedere al productiei intereseaza in mod deosebit aspectul economic si posibilitatile de aprovizionare cu materiale de baza, in exploatare se au in vedere in primul rand parametrii energetici: randamentul, factorul de putere, capacitatea de supraancarcare etc.

Una din problemele de baza pentru fabricile producatoare de motoare de tractiune este reducerea duratei de asimilare a produsului ceea ce duce la sporirea eficientei investitiilor. Un rol hotarator revine etapei de proiectare ce trebuie sa ofere in timp cat mai scurt varianta

constructiva optimala. In acest context utilizarea calculatoarelor electronice in activitatea de proiectare devine cea mai potrivita modalitate de a raspunde cu promptitudine cerintelor impuse.

Proiectarea masinilor electrice cu calculatorul electronic ofera posibilitatea obtinerii unor caracteristici superioare din punct de vedere functional, care determina reducerea pierderilor de energie electrica prin cresterea randamentului si a factorului de putere. In acest caz masina apare putin supradimensionata dar, avand in vedere timpul indelungat de functionare al acesteia, cheltuielile suplimentare de fabricatie vor fi mai usor recuperate de catre beneficiari printr-un consum de energie mai redus.

Toate aceste concluzii privind optimizarea proiectarii masinilor electrice din punct de vedere al fabricatiei si al exploatarii impun alegerea variantei al carei pret de cost si de exploatare, pe o perioada de timp data sa fie minim. In acest context am utilizat la calculul motorului de inductie pentru actionare directa programul IND elaborat la Facultatea de Electrotehnica din Timisoara.

Simplificarea sistemelor de actionare la tractiunea electrica si sporirea fiabilitati lor se poate face, fie prin intrebuintarea unor materiale noi care sa mareasca durabilitatea unor ansamble foarte sollicitate cum sunt angrenajele, fie prin incercarea de eliminare a lor.

Lucrarea de fata a urmarit sa raspunda cerintelor actuale si de perspectiva privind dezvoltarea teoriei si constructiei de motoare de inductie pentru tractiunea electrica fara angrenaje. In acest scop s-au avut in vedere urmatoarele directii principale.

- prezentarea particularitatilor constructive si functionale ale motoarelor de tractiune pentru actionare directa.
- proiectarea optimizata cu calculatorul electronic a motorului de inductie pentru actionare directa.
- alimentarea motorului de actionare directa de la convertoare statice de frecventa.

In cadrul analizelor efectuate s-a urmarit ca investigatiile teoretice efectuate sa se finalizeze cu recomandari concrete pentru aplicare practica a motorului de inductie pentru actionare directa.

Doresc sa adrees cele mai respectuoase multumiri Domnului Acad. Toma Dordea, conducatorul stiintific al lucrarii, pentru indrumarile, sugestile si sprijinul acordat in cursul elaborarii si redactarii lucrarii.

De asemenea multumesc familiei mele pentru intelegerea deosebita in tot acest timp cat a durat elaborarea tezei.

1. ACTIONAREA VEHICULELOR DE TRAMVAI

1.1. EVOLUTIA TRAMVAIULUI DE LA ORIGINI PANA IN PREZENT

Perioada de dezvoltare (1881-1930)

In 1881, inginerul german Werner von Siemens a pus in circulatie in cartierul Berlinez Lichterfelde, primul tramvai electric. Alimentarea s-a facut prin cele doua sine de rulare, meritul pentru introducerea liniei aeriene apartine inginerului american F.J.Sprague care a realizato la Richmond in 1888.

Aceste tramvaie aveau controlere mecanice care permiteau eliminarea treptata a rezistentelor la pornire si un motor de tractiune in curent continuu alimentat la 500-600V. In momentul in care au ajuns la forma lor finala au cucerit suprematia fata de celelalte mijloace de transport urban.

Aparitia automobilului si inceputul declinului (1930)

La inceputul lui 1930, concurenta automobilului a inceput tot mai mult sa fie simtita producand prima evaziune a clientelei.

Pentru a face fata acestei conjuncturi nefavorabile, 28 de retele din SUA si Canada si-au unificat eforturile pentru finantarea unui grup de lucru care sa defineasca parametri generali ai unui nou vehicul de tramvai care sa poata face fata noii concurente. Rezultatul acestui efort, timp de sapte ani a fost un vehicul tramvai cu multe solutii revolutionare in momentul acela: usi automate, scaune multiple si confortabile, acceleratii bune fara smucituri obtinute cu ajutorul unui accelerator electromecanic cu reglaj fin, elemente de cauciuc in suspensie, rotii elastice, motoare de tractiune amplasate longitudinal complet suspendate, frane de serviciu reostatice si un aspect exterior modern conceput de stilistul J.H.Hession.

Acest tramvai legendar P.C.C. dupa trei ani de exploatare in America de Nord a inspirat si constructorii din multe tari europne, mai ales din Italia.

Perioada de decadere (1945-1960)

Aceasta decadere a fost ceva mai lenta in primii ani dupa razboi din cauza restrictiei de carburanti si pneuri. Dupa acca insa multe retele au fost desfiintate in favoarea autobuselor si a troleibuselor.

Perioada de stagnare (1960-1975)

Desfiintare retelelor de tramvai a luat sfarsit pe la mijlocul anilor saizeci. Au aparut tramvaie articulate de mare capacitate cu redresoare. In rest au fost pastrate principiile de baza ale tramvaiului P.C.C.

Renesansa (1980)

Posibilitatea unei crize petoliere si constiinta ca desfiintarea retelelor de tramvai nu a adus ordinea dorita in transportul urban au condus la stoparea desfiintarii retelelor existente si chiar la favorizarea infiintarii de retele noi. Acest curent nou a aparut intii in Europa ca apoi sa treaca si in America de Nord. Au aparut tramvaie actionate cu motoare asincrone alimentate prin convertoare statice de frecventa si controlate de microprocesoare. Pe langa constructia clasica cu boghiuri au aparut si tramvaie cu podeaua joasa la care sunt eliminate boghiurile.

Una dintre cele mai importante probleme ale tractiunii bazate pe aderența o constituie modul de amplasare a motorului de tractiune pe vehicul si de actionare a roților motoare. Sistemele de actionare trebuie astfel concepute ca sa asigure atat transmiterea cuplului motor cat si protejarea motorului de tractiune fata de socurile primite de la calea de rulare.

Deseori parametrii sistemului de transmisie si parametrii electrici si mecanici ai motorului de tractiune se conditioneaza reciproc. La aceasta contribuie si faptul ca gabaritele care stau la dispozitie pe vehicul, concret in cazul de fata pe tramvai, sunt restranse, ecartamentul caii si diametrul rotii de rulare fiind elementele principale care limiteaza posibilitatile de alegere libera a dimensiunilor.

Cuplul motoarelor electrice de tractiune poate fi transmis roților motoare in doua moduri: indirect (prin angrenaje) si direct.

In primul caz cuplul de la motor se transmite la osia motoare printr-un angrenaj, care face ca turatia rotii motoare sa fie inferioara turatiei motorului iar cuplul sa fie mai mare (Fig.1.1.a.).

In cazul al doilea rotorul motorului este solidar cu roata motoare, turatia rotii fiind egala cu turatia motorului (Fig.1.1.b.).

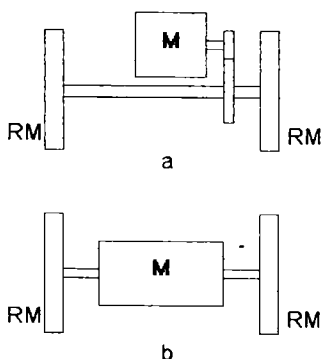


Fig.1.1

1.2. ACTIONAREA INDIRECTA

1.2.1. ACTIONAREA INDIRECTA CU MOTOARE DE C.C.

Dintre motoarele de curent continuu, cel mai raspandit, la propulsia vehiculelor de transport in comun pe sine, este motorul cu excitatie serie. Avantajele care i-au adus aceasta suprematie sunt:

- poseda caracteristica mecanica supla cu autoreglare de turatie (la sarcini mecanice reduse are turatii-mari iar la sarcini mari are turatii mici)
- dezvolta cupluri puternice la pornire si franare permitand acceleratii si deceleratii mari
- suporta bine suprasarcini si socuri dinamice la ax
- nu este afectat de scaderea tensiunii, scadere care nu duce la micșorarea cuplului ci numai la micșorarea turatiei, daca cuplul rezistent este independent de turatie
- daca motoarele care apartin aceluiasi vehicul au caracteristici putin diferite sau perechi de roti cu diametre diferite, repartizarea incarcarii pe fiecare motor este destul de uniforma

Caracteristicile lui de functionare, in regim stationar pot fi obtinute din ecuatiile:

$$U = E + R_a I_a + \Delta U \quad (1.1)$$

$$E = k_g \Phi n \quad (1.2)$$

$$M = k_M \Phi I_a \quad (1.3)$$

din care rezulta turatia motorului

$$n = \frac{U - R_a I_a - \Delta U}{k_g \Phi} \quad (1.4)$$

Din expresia obtinuta reiese ca turatia motorului poate fi reglata prin modificarea tensiunii de alimentare, a curentului prin indus sau a fluxului.

Pentru a compara cateva sisteme de actionare cu motoare de curent continuu utilizate frecvent la tramvaie s-a admis un echipament tipic, cu patru motoare de tractiune amplasate pe doua boghiuri bimotor, in diferite variante.

Echipament de propulsie cu reostat de pornire (RPF)

Schema circuitului principal al vehiculului tramvai, propulsat cu patru motoare de curent continuu serie, echipat cu controler si reostat de pornire si franare este data in Fig.1.2.

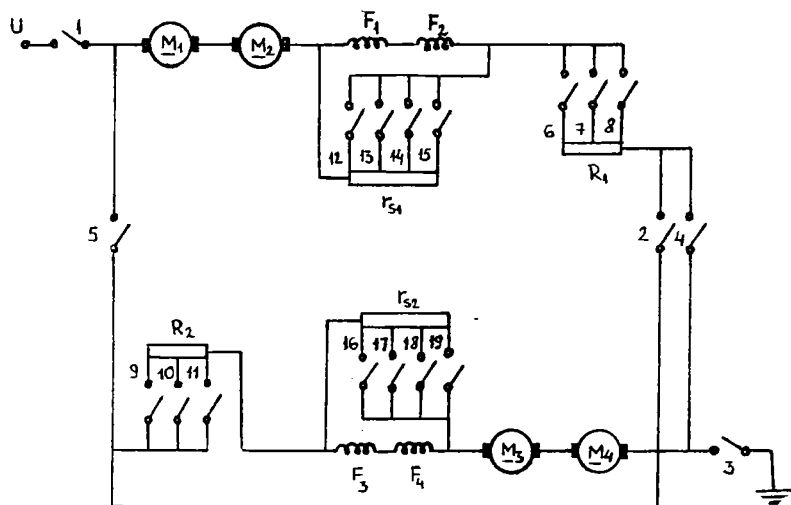


Fig.1.2

La demaraj trebuie dezvoltată o forță de tracțiune maximă ceea ce impune asigurarea unui curent maxim admisibil I_m prin circuitul motoarelor de tracțiune pe tot parcursul demarajului. Pornirea se face cu rezistență adițională maximă iar pe măsură ce tramvaiul își mărește viteza rezistența adițională se reduce progresiv.

Pentru micșorarea consumului de energie electrică în RPF se recomandă, ca pe perioada demarajului, să se treacă succesiv de la conexiunea serie la conexiunea serie-paralel a motoarelor. Pierderile în RPF se pot micșora și mai mult dacă se aplică slabirea de câmp după fiecare conexiune între motoare.

Echipament de propulsie cu variator de tensiune continuă (VTC)

Demarajul și mersul unui vehicul tramvai poate fi controlat și cu ajutorul variatoarelor de tensiune continuă inseriate în circuitul de forță al vehiculului Fig.1.3.

Indusurile celor patru motoare sunt alimentate de două VTC-uri care, pe lângă controlul tensiunii, mai pot modifica frecvența și rezistența adițională la pornirea motoarelor când nu există tensiuni care să contracareze tensiunile la borne. După pornirea motoarelor rezistențele adiționale și operațiunile de reducere a frecvenței se elimină iar motoarele se reglează, în continuare, direct cu ajutorul variatoarelor de tensiune continuă.

Sistemele cu variatoare de tensiune continuă oferă câteva avantaje în plus, cum ar fi :

- eliminarea smunciturilor din timpul mersului așa ca este mărit gradul de confort al călătorilor

- micșorarea pierderilor la pornire ceea ce are ca rezultat un randament mai bun
- posibilitatea frânării cu recuperare în timpul careia o parte din energie se returnează în rețea

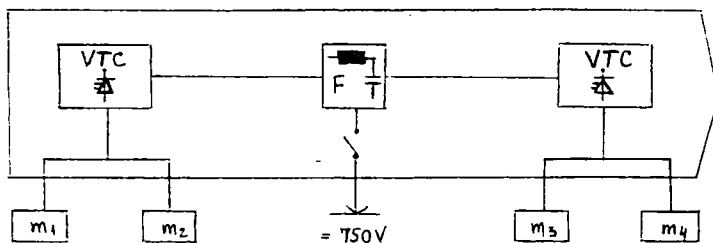


Fig.1.3.

Aceste avantaje au adus supremație sistemelor de propulsie cu variatoare de tensiune continuă ele devenind echipamente standard în anii optzeci, în țările occidentale.

1.2.2 ACȚIONAREA INDIRECTĂ CU MOTOARE DE INDUCTIE

Utilizarea în condițiile actuale a motorului de inducție marchează începutul unei noi ere în construcția tramvaielor electrice moderne.

Funcționarea motorului de inducție trifazat se bazează pe existența unui câmp învârtitor în întrefierul mașinii, creat de înfășurările statorului alimentate cu un sistem de tensiuni trifazate. Câmpul învârtitor induce în înfășurările rotorului un sistem de curenți trifazați care la rândul lor creează un câmp propriu. Prin interacțiunea celor două câmpuri se formează cuplul care pune în mișcare rotorul.

Viteza de rotație a motorului asincron este dată de ecuația:

$$n = (1 - s) \frac{f_1}{p} \quad (1.5)$$

Din (1.5) rezultă că turatia unui motor de inducție se poate regla prin frecvența statorică (f), numărul perechilor de poli (p) și alunecarea (s).

Singura metodă eficientă de modificare a vitezei este recurgerea la frecvența variabilă de alimentare. Aceasta metodă a devenit practică după apariția convertoarelor statice de frecvență.

Voi prezenta și în cazul acesta câteva sisteme de acționare utilizate la tramvaie având la bază același echipament tipic, cu patru motoare de tracțiune, amplasat pe două boghiuri bimotor.

Echipment de propulsie cu inverter de tensiune

Tramvaiele se alimenteaza de la linia de contact de curent continuu asa ca se elimina redresorul iar inverterul de tensiune modifica si frecventa si tensiunea de iesire. In ultimul timp se utilizeaza in general invertoare PWM prin intermediul carora se pot elimina sau reduce armonicile nedorite.

Schema bloc a circuitului de putere este data in (Fig.1.4)

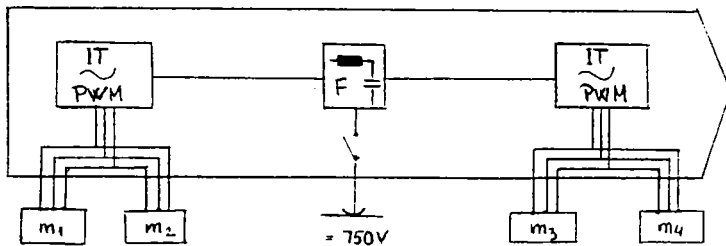


Fig.1.4

Electronica de putere dispune de doua invertoare de tensiune de tip PWM, fiecare alimentand cate doua motoare de inductie cuplate in paralel.

Echipment de propulsie cu inverter de curent

In aceste echipamente ale tramvaielor se utilizeaza in general invertoare de curent cu stingere autonoma rolul inverterului este de a modifica frecventa de iesire pe cand modificarea tensiunii se face cu variatoare de tensiune continua. Inverterul de curent foloseste, in procesul de comutatie, inductanta de scapari a motorului asincron pe care il alimenteaza, asa ca el se realizeaza pentru o valoare precisa a inductantei de scapari (pot functiona mai multe motoare in paralel fara a modifica insa configuratia schemei).

Avantajele invertoarelor de curent, cum ar fi de exemplu, utilizarea unor tiristoare normale in loc de tiristoare rapide, lipsa tiristoarelor de stingere, renuntarea la diodele de recuperare, precum si obtinerea unor performante dinamice foarte bune, au facut ca ele sa detina multi ani primul in tractiunea urbana.

Schema bloc a circuitului de putere cu invertoare de curent amplasate pe acelasi vehicul tramvai este prezentata in (Fig.1.5).

Electronica de putere dispune aici de doua CSF formate dintr-un VTC si un inverter de curent, fiecare. CSF alimenteaza cate doua motoare de inductie cuplate in paralel.

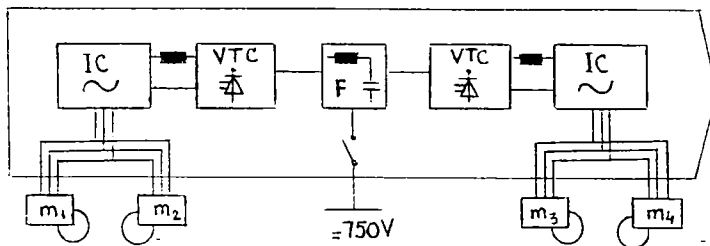


Fig.1.5

Daca am face o comparatie intre sistemele cu motoare de c.c. si sistemele cu motoare de inductie am putea spune ca ultimele prezinta o serie de avantaje care provin, in general, de la utilizarea masinii de inductie.

Motorul de inductie este mai mic si mai usor in comparatie cu un motor cu colector de aceeași putere asa ca se incadreaza mai bine in boghiu. Se poate conta pe o aderență mai buna, la un pret mai mic al motorului, ceea ce reduce costul investitiei. Absenta intretinerii motorului de inductie constituie inca un avantaj important, un motor cu colector impune un schimb de perii tot la 200000km, ca si un control periodic al starii colectorului si al infasarilor. Franarea recuperativa este inerenta si nu sunt necesare contactoare pentru trecerea din regimul de tractiune in cel de franare.

1.3. ACTIONAREA DIRECTA

Cu toate ca transmiterea directa a cuplului pare a fi cea mai simpla, ea nu a fost realizata pana in prezent decat in cazuri foarte rare, in cea mai mare parte din cauza dificultatilor care apar la transpunerea ei in practica. Cercetarile care se intreprind in ultimii ani confirma ca actionarea directa este posibila la nivelul tehnologic actual.

Avantajul principal al acestui tip de actionare este eliminarea angrenajului reductor, o piesa dificila care se uzeaza foarte repede.

Masa unei actionari fara angrenaj depaseste masa unui motor de tractiune traditional, dar ea este mai mica decat a unui motor de tractiune normal plus angrenajul. Si randamentul ansamblului actionarii fara angrenaj va fi mai mare decat al ansamblului actionarii cu angrenaj.

Sunt posibile doua solutii constructive ale motorului de inductie pentru actionare directa:

- cu rotor interior
- cu rotor exterior

1.3.1. ACTIONAREA DIRECTA CU MOTOARE DE INDUCTIE CU ROTOR INTERIOR

Problema principala in cazul actionarii directe este ca socurile, provenite de la calea de rulare, sunt suportate de motor. Pentru a nu fi afectata marimea intrefierului trebuie gasite solutii care sa permita o deplasare relativa pe verticala a rotilor suficient de mare. In (Fig.1.6) este prezentata o astfel de solutie care poate fi aplicata si la tramvaie. Fiindca rotile sunt fixate rigid pe osie, este necesar ca arborele rotorului sa fie tubular pentru a putea trece osia prin interiorul sau.

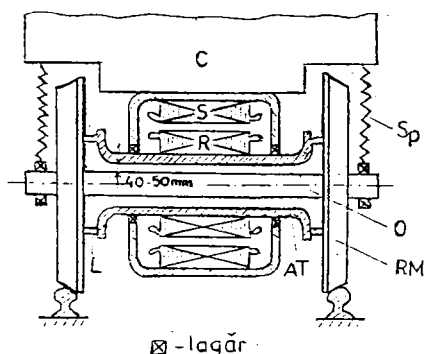


Fig.1.6

Intre osie si arborele tubular exista posibilitatea unui joc de pana la 40-50 mm . Arborele tubular este cuplat pe ambele roti prin intermediul unor sisteme elastice, care pot fi construite in diferite variante: cu resorturi, cu blocuri din cauciuc, cu discuri flotante etc.

1.3.2. ACTIONAREA DIRECTA CU MOTOR DE INDUCTIE CU ROTOR EXTERIOR

Versiunea aceasta a motorului de actionare directa se deosebeste de cea precedenta prin faptul ca statorul este amplasat pe osia rotilor si se afla in interiorul rotorului tubular in colivie care este cuplat cu rotile vehiculului.

Din cele cunoscute din literatura de specialitate cel mai mare progres, in sensul aplicarii motorului de inductie pentru actionare directa, a fost facut de catre British Rail in colaborare cu GEC Traction L.t.d. care au inceput cercetarile in 1974. BR este interesat pentru utilizarea

actionarii directe la trenurile de mare viteza dar este posibila utilizarea ei si la vehiculele de transport urban.

Adoptand aceasta solutie constructiva motorul este in timpul mersului supus unor socuri intense, provocate de la calca de rulare, asa ca este necesara introducerea unor lagare speciale in suportii statorului. Si la executarea partii electromagnetice a motorului s-au folosit unele solutii mai rar intalnite. Tinand cont de diametrul rotii si de necesitatea unui intrefier marit s-a ajuns la concluzia ca momentul dorit se poate obtine cu rotor exterior. Rotorul este in colivie, solutie care prezinta eficienta mai mare, factor de putere mai bun si pierderi mai mici in inverter.

O versiune mai noua imbunatatita a acestui motor este prezentata in (Fig.1.7).

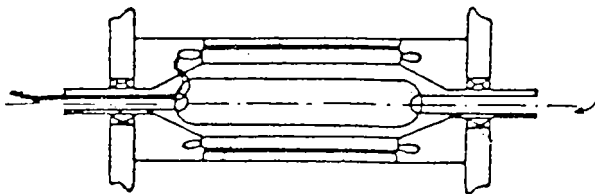


Fig.1.7

Imbunatatirile constau in aceea ca statorul motorului este montat pe arborele central cu sectiune in forma de I asa ca au fost eliminate lagarele aditionale de la constructia anterioara iar rotorul este presat in interiorul arborelui exterior. Capetii osiei centrale sunt goi asa ca este posibila alimentarea infasurari statorice pe la un capat iar racirea in aer fortat pe la capatul celalalt. Rotile sunt cuplate de arborele exterior.

In timpul incercarilor motorul a fost alimentat de la un inverter de curent. Acest tip de inverter ,care va fi prezentat mai detaliat in capitolul 3. paragraful 3.2. , este simplu si ieftin dar prezinta deficiente la frecvente mici la care provoaca pulsatii mari ale cuplului si pierderi mari in motor.

2. CERINTELE CARE TREBUIE SA LE SATISFACA UN MOTOR DE INDUCTIE PENTRU TRACTIUNE ELECTRICA

Condițiile de exploatare ale unui motor de tractiune sunt destul de grele. In timpul mersului el este supus la socuri si trepidatii foarte intense mai ales la trecerea peste joante si la ramificatii. Este evident ca dificultatile in constructia motoarelor de tractiune sunt mult mai mari decat la motoarele fixe.

Spatiul disponibil pentru asejarea motorului pe vagon este redus si in general, incomod pentru o buna intretinere. In afara de aceasta motorul este supus la diferite actiuni externe, ca de exemplu, apa, zapada, praful etc.

Dintre motoarele de inductie, cel mai potrivit pentru utilizarea in tractiunea electrica este motorul cu rotor in colivie. El este robust si usor de intretinut fiind constituit din putine parti componente care sunt foarte omogene. Dimensiunile si greutatea sunt mai mici decat la un motor de inductie cu rotor bobinat de aceeași putere, asa ca sunt satisfacuate foarte bine cerintele care se impun la instalarea motorului pe boghiu. Motoarele se pot instala mai mult spre interiorul boghiului realizandu-se o mai buna repartitie a greutatilor (mai ales a partilor nearcuite) ceea ce determina micșorarea forțelor transversale transmise sinelor.

2.1. PARTICULARITATI CONSTRUCTIVE ALE MOTORULUI DE INDUCTIE CU ROTOR IN COLIVIE

Dimensiunile principale ale motorului depind de raportul dintre putere si turatie, deci de cuplul necesar. La actionarea indirecta intre arborele motor si perechile de roti de tractiune se intercaleaza o transmisie cu angrenaj care permite alegerea unei turatii marite pentru motor si o utilizare economica a materialelor active. In schimb actionarea directa impune motoare cu turatii reduse care au gabarite mai mari, la aceeași putere, decat motoarele cu turatii ridicate.

Motorul de inductie cu rotor in colivie pentru actionare indirecta

In (Fig.2.1) este reprezentat statorul unui motor de inductie pentru tractiune electrica de productie franceza utilizat la o locomotiva electrica.

Miezul feromagnetic este facut din tole decupate din aceeași bucata si izolate prin fosfatate. Aceasta multime de tole este strinsa intre doua placi de presare si consolidata cu bare

longitudinale prin sudare de cele doua placi la extremitati. Bobinajul statorului este de tip ondulat format din sectii identice.

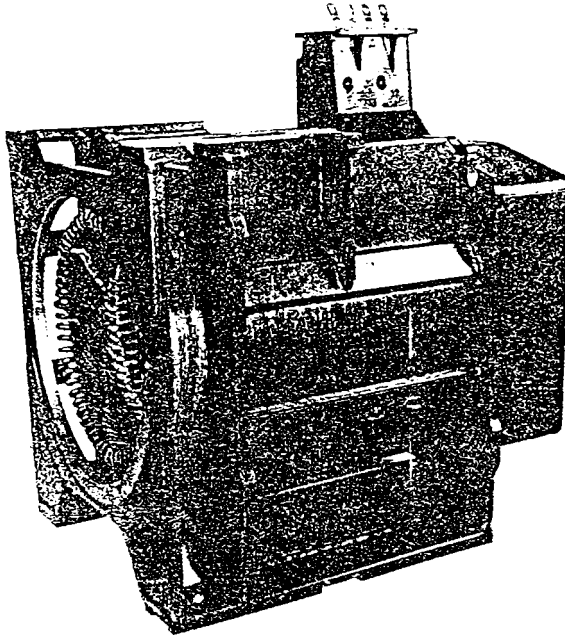


Fig.2.1

Sectiile se introduc in crestaturi care se inchid cu pene din fibra de sticla. Miezul feromagnetic complet bobinat este impregnat in rasina nesolubila de silicon.

Circuitul magnetic al rotorului (Fig.2.2) este format din tole izolate montate direct pe arbore si stranse intre doua placi de presare consolidate prin sudare.

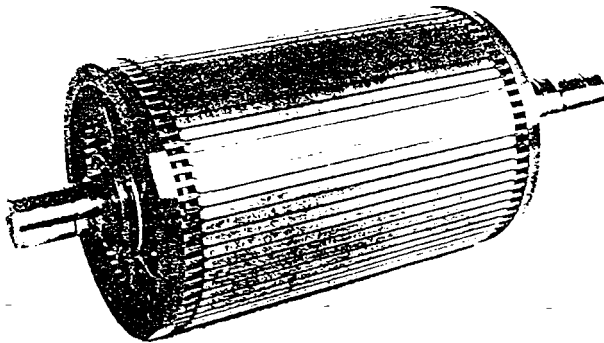


Fig.2.2

Colivia este din cupru argintat, ale carui caracteristici mecanice sunt stabile la temperaturi inalte. Barele rectangulare sunt montate in crestaturi si prinse la extremitati cu inele de scurtcircuitare.

Motorul de inductie cu rotor in colivie pentru actionare directa

Motorul de inductie pentru actionare directa trebuie sa satisfaca aceleasi cerinte ca si oricare motor de inductie pentru tractiune electrica si inca unele, in plus, care provin de la constructia lui specifica. Astfel avand in vedere spatiul redus, limitat de diametrul rotii, motoarele de inductie se fac mai suple si mai lungi. Din cauza smunciturilor la care este supus in timpul mersului motorul se face cu intrefier marit iar pentru sprijinirea pe osie trebuie prevazute lagare speciale.

Daca rotile sunt cuplate rigid pe osie, este necesar ca arborele rotorului sa fie tubular, pentru a putea trece osia prin interiorul lui. Intre osie si arborele tubular trebuie sa existe posibilitatea unui joc de 30-50 mm .

Arborele tubular se cupleaza cu ambele roti prin intermediul unor sisteme elastice speciale.

Avand in vedere lungimea marita a motorului, in cazul in care este necesara racirea motorului, aceasta trebuie facuta axial.

2.2. CUPLUL MOTORULUI ASINCRON

Masinele electrice au miezuri feromagnetice pentru inchiderea campului electromagnetic. Campurile magnetice variabile in timp provoaca pierderi in miezul feromagnetic prin isteriza magnetica si curenti turbionari.

La materialele cu isteriza magnetica, legatura intre inductia magnetica B si intensitatea de camp magnetic H este neliniara si neunivoca, ceea ce face ca inductivitatile masinii electrice sa fie dependente de curenti in mod neunivoc.

Consideram cazul in care intre inductia magnetica B si intensitatea de camp H este o legatura liniara. Pierderile prin curenti turbionari satisfac aceasta conditie si de aceea in studiul functionarii masinilor electrice se poate tine seama de influenta acestor pierderi fara dificultati. In schimb legatura dintre pierderile prin isteriza magnetica si marimile care le determina nu satisface conditia de liniaritate intre B si H .

Pentru a cuprinde pierderile in fier in ansamblu s-au echivalat pierderile prin isteriza magnetica cu pierderi prin curenti turbionari si in acest mod s-a putut pastra liniaritatea intre B si H . Se admite ca fluxul campului magnetic generat de curentii turbionari este produs de curentii de conductie stabiliti intr-un sistem de infasurari auxiliare. Fluxul principal Ψ_h al unei faze a masinii electrice, in cazul prezentei curentilor turbionari, se poate calcula prin metoda tuburilor elementare de camp. Daca intrfierul masinii este constant in lungul pasului polar, fluxul principal rezultat, in functie de fluxul principal Ψ_{h0} din cazul absentei curentilor turbionari are expresia

$$\Psi_h = \Psi_{h0} - K_1 \frac{\partial \Psi_{h0}}{\partial t} - K_2 \frac{d^2 \Psi_{h0}}{dt^2} + K_1' \frac{\partial^2 \Psi_{h0}}{\partial t^2} + K_2' \frac{d^2 \Psi_{h0}}{dt^2} + K_{12} \frac{\partial}{\partial t} \frac{d \Psi_{h0}}{dt} \quad (2.1)$$

in care coeficientii K depind de pierderile din ambele armaturi.

Derivata $\partial/\partial t$ se efectueaza in ipoteza ca infasurarea cu fluxul Ψ_{h0} este fixa fata de armatura fixa ($\vartheta_y = \text{const.}$), iar d/dt in ipoteza ca infasurarea este mobila fata de armatura fixa (ϑ_y este functie de timp). Coeficientii K_1 si K_1' depind numai de pierderile din armatura fixa, iar K_2 si K_2' , numai de cele din armatura mobila iar K_{12} de pierderile din ambele armaturi.

In (Fig.2.3) este reprezentata axa A_s fixa fata de stator, axa A_r fixa fata de rotor, axa unei faze generale y si cea a fazei rotorice λ' , impreuna cu unghiurile de pozitie, pentru o masina electrica cu m faze in stator si m' faze in rotor.

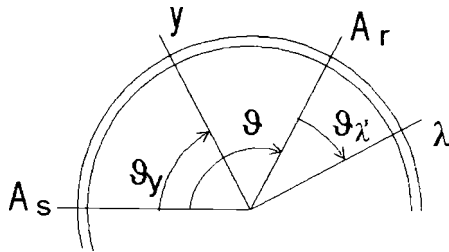


Fig.2.3

Expresiile fluxurilor pentru o faza statorica si una rotorica, cu considerarea pierderilor in fier se pot obtine prin utilizarea fazei generale y care se identifica apoi cu faza statorica sau faza rotorica dupa necesitati.

Fluxul Ψ_{yh0} al fazei generale este

$$\Psi_{yh0} = \sum_{v=1} L_{yv} i_v + \sum_{v'=1'} L_{v'y} i_{v'} \quad (2.2)$$

unde L_{yv} este inductivitatea mutuala principala intre fazele i si j , iar i_v si $i_{v'}$ curentii fazei statorice v si a celei rotorice v' .

Fluxul Ψ_{yh0} depinde de timp si prin intermediul lui ϑ_y . Cand faza y se identifica cu faza statorica λ avem $\vartheta_y = \vartheta_\lambda$, iar cand se identifica cu faza rotorica λ' , $\vartheta_y = \vartheta + \vartheta_{\lambda'}$.

Cu acestea, fluxul principal al fazei y devine

$$\begin{aligned}
\Psi_{yh} = & \Psi_{yh0} - K_{1y} \frac{\partial \Psi_{yh0}}{\partial t} - K_{2y} \left(\frac{\partial \Psi_{yh0}}{\partial t} + \frac{d\vartheta_y}{dt} \frac{\partial \Psi_{yh0}}{\partial \vartheta_y} \right) + K_{1y} \frac{\partial^2 \Psi_{yh0}}{\partial t^2} + \\
& + K_{2y}' \left[\frac{\partial^2 \Psi_{yh0}}{\partial t^2} + 2 \frac{d\vartheta_y}{dt} \frac{\partial^2 \Psi_{yh0}}{\partial \vartheta_y \partial t} + \frac{d^2 \vartheta_y}{dt^2} \frac{\partial \Psi_{yh0}}{\partial \vartheta_y} + \left(\frac{d\vartheta_y}{dt} \right)^2 \frac{\partial^2 \Psi_{yh0}}{\partial \vartheta_y^2} \right] + \\
& + K_{12y} \left(\frac{\partial^2 \Psi_{yh0}}{\partial t^2} + \frac{d\vartheta_y}{dt} \frac{\partial^2 \Psi_{yh0}}{\partial t \partial \vartheta_y} \right)
\end{aligned} \tag{2.3}$$

De aici se obtin fluxurile principale pentru fazele λ si λ' sub forma

$$\Psi_{\lambda h} = \left(\Psi_{yh} \right)_{\vartheta_y = \vartheta_{\lambda}} \quad ; \quad \Psi_{\lambda' h} = \left(\Psi_{yh} \right)_{\vartheta_y = \vartheta_{\lambda'} + \vartheta_{\lambda}} \tag{2.4}$$

iar fluxurile datorate numai curentilor turbionari

$$\Psi_{\lambda w} = \Psi_{\lambda h} - \Psi_{\lambda h0} \quad ; \quad \Psi_{\lambda' w} = \Psi_{\lambda' h} - \Psi_{\lambda' h0} \tag{2.5}$$

Fluxurile totale se obtin prin adaugarea fluxurilor de dispersie la fluxurile principale

Admitem ca fluxurile $\Psi_{\lambda w}$ si $\Psi_{\lambda' w}$ corespund unor curenti electrici stabiliti intr-un sistem de infasurari auxiliare statorice cu m faze si in unul de infasurari auxiliare rotorice cu m' faze. Aceste infasurari au urmatoarele proprietati:

- sunt cuplate magnetic intre ele si cu infasurările reale ale masinii numai prin intermediul campului principal
- infasurarile auxiliare nu au camp de dispersie ci numai camp principal
- tensiunile la bornele lor au astfel de valori, incat pentru curentii stabiliti in ele suma puterilor care ies pe la bornele lor corespunde pierderilor in fier, separat pentru stator si rotor.
- curentii din infasurarile suplimentare produc un camp magnetic pentru care avem fluxurile $\Psi_{\lambda w}$ si $\Psi_{\lambda' w}$, aceleasi atat pentru infasurarile reale cat si pentru cele auxiliare

In aceasta situatie avem

$$\begin{aligned}
\Psi_{\lambda w} = & \sum_{\nu=1}^m L_{\nu \lambda} i_{\nu w} + \sum_{\nu'=1}^{m'} L_{\nu' \lambda} i_{\nu' w} \\
\Psi_{\lambda' w} = & \sum_{\nu=1}^m L_{\nu \lambda'} i_{\nu w} + \sum_{\nu'=1}^{m'} L_{\nu' \lambda'} i_{\nu' w}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Teza de doctorat

Marimile $\Psi_{\lambda w}$ si $\Psi_{\lambda v}$ sunt date de (2.5) iar ca necunoscute apar curentii i_{vw} si i_{vw} care se pot calcula cu

$$\begin{aligned}
 i_{\lambda w} &= \frac{1}{\Delta} \sum_{v=1}^m (-1)^{v+\lambda} \delta_{v\lambda} \Psi_{vw} + \frac{1}{\Delta} \sum_{v=1'}^{m'} (-1)^{\lambda+m+v} \delta_{v\lambda} \Psi_{vw} \\
 i_{\lambda v} &= \frac{1}{\Delta} \sum_{v=1}^m (-1)^{m+\lambda+v} \delta_{v\lambda} \Psi_{vw} + \frac{1}{\Delta} \sum_{v=1'}^{m'} (-1)^{v+\lambda} \delta_{v\lambda} \Psi_{vw}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

in care Δ este determinantul sistemului iar $\delta_{\alpha\beta}$ este minorul care se obtine din Δ prin eliminarea liniei α si a coloanei β , unde α si β iau valorile $1, 2, \dots, m$, respectiv $1', 2', \dots, m'$.

$$\Delta = \begin{vmatrix} L_{11h} & L_{\beta 1h} & L_{m' 1h} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{1\alpha h} & L_{\beta\alpha h} & L_{m'\alpha h} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{1m'h} & L_{\beta m'h} & L_{m'm'h} \end{vmatrix} \tag{2.8}$$

Notand

$$\Psi_{\lambda\sigma} = \Psi_{\lambda} - \Psi_{\lambda h} \quad ; \quad \Psi_{\lambda'\sigma} = \Psi_{\lambda'} - \Psi_{\lambda'h} \tag{2.9}$$

unde $\Psi_{\lambda\sigma}$ si $\Psi_{\lambda'\sigma}$ sunt fluxuri de dispersie proprie si mutuala, pentru energia magnetica W_m a masinii avem

$$2W_m = \sum_{\lambda=1}^m i_{\lambda} \Psi_{\lambda\sigma} + \sum_{\lambda'=1'}^{m'} i_{\lambda'} \Psi_{\lambda'\sigma} + \sum_{\lambda=1}^m (i_{\lambda} + i_{\lambda w}) \Psi_{\lambda h} + \sum_{\lambda'=1'}^{m'} (i_{\lambda'} + i_{\lambda' w}) \Psi_{\lambda' h} \tag{2.10}$$

Fluxurile principale se pot scrie acum sub forma

$$\begin{aligned}
 \Psi_{\lambda h} &= \sum_{v=1}^m L_{v\lambda h} (i_v + i_{vw}) + \sum_{v=1'}^{m'} L_{v'\lambda h} (i_{v'} + i_{v'w}) \\
 \Psi_{\lambda' h} &= \sum_{v=1}^m L_{v\lambda' h} (i_v + i_{vw}) + \sum_{v=1'}^{m'} L_{v'\lambda' h} (i_{v'} + i_{v'w})
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Cuplul electromagnetic se poate obtine cu relatia

$$M = p \left(\frac{\partial W_m}{\partial \vartheta} \right)_{i=\text{const}} \quad (2.12)$$

Din (2.10), (2.11) si (2.12) rezulta

$$\begin{aligned} M = & \frac{p}{2} \left\{ \sum_{\lambda=1}^m i_{\lambda} \left(\frac{\partial \Psi_{\lambda\omega}}{\partial \vartheta} \right)_i + \sum_{\lambda=1'}^m i_{\lambda} \left(\frac{\partial \Psi_{\lambda'0}}{\partial \vartheta} \right)_i + \right. \\ & + \sum_{\lambda=1}^m (i_{\lambda} + i_{\lambda\omega}) \left[\sum_{v=1}^m (i_v + i_{v\omega}) \frac{\partial L_{v\lambda h}}{\partial \vartheta} + \sum_{v=1'}^m (i_v + i_{v\omega}) \frac{\partial L_{v\lambda'h}}{\partial \vartheta} \right] + \\ & \left. + \sum_{\lambda=1'}^m (i_{\lambda} + i_{\lambda\omega}) \left[\sum_{v=1}^m (i_v + i_{v\omega}) \frac{\partial L_{v\lambda'h}}{\partial \vartheta} + \sum_{v=1'}^m (i_v + i_{v\omega}) \frac{\partial L_{v\lambda'h}}{\partial \vartheta} \right] \right\} \quad (2.13) \end{aligned}$$

Aceasta este expresia generala a cuplului electromagnetic, valabila pentru un regim oarecare (sinusoidal sau nesinusoidal) si pentru masini de forma oarecare (simetrice sau nesimetrice).

In cazul masinii de inductie simetrice in regim sinusoidal, cu rotorul scurtcircuitat, neglijand pierderile in miezul feromagnetic rotoric, printr-o serie de calcule[13] expresia (2.13) se reduce la

$$M = \frac{pm_1 R_2}{\omega_1 s} I_2'^2 \quad (2.14)$$

La tensiune constanta

De cele mai multe ori in practica masina de inductie este alimentata de la o retea de tensiune si frecventa constanta. In acest caz este util sa se scrie expresia cuplului in functie de tensiunea de alimentare.

Conform [9. pg.237] curentul I_2' este

$$\underline{I}_2' = - \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{C}_1 \underline{Z}_2} \quad (2.15)$$

sau

$$I_2'^2 = \frac{U_1^2}{\left(R_1 + C_1 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2} \quad (2.16)$$

inlocuind pe (2.16) in (2.14) obtinem in final

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{\omega \left(R_1 + C_1 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2} \quad (2.17)$$

Cuplul obtine valori extreme pentru s_k care anuleaza derivata. Din $dM/ds=0$ se obtine

$$\frac{C_1 R_2'}{s_k} = \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2} \quad (2.18)$$

Inlocuind in (2.17) se obtin valorile extreme ale cuplului electromagnetic sub forma

$$M_k = \frac{pm_1 U_1^2}{\omega_1} \frac{1}{2C_1} \frac{1}{R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2}} \quad (2.19)$$

in care semnul (+) corespunde regimului de motor si celui de frana, iar semnul (-), regimului de generator.

La curent constant

Masina poate sa functioneze si la curent constant, in cazul alimentarii prin invertoare de curent, expresia cuplului electromagnetic avand alta forma. In scopul obtinerii acestei expresii se va scrie I_2 in functie de I_1

$$I_2' = -\frac{Z_m}{Z_m + Z_2} I_1 \quad (2.20)$$

Teza de doctorat

sau, dupa simplificari, considerand pe R_m mult mai mic decat R'_2/s din Z'_2 si decat X_m din Z_m

$$\underline{I}'_2 = -\frac{jX_m}{\frac{R'_2}{s} + j(X'_2 + X_m)} \underline{I}_1 \quad (2.21)$$

inlocuind in (2.14) se obtine

$$M = \frac{pm_1 R'_2}{\omega_1 s} \frac{I_1^2}{\left(\frac{R'_2}{sX_m}\right)^2 + \left(1 + \frac{X'_2}{X_m}\right)^2} \quad (2.22)$$

Alunecarea critica s_{k1} penru care se stabileste cuplul maxim pe care il poate dezvolta masina alimentata in curent este

$$s_{k1} = \frac{R'_2}{X_m \left(1 + \frac{X'_2}{X_m}\right)} \quad (2.23)$$

iar cuplul critic corespunzator

$$M_{k1} = \frac{pm_1}{2\omega_1} I_1^2 \frac{X_m}{1 + \frac{X'_2}{X_m}} \quad (2.24)$$

Caracteristicile mecanice la frecventa fixa si amplitudine variabila a unei masini asincrone astfel alimentate in functie de alunecarea s sunt reprezentate in (Fig.2.4). Este evident ca forma caracteristicii mecanice a masinii asincrone functionand la curent imprimat, difera esential de cea a masinii alimentate in tensiune.

Masina asincrona de tractiune nu poate functiona, la curent imprimat, pe portiunea stabila a caracteristicii sale mecanice, unde $\partial M/\partial s > 0$, deoarece aceasta portiune corespunde unor alunecari foarte reduse.

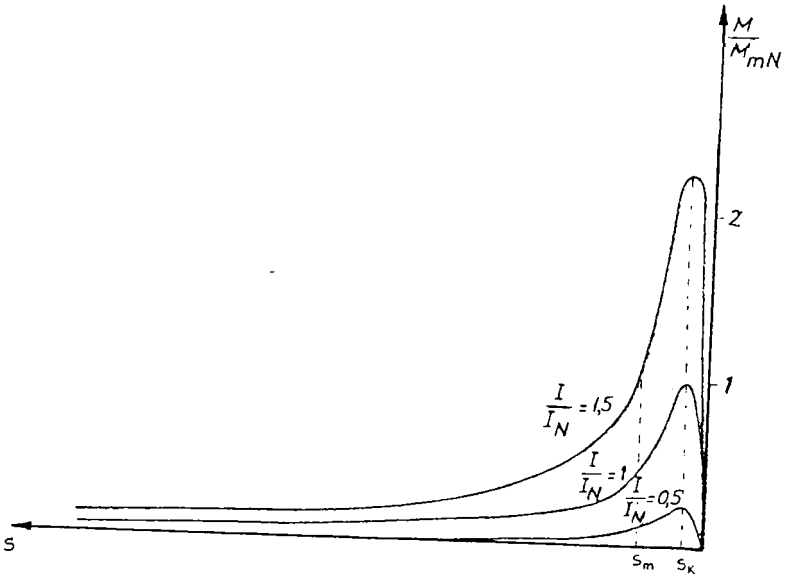


Fig.2.4.

Alunecarea nominala a masinii corespunde, pe caracteristica mecanica de functionare la curent imprimat, unei portiuni instabile, unde $\partial M/\partial s < 0$. Se impune, deci, un sistem de reglare a masinii de inductie alimentata cu curent imprimat de la CSF, pentru asigurarea unei functionari static stabile in zona alunecarilor mici.

2.3 REGLAREA VITEZEI MOTORULUI DE INDUCTIE

Analizand relatiile obtinute pentru cuplul electromagnetic se remarca faptul ca exista o multitudine de posibilitati de reglare a vitezei motorului asincron, actionandu-se fie asupra parametrilor proprii ai masinii : numar de polii, reactanta si rezistenta stator, respectiv rotor, fie asupra parametrilor tensiunilor sau curentilor de alimentare : frecventei, amplitudinii sau fazei.

Cea mai eficienta metoda de reglare a vitezei motoarelor asincrone o reprezinta modificarea tensiunii, respectiv curentului statoric. Modificarea frecventei se face cel mai adesea astfel, incat aceasta sa aiba loc la flux constant (cuplu electromagnetic maxim), ceea ce implica ca o data cu frecventa sa aiba loc si o modificare adecvata a tensiunii/curentului de alimentare.

La tensiune constanta

La functionarea motorului asincron, alimentat in tensiune, in regim de frecventa variabila este necesar sa se regleze si tensiunea la o valoare proportionala cu frecventa .

Principiul de reglare a vitezei este reprezentat in (Fig.2.5). Pana la atingerea vitezei nominale reglajul se face prin modificarea tensiunii si a frecventei in asa fel ca fluxul din intrefier sa ramana constant. Motorul functioneaza in acest domeniu cu cuplu constant.

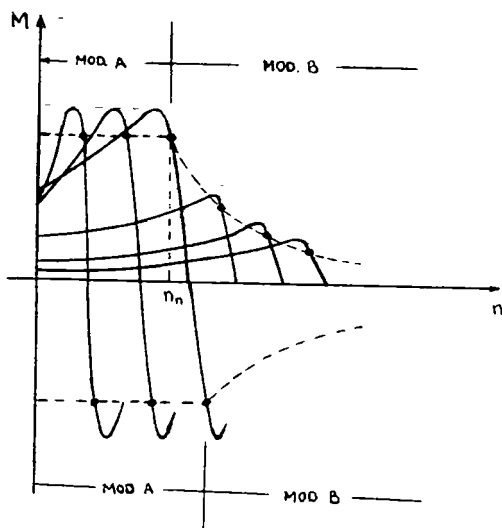


Fig.2.5.

Peste viteza nominala, tensiunea se mentine constanta iar frecventa se majoreaza in continuare. Fluxul din intrefierul motorului si cuplul se vor reduce.

La curent constant

Alunecarea nominala s_n a masinii corespunde, pe caracteristica mecanica de functionare la curent imprimat, unei portiuni instabile ($\partial M / \partial s < 0$). Este necesar un sistem de reglare a masinii asincrone de tractiune cu curent imprimat de la CSF, pentru asigurarea unei functionari static stabile in zona alunecarilor mici. Sistemul de reglare se bazeaza, de obicei, pe controlul curentului statoric I_1 si al pulsatiei de alunecare ω_2 .

In domeniul frecventelor statorice subnominale, functionarea la cuplu constant a masinii asincrone de tractiune cu curent imprimat de la CSF se obtine prin mentinerea constanta a pulsatiei de alunecare ω_2 si a fluxului statoric din intrefier.

Caracteristicile de reglaj pentru cateva frecvente subnominale sunt prezentate in (Fig.2.6).

In domeniul frecventelor statrice supranominale, masina asincrona de tractiune va functiona la putere constanta, respectiv flux magnetic slabit.

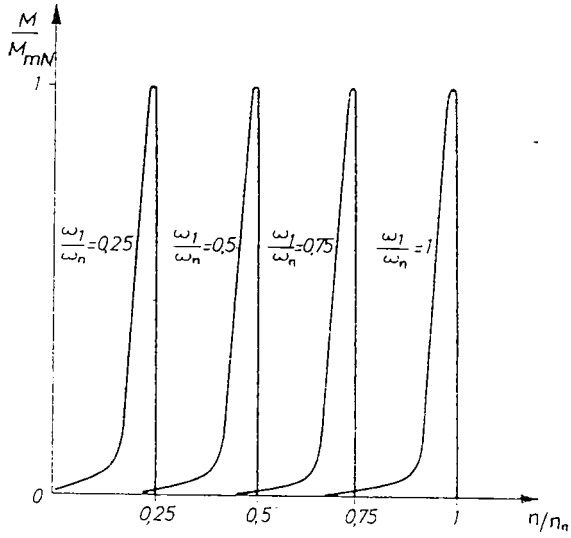


Fig. 2.6

3. ALIMENTAREA MOTOARELOR DE INDUCTIE PRIN CONVERTOARE STATICE DE FRECVENTA

Convertoarele statice de frecventa (CSF) permit transformarea energiei electrice de la rețeaua trifazată de tensiune și frecvență fixă sau de la rețeaua de c.c. cu tensiune fixă într-o energie de c.a. cu tensiune și frecvență variabilă. Aceste circuite electronice constituie surse optime de alimentare a motoarelor de c.a. în sistemele de acționare cu viteză reglabilă. Acționările care utilizează motoare asincrone cu rotorul în scurtcircuit, alimentate de la CSF, au pătruns în cele mai diferite domenii, printre care și în tracțiunea electrică.

CSF pot fi clasificate în două mari categorii: directe sau cicloconvertoare și indirecte sau cu circuit intermediar de tensiune continuă.

Convertoarele directe se folosesc preponderent la alimentarea mașinilor sincrone de putere mare și turatie mică, frecvența lor de ieșire variind între 1-10 Hz (în cazuri mai rare limita superioară a frecvenței de ieșire poate atinge 20 Hz), iar comutația tiristoarelor din componența lor este naturală.

Convertoarele cu circuit intermediar de tensiune continuă au limite mult mai largi din punct de vedere al frecvenței tensiunii de ieșire. În acest caz, CSF este alcătuit dintr-un redresor (comandat sau necomandat) sau un VTC, un circuit intermediar de c.c. având un caracter de sursă de tensiune continuă constantă sau variabilă (Fig.3.1.a) sau de sursă de curent continuu constant (Fig.3.1.b) și în sfârșit un invertor care poate fi de tensiune sau de curent.

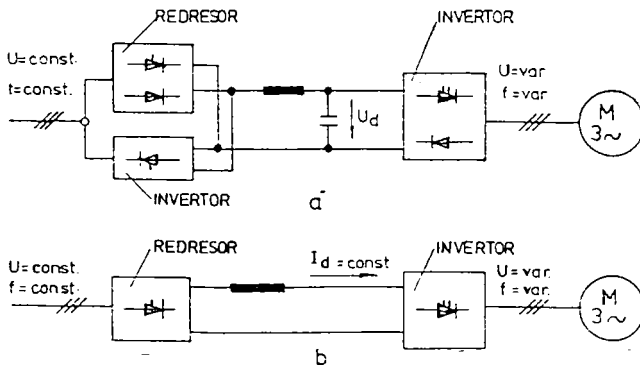


Fig.3.1

În primul caz, dacă redresorul este necomandat, invertorul are rolul de a produce o tensiune de ieșire de frecvență și amplitudine variabile, obiectiv care se obține cel mai adesea prin procedeul modulației în durată (MID) sau în amplitudine (MIA) a impulsurilor tensiunii de ieșire. În circuitul intermediar se introduce un condensator de capacitate mare iar pentru frânarea mașinii în regim de generator este necesar un invertor cu comutație de la rețea, montat în antiparalel cu redresorul de alimentare.

În cazul al doilea, redresorul de la intrare este comandat, asigurând variația tensiunii continue la intrarea invertorului, acesta din urmă având rolul de a modifica frecvența de ieșire. În circuitul intermediar există o inductanță de valoare mare iar pentru frânarea mașinii în regim de generator nu este necesar invertor la intrare.

Ansamblul CSF-motor asincron cu rotorul în scurtcircuit facilitează punerea de acord a caracteristicilor mecanice a motorului cu cerințele impuse unui VEM cum ar fi: pornirea și accelerarea controlată, funcționarea cu cuplu constant sau putere constantă, schimbarea sensului de rotație, gama largă de reglare a vitezei cu finete mare, precum și posibilitatea recuperării energiei disponibile la frânarea motoarelor care pot trece în regim de funcționare ca generatoare.

Sistemele de comandă și reglare ale CSF destinate alimentării cu tensiune și frecvență variabile a motoarelor de c.a. trebuie să îndeplinească următoarele condiții: siguranță mare de funcționare, stabilitatea și continuitatea reglajului, finetea reglării, pierderi reduse și investiții minime. Circuitele de reglare pot utiliza ca bucle de reacție tensiunea de ieșire, curentul absorbit sau cel din circuitul intermediar, viteza mașinii de lucru, fluxul din întrefierul mașinii etc.

Principalele dezavantaje ale CSF se manifestă în existența armonicelor superioare în tensiunea de ieșire a acestora care provoacă pierderi suplimentare și cupluri pendulare la motoarele de c.a., generarea de putere deformantă în rețeaua de alimentare, precum și factorul de putere scăzut la unele variante de CSF pentru game largi de reglare și pentru sarcini variabile în timp.

3.1 INVERTORUL DE TENSIUNE

În ultimul timp și în segmentul tracțiunii ușoare, urbane, dominat de invertoare de curent, își fac loc tot mai mult invertoarele de tensiune.

Acest tip de invertor poate fi realizat în diferite variante care se pot clasifica după tipul circuitului de stingere, astfel :

- invertoare cu circuite de stingere individuale cu tiristoare auxiliare
- invertoare cu stingere autonomă
- invertoare cu circuit de stingere comun

Deși mai sofisticate, invertoarele cu stingere comandată prin tiristoare auxiliare se utilizează pe scară foarte largă din cauza că conferă o siguranță sporită comutației forțate iar fenomenul de stingere poate fi împins spre durate mici, de ordinul timpilor de revenire ai ansamblului tiristor-diodă de recuperare.

Invertoarele, de acest tip realizate, permit functionarea in game largi de frecventa si pot functiona atat in regim de modulare in durata a impulsurilor, cat si in regim nemodulat. Astfel in regim modulat se ating domenii de variatie a frecventei de 1:300, cu frecventa minima de 0.4 Hz, cu tensiuni alternative la iesirea invertorului de pana la 1300V.

O varianta de invertor de tensiune foarte des intalnita atat in tractiunea feroviara cat si in tractiunea usoara, gen tramvai, metrou, troleibus, este cea redată in (Fig.3.2)

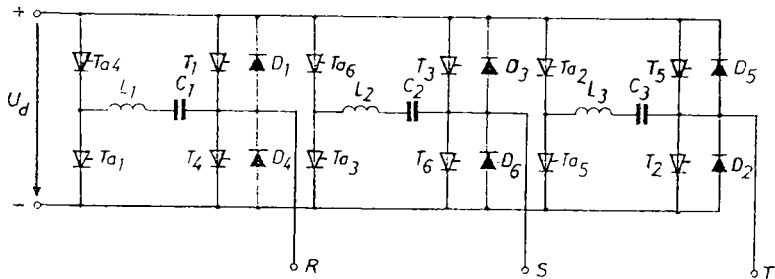


Fig.3.2

Elementele componente ale invertorului sunt: tiristoarele principale T_1, T_2, \dots, T_6 , tiristoarele de stingere $T_{a1}, T_{a2}, \dots, T_{a6}$, condensatoarele de stingere C_1, C_2, \dots, C_6 , inductantele de stingere L_1, L_2, \dots, L_3 , si diodele de recuperare D_1, D_2, \dots, D_6 .

Invertorul este realizat in punte trifazata si are asigurata stingerea independenta a tiristoarelor principale prin aprinderea tiristorului auxiliar corespunzator. Circuitul de stingere, de tip LC, intervine doar pe durata procesului de comutatie, in rest fiind separat de circuitele principale. De aici provine avantajul acestei scheme fata de schemele ale caror circuite de stingere sunt strabatute de curentii de sarcina care provoaca pierderi importante in inductantele de stingere. Prezenta tiristoarelor de stingere asigura amorsarea fenomenului oscilant la comanda de blocare a unui tiristor principal si, de asemenea, asigura incarcarea oscilanta a condensatoarelor de stingere. Trecerea din starea de conductie a unui tiristor principal in starea blocata se realizeaza prin anularea curentului care-l strabate si aplicarea concomitenta a unei tensiuni de blocare de-a lungul tiristorului principal, tensiune care prezinta caderea de tensiune in sens direct pe dioda de recuperare.

Acest invertor poate realiza reglarea simultana a frecventei si tensiunii de iesire, situatie in care invertorul va fi alimentat cu tensiune continua constanta.

Principiul de functionare al invertorului este redat in mod detaliat in literatura de specialitate.

3.1.1 MODULATIA IN DURATA A IMPULSURILOR TENSIUNII DE IESIRE

Modulatia in durata a impulsurilor este o metoda prin care intervalele de conductie ale tiristoarelor se fragmenteaza in vederea obtinerii unui continut redus de armonici al tensiunii de alimentare a motorului asincron. Modulatia poate fi facuta in mai multe feluri, mai raspandita fiind modulatia in durata dupa o lege impusa. In cazul acesta intervalele de conductie ale tiristoarelor principale ale inverterului vor fi fragmentate, duratele impulsurilor de tensiune fiind modulate conform unui semnal modulator, in timp ce tensiunea de alimentare a motorului ramanane constanta. Gama de variatie a unui semnal modulator se alege in functie de gama de reglare dorita a turatiei motorului. In general, se urmareste ca modulatia in durata sa se faca dupa o lege sinusoidala, cea ce face ca motorul sa functioneze in conditii apropiate de cele corespunzatoare alimentarii cu unda sinusoidala.

Pentru a urmarii modul in care se obtine tensiunea de iesire a inverterului se va considera schema din (Fig.3.2).

Impulsurile de tensiune modulate in durata dupa o lege sinusoidala, se obtin prin compararea unui semnal modulator sinusoidal de frecventa egala cu frecventa fundamentalei tensiunii dorite de iesire din inverter, cu un semnal triunghiular de frecventa ridicata (Fig.3.3).

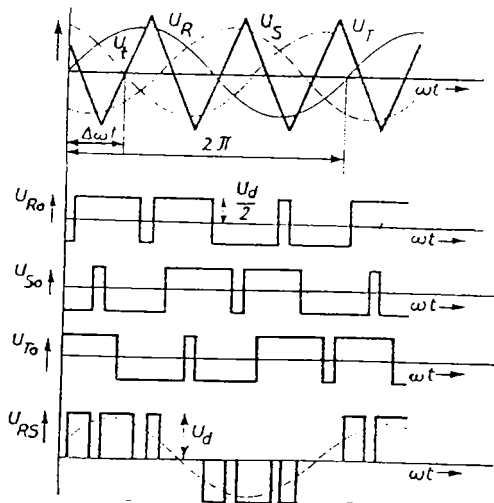


Fig.3.3

In (Fig.3.3) sunt prezentate tensiunile de faza astfel obtinute pentru un semnal triunghiular de frecventa de trei ori mai mare decat frecventa semnalului sinusoidal modulator. Ecuatiile semnalelor sinusoidale modulatoroare sunt :

$$\begin{aligned} U_R &= U_{R\max} \sin \omega t \\ U_S &= U_{S\max} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ U_T &= U_{T\max} \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Daca urmarim faza R , in intervalele de timp in care valoarea instantanee a semnalului modulator U'_R depaseste valoarea semnalului modulator U_{TR} , schema de comanda provoaca intrarea in conductie a tiristorului principal T_1 , conectat cu anodul la plusul sursei de alimentare. Pentru celelalte intervale de timp, cand valoarea instantanee a semnalului U_R este mai mica decat valoarea semnalului triunghiular, se comanda intrarea in conductie a tiristorului principal T_4 conectat cu catodul la minusul sursei de alimentare. Tensiunea de iesire de faza a inverterului este data in tabelul 3.1 .

$U_R(t) - U_i(t) \geq 0$	$U_{R0}(t) = 0.5 U_d$
$U_R(t) - U_i(t) < 0$	$U_{R0}(t) = -0.5 U_d$

Tabelul 3.1

Aceiasi procedura se urmeaza si pentru fazele S si T .

Pentru tensiunile de linie sunt valabile ecuatiile:

$$\begin{aligned} U_{RS}(t) &= U_{R0}(t) - U_{S0}(t) \\ U_{ST}(t) &= U_{S0}(t) - U_{T0}(t) \\ U_{TR}(t) &= U_{T0}(t) - U_{R0}(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Tensiunile de linie vor apare ca succesiuni de impulsuri de tensiune dreptunghiulara, modulata in durata, de valoare constanta U_d . In tabelul 3.2 sunt date valorile tensiunii de linie U_{RS} .

Semnalele modulatoroare pot avea si forma de trapez sau in trepte, forme care se pot obtine mai usor si care pot sa aproximeze destul de bine o sinusoida.

Modificarea valorii tensiunii de iesire a inverterului se obtine prin variatia corelata cu frecventa de iesire, dupa o anumita lege de reglare impusa, a amplitudinii semnalelor modulatoroare in timp ce amplitudinea semnalului modulat triunghiular trebuie sa ramana constanta.

$U_r(t) - U_i(t) \geq 0$ $U_s(t) - U_\lambda(t) < 0$	$U_{rs}(t) = U_d$
$U_r(t) - U_i(t) \geq 0$ $U_s(t) - U_\lambda(t) > 0$	$U_{rs}(t) = 0$
$U_r(t) - U_i(t) \leq 0$ $U_s(t) - U_\lambda(t) > 0$	$U_{rs}(t) = -U_d$
$U_r(t) - U_i(t) \leq 0$ $U_s(t) - U_\lambda(t) < 0$	$U_{rs}(t) = 0$

Tabelul 3.2

Armonicile superioare din componenta tensiunii de iesire a inverterului, la alimentarea unui motor asincron, produc pierderi sporite in motor, pierderi care se pot reduce prin cresterea raportului dintre frecventa semnalului triunghiular si frecventa semnalelor modulatorie.

Tehnicile de generare a undelor modulate in durata pot fi implementate in trei moduri: analogice, hibride si numerice. Principiul modulatiei in durata prezentat mai sus se realizeaza prin metode analogice cunoscute sub denumirea de modulatii cu esantionare naturala. Ele prezinta ca dezavantaje neliniaritati, variatii cu temperatura, imbatranirea componentelor, imprecizii etc. Implementarea hibrida combina circuite analogice si digitale incercand sa reduca din dezavantajele mentionate mai sus prin inlocuirea generatoarelor de semnal analogice cu generatoare digitale. Metodele numerice pot utiliza solutii pur hardware, cum este circuitul integrat VLSI HEF 4752, elaborat de firma MBL [31] sau diferite rapoarte intre partea de hardware si de software.

Producatorii de invertoare s-au indreptat in general catre dezvoltarea unor tehnici de generare a pulsurilor utilizand ca element principal microprocesorul. In consecinta au fost dezvoltate tehnici speciale pentru a facilita implementarea microprocesoarelor, precum esantionarea uniforma si esantionarea optima [30].

Majoritatea sistemelor numerice de generare a undelor modulate in durata, desi superioare celor analogice prezinta insa si inflexibilitate din cauza producerii undelor „sincronizate”, frecventa de comutatie a inverterului variind cu frecventa motorului. Printre dezavantajele undelor PWM sincronizate se pot aminti: incapacitatea de a produce frecvente de iesire reduse, variatia pierderilor de comutatie cu viteza motorului, gama limitata de viteze, cresterea zgomotului produs de motor, incapacitatea de a obtine un reglaj fin al tensiunii de iesire etc.

Pentru a elimina aceste neajunsuri au fost dezvoltate si alte tehnici noi, complet digitale de modulare in durata a impulsurilor. Un exemplu este tehnica best-PWM dezvoltata la Universitatea Loughborough din Marea Britanie [33]. Noua tehnica este o implementare in timp real a esantionarii naturale. Ea elimina toate dezavantajele tehnicilor PWM sincronizate si ofera o inalta performanta in toate conditiile de functionare.

3.1.2 ANALIZA ARMONICA A UNDEI DE TENSIUNE DE LA IESIREA INVERTORULUI

In scopul efectuării analizei armonice, se va considera cazul in care semnalul modulator este un sistem trifazat sinusoidal, iar semnalul modulat, un semnal triunghiular simetric axat fata de linia de zero, unic pentru cele trei faze modulator.

Daca nu exista conductor de nul, la motorul alimentat de catre invertor vor lipsi armonicile in tensiunea de iesire multiplu de trei, rolul preponderent al armonicilor de tensiune fiind detinut de armonicile de rang 5,7,11,13,17,19 etc. Marimile caracteristice ale modulatiei in vederea analizei armonice sunt :

f - frecventa undei fundamentale de tensiune la iesirea invertorului, totodata frecventa semnalului modulator

f_i - frecventa semnalului modulat triunghiular

α - defazajul intre trecerea prin zero a tensiunii modulator si a celei modulate

n - raportul intre frecventa de comutare f_i si frecventa undei fundamentale de tensiune f

$$n = \frac{f_i}{f} \quad (3.3)$$

p - raportul dintre valorile de varf ale semnalelor sinusoidal modulator si triunghiular modulat. Marimea p defineste gradul de modulare

$$p = \frac{U_{R\max}(f_{\max})}{U_{i\max}} \quad (3.4)$$

$U_{Rm}(f_m)$ este valoarea de varf a undei sinusoidale modulator corespunzatoare fazei R la frecventa de iesire maxima pana la care exista procesul de modulare, iar U_{im} este valoarea de varf a semnalului triunghiular modulat

a - indicele de ondulate al undei fundamentale a tensiunii compuse de iesire a invertorului

$$a = \frac{U_{\max}^1 - U_{\min}^1}{U_{\max}^1 + U_{\min}^1} \quad (3.5)$$

unde U_{\max}^1 si U_{\min}^1 sunt valorile de varf maxime si minime ale fundamentalei undei tensiunii compuse de iesire pentru diferite defazaje intre tensiunea modulator si semnalul triunghiular. Se

pot calcula si factorii de ondulate ai armonicelor de orice ordin ale tensiunii de iesire prin introducerea in relatia (3.5) valorile maxime si minime ale valorilor de varf ale armonicelor al care calcul se doreste, continute in tensiunea compusa de iesire a inverterului.

$\varphi^{(k)}$ - defazajul armoniciei de ordinul k apartinand tensiunii compuse de iesire a inverterului raportat la trecerea prin zero a tensiunii modulare sinusoidale

U_f - valoarea instantanee a tensiunii triunghiulare

$U^{(k)}$ - valoarea de varf a armoniciei de tensiune de ordin k la iesirea inverterului

ω - pulsatia undei fundamentale de tensiune

U_{R0}, U_{S0}, U_{T0} sunt tensiunile de faza la iesirea inverterului (valori instantanee) iar U_R, U_S, U_T tensiunile sinusoidale modulare (valori instantanee).

Continutul armonic al undei modulate in durata, indicele de ondulate α , amplitudinea si faza fundamentalei tensiunii de iesire, depind de defazajul initial dintre tensiunea modulare semnalul modulat, α , de raportul dintre frecventa semnalului modulat triunghiular si frecventa semnalului modulator, n , precum si de gradul de modulare p . Pentru a aprecia cantitativ influenta acestor factori este necesara efectuarea analizei armonice a tensiunii obtinute la iesirea inverterului tensiune ce se va aplica motorului asincron.

Pentru simplificare se va considera ca reglarea se face cu mentinerea constanta a raportului tensiune-frecventa, frecventa maxima f_G pana la care se efectueaza modulatia fiind 50Hz. Valoarea tensiunii sinusoidale pentru frecventa maxima este U_G .

Perioada semnalului triunghiular T_t in functie de perioada semnalului modulator T este

$$T_t = \frac{T}{n} = \frac{1}{nf_G} \tag{3.6}$$

Defazajul α se va putea exprima in fractiuni din perioada semnalului triunghiular T_t . C ajutorul marimilor definite anterior si al (Fig.3.3) se pot scrie ecuatiile semnalelor sinusoidal corespunzatoare fazelor R, S si T si al semnalului triunghiular.

Ecuatiile semnalelor modulare corespunzatoare fazelor R, S si T (3.2), tinand cont de relatiile

$$\begin{aligned} \frac{U_{R\max}}{f} &= \frac{U_G}{f_G} \\ \frac{U_{S\max}}{f} &= \frac{U_G}{f_G} \\ \frac{U_{T\max}}{f} &= \frac{U_G}{f_G} \end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}
 U_R &= U_G \frac{f}{f_G} \sin \omega t \\
 U_S &= U_G \frac{f}{f_G} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\
 U_T &= U_G \frac{f}{f_G} \sin(\omega t - 4\pi/3)
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Dreapta cu panta pozitiva a semnalului triunghiular are ecuatia

$$U_t = \frac{U_{R\max}}{4} \frac{p}{T_t} \left[t - (\alpha + kT_t) \right] \tag{3.9}$$

sau tinand cont de (3.6) si (3.7)

$$U_t = \frac{4nfU_G}{p} \left[t - \left(\alpha + \frac{k}{nf_G} \right) \right] \tag{3.10}$$

unde $k=0,1,2,3,\dots$, iar $0 \leq \alpha + \frac{k}{nf_G} \leq T$

dreapta cu panta negativa a semnalului triunghiulat are ecuatia

$$U_t = -\frac{U_{R\max}}{4} \frac{p}{T_t} \left[t - \left(\alpha + kT_t + \frac{T_r}{2} \right) \right] \tag{3.11}$$

cu (3.6) si (3.7) ecuatia (3.11) primeste forma

$$U_r = -\frac{4nfU_G}{P} \left[t - \left(\alpha + \frac{k + \frac{1}{2}}{nf_G} \right) \right] \quad (3.12)$$

$$\text{unde } 0 \leq \alpha + \frac{k + \frac{1}{2}}{nf_G} \leq T$$

Funcția U_{RS} se poate dezvolta în serie Fourier pe durata semnalului modulator :

$$U_{RS}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (3.13)$$

unde

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T U_{RS}(t) dt \quad (3.14)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T U_{RS}(t) \cos n\omega t dt \quad (3.15)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T U_{RS}(t) \sin n\omega t dt \quad (3.16)$$

Valoarea absolută a amplitudinii și defazajul armonicii de ordinul n vor fi:

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \varphi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n} \quad (3.17)$$

În (Fig.3.4. a,b) se prezintă variația fundamentalei tensiunii de ieșire, respectiv a fazei acestora în funcție de defazajul între unda modulată și cea modulatoră, α , pentru $p=0.9$ și $n=3$.

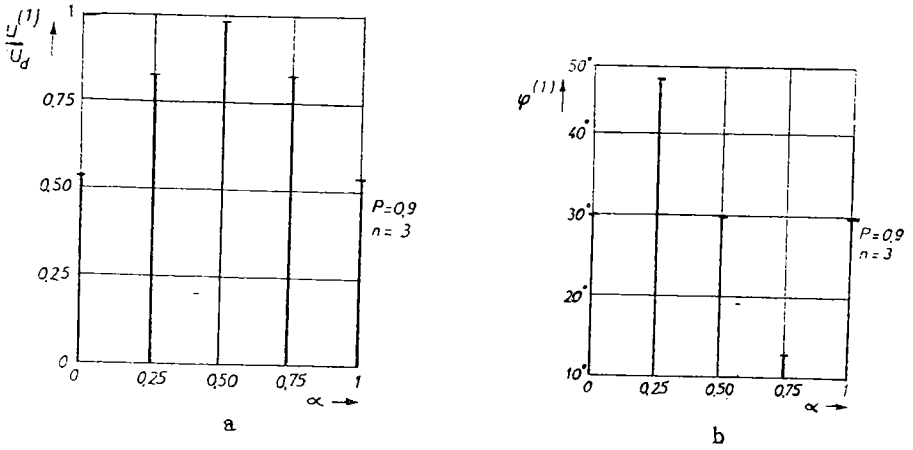


Fig.3.4

Se constata ca pentru regimul de modulare cu trei pulsuri defazajul optim pentru semnalul triunghiular fata de trecerea prin zero a sinusoidii este 0.5, valoare pentru care fundamentala unde de tensiune intre faze este defazata de unda modulatorie cu 30° el.

In (Fig.3.5. a,b) sunt prezentate amplitudinea si faza unde fundamentalei tensiunii de iesire pentru $n=6$ si $n=9$, pentru gradul de modulare $p=0.9$. Este evidenta reducerea factorului de ondulare cu marirea numarului de pulsuri, de asemenea defazajul variaza putin in jurul valorii de 30° el la variatia defazajului intre undele modulate si modulatorie.

— $n = 6$
 - - - $n = 9$
 $P = 0,9$

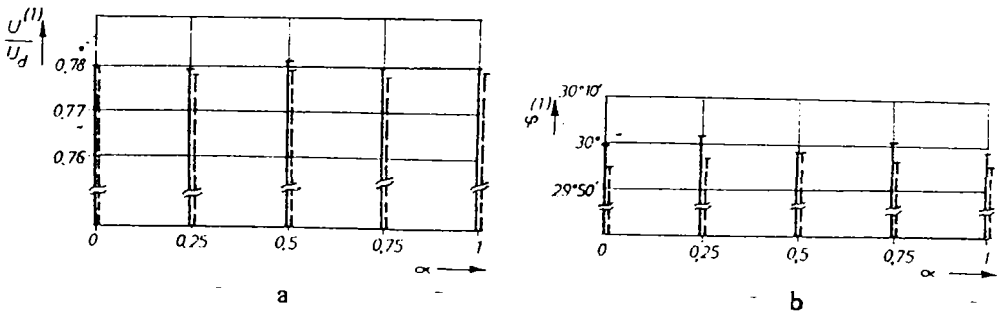


Fig.3.5

Pentru a pune in evidenta influenta raportului frecventelor modulate si modulatorie n asupra marimii amplitudinilor armonice tensiunii compuse de iesire, acestea s-au reprezentat in (Fig.3.6.a,b,c) pentru $n=3$, $n=6$, $n=9$, in functie de gradul de modulare p , pentru defazajul optim al tensiunii triunghiulare fata de tensiunea sinusoidală egal cu o semiperioada a semnalului triunghiular. In grafic sunt redade armonicile de rang 5,7,11 si 13.

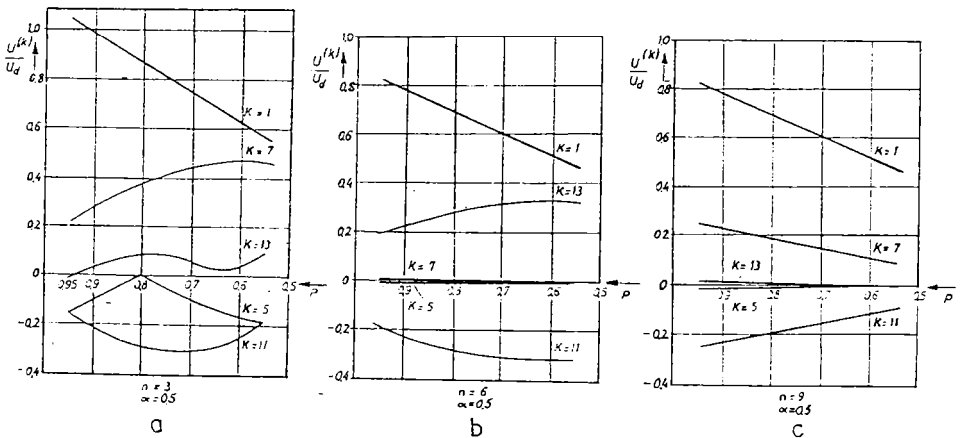


Fig.3.6

3.2 INVERTORUL DE CURENT

Invertoarele de curent, desi prezinta o serie de avantaje importante fata de invertoarele de tensiune, ca de exemplu, utilizarea unor tiristoare normale in loc de tiristoare rapide, renuntarea la diodele de recuperare, pentru franarea cu recuperare a masinilor de c.a. ce functioneaza in regim de generator nu sunt necesare invertoare la intrarile convertoarelor statice de frecventa, nu pot fi folosite la frecvente joase de alimentare a motoarelor asincrone, din cauza formei nesinusoidale a curenților de iesire din aceste invertoare si anume o forma cu doua blocuri dreptunghiulare de curent de sensuri contrare si de durate corespunzand la unghiuri de 120° el. La arborele unui motor asincron cu rotorul in scurtcircuit alimentat cu astfel de curenti statorici apar cupluri pendulare care pot deveni jenante pentru sistemul de actionare, chiar daca pierderile de putere provocate in motor de armonicile superioare ale acestor curenti pot fi considerate reduse.

Cea mai raspandita varianta de invertoare de curent este cea redată in (Fig.3.7) si se realizeaza cu tiristoare conventionale normale.

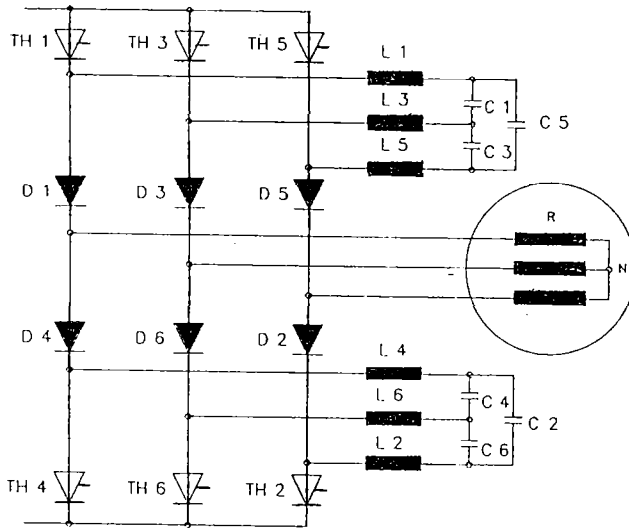


Fig.3.7

Masina asincrona alimentata de la invertorul de curent este un consumator inductiv care absoarbe putere reactiva pentru producerea campului magnetic propriu. Cum tensiunile electromotoare de la bornele infasarilor sunt defazate inaintea curentilor, nu pot asigura comutatia tiristoarelor. Asadar este necesar un sistem de comutatie forzata. Solutia cu diode de separare este cea mai simpla pentru ca nu necesita tiristoare auxiliare. Stingerea unui tiristor principal este asigurata prin aprinderea tiristorului care urmeaza a prelua conductia.

Elementele componente ale invertorului sunt cele sase tiristoare TH1,...,TH6, sase diode D1,...,D6, care realizeaza decuplarea celor sase condensatoare de stingere, C1,...,C6, de infasarile motorului. Condensatoarele de stingere asigura energia necesara pentru comutatia curentului de la o faza la alta. Inductantele L1,...,L6 limiteaza viteza de variatie a curentului prin tiristoare. Transferul curentului de la o infasurare la alta se efectueaza simplu prin aprinderea tiristorului care urmeaza a prelua conductia. Principiul de functionare al invertorului este redat detaliat in literatura de specialitate.

3.2.1. EFECTELE ARMONICELOR SUPERIOARE DE LA IESIREA INVERTOARELOR DE CURENT

Invertorul de curent alimenteaza motorul asincron de tractiune cu un curent de faza sub forma unor blocuri dreptunghiulare (Fig.3.8.). Analiza Fourier pentru masina legata in stea arata ca

procesul se poate reprezenta ca si cand motorul ar fi alimentat simultan de la mai multe sisteme de curent trifazat.

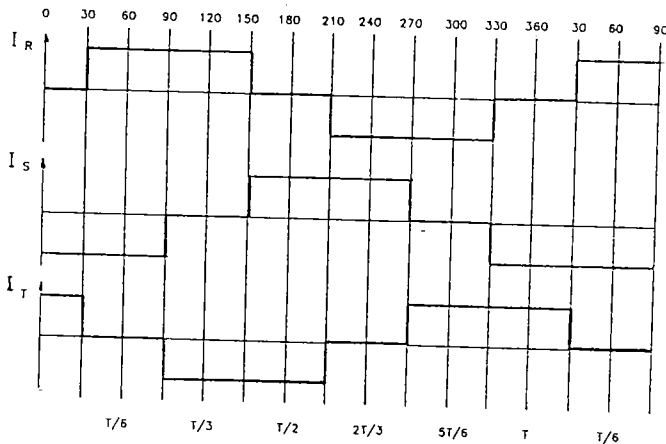


Fig.3.8

Fundamentală cu perioada T creează câmpul învârtitor principal. Armonicile superioare de ordin $v=6k \pm 1$ ($k=1,2,3,\dots$) creează câmpuri învârtitoare suplimentare. Relația a fost scrisă astfel pentru a scoate în evidență sensul de rotație a câmpului învârtitor creat de fiecare armonică.

Prezența simultană în motor a diferitor câmpuri învârtitoare da naștere, prin interacțiunea lor cu curenții rotorici, la două tipuri de cupluri.

- cupluri constante
- cupluri pulsatorii

Cupluri constante

Acestea apar ca interacțiune a armonicilor de curent cu câmpul învârtitor de același ordin v . Armonicile de curent creează câmpuri învârtitoare cu aceeași frecvență f_v , acestea se rotesc fie în aceeași direcție fie în direcție opusă câmpului fundamental, care are frecvența f_1 .

Dacă s este alunecarea între rotor și câmpul fundamentalei din rotor iar p numărul perechilor de poli ai mașinii, alunecarea dintre rotor și câmpul armonicelor s_v se poate exprima cu relația :

$$s_v = \frac{\frac{v f_1}{p} - \frac{f_1}{p}(1-s)}{\frac{v f_1}{p}} = 1 - \frac{1-s}{v} \quad (3.18)$$

Se poate constata ca s_v variaza foarte putin, pe timpul functionarii masinii ca motor intre regimul in gol si sarcina, putand fi foarte bine aproximat cu 1. Cuplurile provocate de armonicile $v = -5, -11, -17$ etc. se scad din cuplul fundamentalei, actionand la franare, in timp ce cuplurile de ordinul $v = 7, 13, 19$ etc. se aduna la cuplul fundamentalei, manifestandu-se ca cupluri motoare. Ca urmare aceste cupluri parazite se compenseaza reciproc iar efectul lor suma se poate neglija.

Cupluri pulsatorii

Cuplurile pulsatorii sunt datorate interactiunilor dintre campul corespunzator fundamentalei si armonicile de ordin mare ale curentilor rotorici. Ele oscileaza cu frecventa de 6, 12, 18, ... ori frecventa de alimentare a statorului iar amplitudinea lor poate atinge 20% din cuplul fundamentalei.

Cuplurile pulsatorii provocate de armonicile de ordinul 5 si 7 ale curentului au viteza unghiulara, comparativ cu viteza unghiulara a campului fundamentalei :

$$-5\omega_1 t - \omega_1 t = -6\omega_1 t \quad ; \quad 7\omega_1 t - \omega_1 t = 6\omega_1 t \quad (3.19)$$

Cum cuplul dat de fundamentala este egal cu produsul $\Phi_n I_n$, pentru cuplul pulsatoriu de ordinul v se poate scrie relatia

$$M_v = \Phi_n I_v \quad (3.20)$$

sau daca se doreste exprimarea acestei valori in functie de cuplul nominal

$$M_v \approx M_n \frac{I_v}{I_n} \approx M_n \frac{1}{|v|} \quad (3.21)$$

Amplitudinea cuplului pulsatoriu datorat armonicilor de curent -5 si 7 este, deci, formata din doua componente inegale, asociate cu fazele respective. Acest cuplu pulsatoriu de frecventa $6f_1$ este dependent de valoarea curentului si poate atinge 20% din cuplul nominal la curent nominal. Cuplurile pulsatorii provocate de armonicile de ordin mai inalt, $v = -11$ si $v = 13$ cu frecventa $12f_1$ si $v = -17$ si $v = 19$ cu frecventa $18f_1$ au amplitudini mai mici.

In timpul mersului aceste cupluri parazite nu sunt jenante pentru vehicul din cauza ca frecventele lor sunt mult mai mari decat frecventa proprie a transmisiei mecanice. Probleme serioase apar insa la demaraj si la viteze mici cand frecventa cuplului pulsatoriu este mica asa ca poate avea loc un fenomen de rezonanta intre cuplul pulsatoriu si transmisia mecanica a sistemului. Acest fenomen provoaca vibratii care dauneaza pieselor mecanice si micsoreaza confortul calatorilor.

Remedierea acestei situatii se poate face pe doua cai, prima electrica, prin folosirea unei modulatii in durata a curentului prin motor menita sa elimine armonicile de joasa frecventa din motor si a doua mecanica, legata de realizarea unei trnsmisii care sa preia cuplurile oscilante.

3.2.2. ELIMINAREA CUPLURILOR PULSATORII PRIN MODULAREA IN DURATA A UNDEI DE CURENT

Reducerea sau eliminarea cuplurilor pulsatorii de la arborele unui motor asincron trifazat alimentat de la invertorul de curent se poate obtine print-o imbunatatire a formei de unda a curentului de iesire din inverter prin segmentarea acestui curent in mai multe impulsuri modulate in durata. Pentru functionarea motorului asincron cu curenti simetrici sunt necesare cateva conditii, care se cer a fi respectate:

- suma duratelor impulsurilor de curent trebuie sa ramana neschimbata si anume, egala cu $2/3T$
- blocul de curent dreptunghiular de durata $1/3T$ trebuie impartit intr-un numar impar de impulsuri dreptunghiulare
- fiecare pauza in unda de curent va fi egala intodeauna cu durata unui impuls de curent in domeniul $0 \leq \omega_1 t \leq \pi/3$
- extragerea unei arii curent-timp este posibila numai in domeniul $\pi/6 \leq \omega t \leq \pi/3$, latimea minima a pulsului de curent din mijloc fiind $\pi/3$.

In (Fig.3.9) sunt prezentate cateva forme de unda ale curentului de iesire din inverter pentru diferite numere de impulsuri si anume pentru 6,10 si 14 impulsuri .

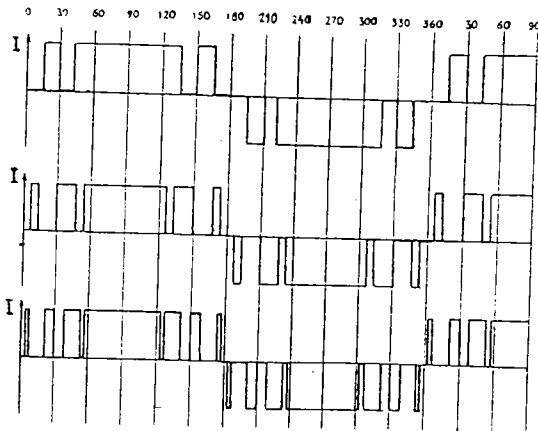


Fig.3.9

Din analiza armonica a acestor forme de unda rezulta urmatoarele relatii pentru amplitudinea armonicii de curent de ordinul n corespunzator fiecărei forme de unda in parte.

$$I_{n6} = \frac{8I_d}{n\pi} \cos n \frac{\pi}{6} \left[\cos n\alpha_1 - \frac{1}{2} \right] \quad (3.22)$$

$$I_{n10} = \frac{8I_d}{n\pi} \cos n \frac{\pi}{6} \left[\cos n(\alpha_1 + \alpha_2) - \cos n\alpha_2 + \frac{1}{2} \right] \quad (3.23)$$

$$I_{n14} = \frac{8I_d}{n\pi} \cos n \frac{\pi}{6} \left[\cos n \left(\sum_{i=1}^3 \alpha_i \right) - \cos n \left(\sum_{i=2}^3 \alpha_i \right) + \cos n\alpha_3 - \frac{1}{2} \right] \quad (3.24)$$

Se poate face si o generalizare in vederea deducerii valorii lui I_n pentru $2(2p+1)$ impulsuri

$$I_n = \frac{8I_d}{n\pi} \cos \frac{\pi}{6} \left[\cos n \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i \right) - \cos n \left(\sum_{i=2}^p \alpha_i \right) + \dots + (-1)^{p-1} \cos n\alpha_p + (-1)^p \frac{1}{2} \right] \quad (3.25)$$

La functionarea cu trei pulsuri se poate elimina o armonica de un anumit ordin, daca se va alege unghiul α_1 astfel incat ecuatia obtinuta din (3.22) sa fie indeplinita.

$$\alpha_1 = \frac{1}{n} \arccos \frac{1}{2} \quad (3.26)$$

Pentru functionarea cu cinci pulsuri, eliminarea unei armonici se face prin impunerea unei perechi de unghiuri α_1 si α_2 , care rezulta din rezolvarea ecuatiei

$$\alpha_1 = \frac{1}{n} \left\{ \arccos \left[\cos(n\alpha_2) - \frac{1}{2} \right] \right\} - \alpha_2 \quad (3.27)$$

obtinuta din (3.23)

Din ecuatiile (3.23) si (3.27) rezulta ca fiecărei perechi de valori a unghiurilor α_{1k} si α_{2k} , ii corespunde o valoare I_1 a fundamentalei la iesirea inverterului in cazul functionarii modulate cu pulsuri corespunzatoare unghiurilor α_1 si α_2 . Daca $I_{1\max}$ este valoarea fundamentalei curentului la iesirea inverterului, la functionarea modulate, se poate prezenta grafic dependenta marimii raportate a fundamentalei curentului $I_1/I_{1\max}$ in functie de perechea valorilor α_{1k} si α_{2k} (Fig.3.10).

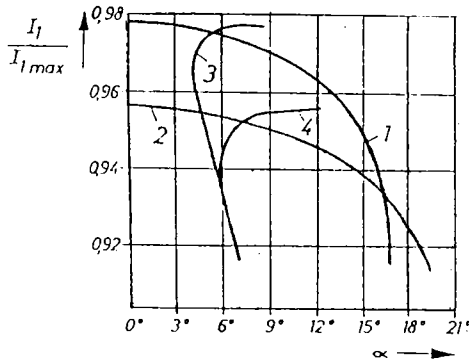


Fig.3.10

Pentru o anumita valoare a marimii raportate I_1 / I_{1max} se pot determina de pe grafic valorile unghiurilor α_1 si α_2 in vederea eliminarii armonicilor de ordinul 5 si 7 .

Solutii numerice pentru eliminarea altor perechi de armonici sunt prezentate in (Tabelul 3.1). La functionare cu cinci pulsuri se pot elimina si cate doua armonice prin alegerea corespunzatoare a unghiurilor α_1 si α_2 .

n_1	5	5	5	7	7	11
n_2	7	11	13	11	13	13
α_1	5.82°	6.18°	6.64°	4.13°	4.21°	2.73°
α_2	16.25°	10.86°	8.82°	10.63°	9.20°	8.24°

Tabelul 3.1

Alegerea unghiurilor corespunzatoare se face prin rezolvarea ecuatiei

$$\frac{1}{n_1} \left\{ \arccos \left[\cos(n_1 \alpha_2) - \frac{1}{2} \right] \right\} = \frac{1}{n_2} \left\{ \arccos \left[\cos(n_2 \alpha_2) - \frac{1}{2} \right] \right\} \quad (3.28)$$

care reprezinta conditia de eliminare simultana a armonicilor n_1 si n_2 , cu valori identice ale unghiurilor α_1 si α_2 . Din ecuatia (3.28) se obtine valoarea lui α_2 pentru eliminarea armonicilor n_1 si n_2 iar valoarea lui α_1 se poate obtine prin rezolvarea ecuatiei (3.27). Valoarea unghiurilor α_1 si α_2 se poate obtine si pe cale grafica din (Fig.3.10). Astfel pentru valoarea $I_1 / I_{1max} = 0.934$, la

intersectia curbelor (3) si (4) se obtine $\alpha_{1,5} = \alpha_{1,7} = 5.82^\circ$ iar la intersectia curbelor (2) si (1) se obtine $\alpha_{2,5} = \alpha_{2,7} = 16.25^\circ$.

In final se poate concluziona ca cuplurile pulsatorii jenante, cu frecventa de 6 ori frecventa fundamentalei sunt eliminate consecutiv inca de la functionarea cu trei pulsuri dar ca este mult mai potrivita modulatia cu cinci pulsuri la care se elimina simultan aceste cupluri pulsatorii.

Functionarea in regim modulat cu sapte pulsuri face posibila eliminarea simultana a trei armonici din curentul de iesire al inverterului.

4. CALCULUL MOTORULUI DE INDUCTIE PENTRU ACTIONARE DIRECTA

Proiectarea traditionala a motoarelor electrice se bazeaza pe experienta de proiectare asimilata, uzand de informatiile ce le ofera masinile deja construite in tara si pe plan mondial.

Mai dificila este insa proiectarea unui motor neconventional, cum este cel de actionare directa, pentru care nu sunt cunoscute variante constructive similare si deci nu exista date comparative. Exista posibilitatea sa se stabileasca mai multe variante de calcul pentru a se ajunge la conditiile impuse prin tema, avand in vedere, tehnologia de fabricatie, randamentul, masa materialelor active sau costul materialelor active si al energiei, fara a putea preciza ca solutia gasita este si cea mai buna. Metodele de calcul bazate pe compararea mai multor variante sunt lungi si anevoioase depinzand de experienta proiectantului. Reducerea timpului de calcul concomitent cu investigarea unui numar mare de variante, pentru obtinerea solutiei optime se poate realiza prin utilizarea tehnicii moderne de calcul.

Calculul motorului de inductie l-am facut cu programul IND scris in Fortran 5 si elaborat la Universitatea Tehnica din Timisoara. Programul permite optimizarea in raport cu o marime criteriala, in functie cu variabilele care se modifica si a fost rulat pe un calculator PC 486/33MHz.

Pentru a reduce timpul de calcul am admis doar cinci variabile care se modifica in procesul de optimizare, B01,B02,D,J1,J2, astfel timpul de calcul a fost in medie de 20min .

Graficile din lucrare au fost trasate cu programul Origin 2.0 for Windows al firmei MicroCal specializat in reprezentari grafice.

Proiectarea motorului de tractiune s-a facut tinand cont de caracteristicile tramvaiului Timis-2, fabricat de Electrometal Timisoara, pentru a putea fi instalat cu cat mai putine modificari pe un boghiu al acestuia.

4.1 CARACTERISTICILE TRAMVAIULUI TIMIS-2

Caracteristicile partilor componente ale tramvaiului Timis-2 sunt:

I. Boghiu

I.I. Generalitati

Boghiurile sunt destinate sa poarte caroserii de tramvaie pentru transportul in comun al calatorilor pe linii de tramvaie urban si suburban de ecartament normal 1435mm cu tensiune nominala de 750V sau 600V asigurand, pornirea, deplasarea si franarea acestora pe cale de rulare din sine.

Teza de doctorat

Rularea se face in interiorul oraselor in mediu cu praf, umezeala, noroi, zapada, apa sarata, la temperaturi cuprinse intre $+40^{\circ}\text{C}$ si -35°C .

I.II. Caracteristici dimensionale

Ecartament normal	1435mm
Ampartament	$1800\pm 2\text{mm}$
Diametrul rotilor	$686\pm 2\text{mm}$
Latimea ramei pe mijlocul lagarului	$1440\pm 2\text{mm}$
Latimea maxima a ramei	$2084\pm 2\text{mm}$
Inaltimea maxima de la partea superioara a boghiului la sina	
a) Boghiu motor in stare libera	$820\pm 5\text{mm}$
b) Boghiu purtator in stare libera	$820\pm 2\text{mm}$
c) Boghiu motor + purtator incarcat la maxim	$754\pm 5\text{mm}$
Distanta intre sina si patina	$5\div 10\text{mm}$
Garda la sol	
a) Boghiu liber	128mm
b) Boghiu maxim incarcat	99mm

II. Caracteristicile principale

Formatia tramvai	1 vagon motor + 1 vagon remorca
Lungimea totala	30m
Masa tramvai gol	35t
Capacitatea maxima calatori	350
Viteza maxima	52km/h
Acceleratia maxima a tramvaiului maxim incarcat	0.70m/s^2
Acceleratia maxima a tramvaiului gol	0.85m/s^2
Deceleratia maxima a tramvaiului maxim incarcat	2.3m/s^2
Deceleratia maxima a tramvaiului gol	3.2m/s^2

III. Performantele motorului TN 71 fabricat de IME-Bucuresti

Tensiune noinala	750V
Putere uniorara	
a) la 750V	140
b) la 600V	112W
Curentul uniorar (Ih)	205A
Turatie la gradul de excitatie nominal	1330rot/min
Randament	0.916
Tip excitatie	serie
Grad de excitatie minim	0.5
Curent maxim	350A
Turatie maxima	3000rot/min

4.2 CALCULUL OPTIMIZAT CU PROGRAMUL IND

Scopul optimizării este de a alege din multimea soluțiilor posibile pe cea care este cea mai bună în raport cu un criteriu definit. Cazul ideal ar fi să poată fi satisfăcute mai multe criterii simultan, de exemplu, realizarea unei mașini electrice cu un randament maxim și un consum minim de materiale. Asemenea cerințe plurale pot fi adesea incompatibile ceea ce duce la necesitatea unui compromis, alegând un singur criteriu și anume pe cel mai important.

Mașina electrică trebuie să satisfacă anumite criterii, impuse în primul rând de exploatare:

Criteriul funcțional exprimă necesitatea realizării mașinii electrice cu anumite caracteristici impuse de beneficiar. Poate fi definit prin intermediul parametrilor funcționali ai mașinii, rezistențe, reactanțe, care la rândul lor sunt determinați de geometria, construcția și sollicitările electromagnetice ale mașinii.

Criteriul de siguranță exprimă necesitatea asigurării unei comportări sigure a mașinii în exploatare în condiții normale și de suprasarcini de scurtă durată ceea ce impune satisfacerea unor condiții restrictive. Condițiile restrictive pot fi grupate în condiții de natură electrică (asigurarea mașinii față de eventualele străpungeri ale izolației) și condiții de natură termică (respectarea temperaturilor maxime admisibile pentru materialele constructive).

Criteriul economic exprimă tendința realizării mașinii la preț de cost minim, având în vedere, atât cheltuielile constructive, cât și cele de exploatare.

De cele mai multe ori soluția optimă are în vedere criteriul economic, care evidențiază cheltuielile de producție, prin acestea înțelegând costul materialelor active ale mașinii.

Din practică este cunoscut însă, că economicitatea mașinii este influențată în principal de cheltuielile de exploatare, deci de costul pierderilor de energie pe durata de viață a mașinii.

În lucrare am ales ca marime criterială costul materialelor active și al energiei iar durata de viață am stabilit-o la cinci ani.

În prima etapă am stabilit dimensiunile motorului, diametrul exterior ($D_{ex} = 400\text{mm}$), diametrul interior ($D_{in} = 130\text{mm}$) și lungimea ($L = 750\text{mm}$), în caz că se utilizează tot spațiul disponibil dintre roți păstrându-se numai cutiile de unsoare frânarea urmând să se facă pe roata sau ($L = 440\text{mm}$) în caz că se păstrează discul de frânare dintre roți. S-a mai ținut cont de diametrul osiei și de garda la sol. Pentru proiectarea unui motor pentru acționare directă trebuie să se țină cont și de particularitățile acestuia

- viteza de circulație a tramvaielor în circuitul urban este mică (până la 60 km/h)

- reglarea vitezei se face prin modificarea frecvenței

- Aceste particularități impun motorului frecvențe de lucru sub frecvența nominală. Pentru ca regimul de lucru să fie cât mai apropiat de cel nominal, pentru care motorul se proiectează, este bine ca motorul să aibă cât mai mulți poli. Această necesitate este însă limitată de diametrul exterior al motorului care este la rândul său limitat de diametrul roții.

Printr-un calcul simplu se poate determina in ce limite trebuie modificata frecventa pentru a obtine vitezele cu care circula tramvaiele in mediul urban

$$v = r\Omega = r \frac{2\pi f}{p} = \frac{D\pi f}{p} \quad (4.1)$$

Astfel pentru

- un motor cu opt poli ($p=4$) modificarea frecventei in limitele (0 - 35)Hz conduce la viteze de deplasare (0 - 67)km/h

- un motor cu sase poli ($p=3$) modificarea frecventei in limitele (0 - 25)Hz conduce la viteze de deplasare (0 - 65)km/h

Motoare cu numar mare de poli, la dimensiunile impuse, cu puteri necesare pentru propulsarea tramvaielor, pot fi realizate cu una sau doua crestaturi pe pol si faza ($q=1, q=2$). Desi literatura de specialitate nu recomanda utilizarea acestor valori, masinile cu $q=2$, pot oferi, in cazul de fata, rezultate acceptabile in privinta randamentului si a factorului de putere. Motorul cu opt poli este motorul cu cel mai mare numar de poli care se mai poate realiza cu $q=2$ pasul polar fiind $\tau \sim 100$ mm. Motoare cu numar mai mare de poli se pot realiza cu $q=1$ care este cel mai nefavorabil caz.

Avand in vedere cele spuse mai sus m-am limitat la motoare cu rotor in colivie cu sase si opt poli.

4.3 VARIANTE POSIBILE ALE MOTORULUI DE INDUCTIE PENTRU ACTIONARE DIRECTA

Va fi abordat intai cazul in care se foloseste tot spatiul disponibil dintre roti pastrandu-se numai cutiile de unsoare pe care se sprijina boghiul prin intermediul unor suspensii din cauciuc. Lungimea activa a rotorului in acest caz este de 750mm.

Prima varianta studiata va fi un motor cu trei perechi de poli ($p=3$) cu tensiunea nominala de 283V. Infasurarea statorica este conectata in stea, cu o cale de infasurare in paralel ($A1=1$) si 36 de spire pe faza ($N1=36$). Numarul de crestaturi statorice este $NC1=54$ ($Q1=3$) iar al celor rotorice s-a ales din [10, Tab.10.2) si este $NC2=64$. Crestaturile statorice sunt dreptunghiulare. Rotorul in colivie este executat din aluminiu turnat in crestaturi dreptunghiulare. Prin calcul conform [12] am stabilit datele de intrare pentru programul de optimizare IND.

Pentru a stabili care este puterea cea mai potrivita la dimensiunile impuse ale motorului am rulat programul IND pentru puteri de la 40kW pana la 120kW cu pasul de 10kW. Datele de intrare pentru $P_a = 40$ kW sunt:

Date de intrare (Semnificatia marimilor este data in A.1.)

Marimi reale:

AA	= .200000D-03	AIZCB	= .000000D+00	AS	= .000000D+00
ASR	= .000000D+00	A1	= .100000D+01	A2	= .100000D+01
BDEMA	= .800000D+00	BDEMI	= .400000D+00	BPO	= .100000D+01
BRDII	= .000000D+00	BRDIS	= .000000D+00	BRDSI	= .000000D+00
BRDSS	= .000000D+00	BRD00	= .000000D+00	BRD01	= .000000D+00
BRD02	= .000000D-00	BRD03	= .000000D+00	BRD04	= .000000D+00
BRD05	= .000000D+00	BRD07	= .000000D+00	BRD08	= .000000D+00
BRD09	= .000000D+00	BRD10	= .000000D+00	BRD11	= .000000D+00
BRD12	= .000000D+00	BRD6I	= .000000D+00	BRD6S	= .000000D+00
BR4	= .200000D-02	BS	= .000000D+00	BSR	= .000000D+00
BSV	= .000000D+00	BS4	= .550000D-02	B0	= .100000D+01
B01	= .100000D-01	B02	= .540000D-02	B1	= .100000D-01
B2	= .540000D-02	CFI	= .800000D-00	CX2I	= .900000D+00
C01N	= .100000D+00	C02N	= .100000D+00	C1DN	= .250000D-00
C1NN	= .100000D+00	C1SN	= .100000D-00	C2DN	= .100000D-00
C2NN	= .100000D+00	C2SN	= .100000D-00	D	= .280000D-00
DB01	= .100000D-03	DB02	= .100000D-03	DB1	= .100000D-03
DB2	= .100000D-03	DE	= .100000D-02	DELZC1	= .107000D-02
DELZC2	= .000000D+00	DELBL	= .000000D+00	DELBP	= .000000D+00
DELD	= .100000D-02	DELFE	= .500000D-03	DELLAM	= .800000D-01
DELTR	= .000000D+00	DELTS	= .135000D-02	DEX	= .410000D+00
DIN	= .130000D+00	DIP	= .000000D+00	DIVLAM	= .200000D+00
DIZ1	= .350000D-01	DIZ2	= .000000D-00	DJIJL	= .100000D+06
DJ1	= .100000D+06	DJ2	= .100000D-06	DKBJ1	= .100000D-00
DKBJ2	= .100000D+00	DRIL	= .200000D-02	DRINAB	= .000000D-00
DS1	= .100000D-03	DS2	= .100000D-02	DS3	= .100000D-00
DURATA	= .432000D+05	EPS1	= .200000D+01	EPS2	= .000000D-00
F	= .500000D+02	FUR	= .960000D-00	FUS	= .790000D-00
GACUB	= .270000D+04	GACUBP	= .000000D+00	GACUIL	= .270000D+04
GACUP	= .000000D+00	GAMCU1	= .889000D+04	GAMFE	= .770000D+04
HRDII	= .000000D+00	HRDIS	= .000000D+00	HRDSI	= .000000D+00
HRDSS	= .000000D+00	HRD01	= .000000D+00	HRD02	= .000000D+00
HRD03	= .000000D+00	HRD04	= .000000D+00	HRD05	= .000000D+00
HRD06	= .000000D+00	HRD07	= .000000D+00	HRD08	= .000000D+00
HRD09	= .000000D+00	HRD10	= .000000D+00	HRD11	= .000000D+00

Teza de doctorat

HRD12	= .000000D+00	HR2	= .000000D+00	HR3	= .000000D+00
HR4	= .200000D-02	HS2	= .207500D-02	HS3	= .300000D-02
HS4	= .200000D-02	H1	= .360000D-01	H2	= .400000D-01
IC	= .100000D+01	J1	= .150000D+07	J1	= .300000D+07
J2	= .200000D+07	KBJ10	= .180000D+01	KBJ20	= .180000D+01
KCBR	= .100000D+01	KCBS	= .110000D+01	KDIM	= .300000D+00
KE	= .950000D+00	K0	= .115650D+04	KPJ	= .180000D+01
KPZ	= .150000D-01	KQ1	= .000000D+00	KQ2	= .100000D-01
KS	= .340000D+00	KW	= .100000D+01	K1	= .450000D+00
K1R	= .000000D+00	K1RR	= .000000D+00	K1S	= .890000D+00
K2	= .130000D+00	K2R	= .000000D+00	K2RR	= .000000D+00
K2S	= .860000D+00	L	= .750000D+00	LAMDA0	= .400000D+01
MN	= .391000D+03	M1	= .300000D+01	M2	= .640000D+02
NCUBL	= .600000D+04	NCUBP	= .000000D+00	NCUIL	= .600000D+04
NCUIP	= .000000D+00	NCU1	= .120000D+05	NFE	= .300000D+04
NKWH	= .460000D-01	N1	= .400000D+05	P0P	= .200000D+03
PP0	= .230000D-01	PSUP	= .200000D+03	P0	= .230000D+01
QBL	= .180000D-03	QBP	= .000000D+00	QB1	= .500000D-04
QIL	= .600000D-03	QIP	= .000000D+00	Q1	= .300000D+01
Q2	= .355600D+01	RAN	= .940000D+00	RINAB0	= .200000D-01
ROB01	= .373000D-07	ROB02	= .000000D+00	ROB03	= .000000D+00
ROB04	= .000000D+00	ROB05	= .373000D-07	ROB12	= .373000D-07
ROIL	= .373000D-07	ROIP	= .000000D+00	RO1	= .216000D-07
SB2	= .100000D+01	SIGMW	= .640000D-03	SIGM01	= .111000D-01
SIGM02	= .680000D-02	SN0	= .200000D-01	U1	= .283000D-03
V01	= .000000D-00	V02	= .000000D+00	ZALMLA	= .600000D-05

Marimi intregi:

COD	= 3	I	= 2	IB01F	= 2
IB01I	= 1	IB02F	= 2	IB02I	= 1
IB1F	= 2	IB1I	= 1	IB2F	= 2
IB2I	= 1	IC1	= 0	IC2	= 0
IDEXF	= 0	IDEXI	= 0	IDF	= 2
IDI	= 1	IDINF	= 0	IDINI	= 0
IIB01	= 1	IIB02	= 1	IIB1	= 0
IIB2	= 0	IID	= 2	IDEX	= 0
IIDIN	= 0	IIH1	= 1	IIH2	= 1
IJI	= 0	IJI	= 1	IJJ2	= 1
IIL	= 0	INEL	= 0	IISB1	= 0

Teza de doctorat

IJF	= 2	IJI	= 1	IJ1F	= 2
IJI	= 1	IJ2F	= 2	IJ2I	= 1
ILAF	= 0	ILAI	= 0	IMP	= 1
INELF	= 0	INELI	= 0	IORA	= 1
IR	= 1	ISB1F	= 2	ISB1I	= 1
KDR	= 0	KDS	= 0	L1	= 300
L2	= 310	MR	= 500	NSV	= 0
STR	= 2	ZIPR	= 10	ZIS	= 1

Din rezultatele obtinute am ales cate un set de marimi pentru fiecare valoare a puterii, care le-am reprezentat in (Tabelul 4.1), in scopul alegerii celei mai potrivite valori pentru motorul de inductie pentru actionare directa.

P[kW]	D[mm]	M_t [Nm]	k_s	$\cos\varphi$	η	W[Lei]
40	279	2226.8	0.06	0.753	0.938	7619400
50	279	2248.8	0.087	0.799	0.941	8658000
60	277	2259.5	0.113	0.826	0.943	9774300
70	280	2237.8	0.112	0.848	0.94	10981000
80	281	2149.6	0.105	0.858	0.943	12285000
90	280	2093.3	0.106	0.861	0.942	13717000
100	281	2124.3	0.129	0.863	0.941	15134000
110	273	2192.7	0.22	0.856	0.941	16557000
120	274	2189.4	0.242	0.853	0.94	18145000

Tabelul 4.1

Datele din (Tabelul 4.1) se pot reprezenta si grafic:

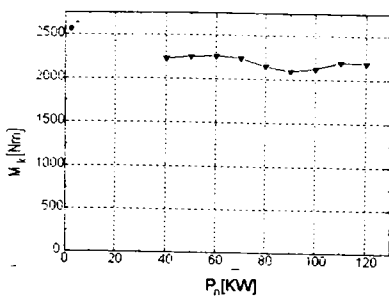


Fig.4.1. Dependenta $M_t=f(P_n)$

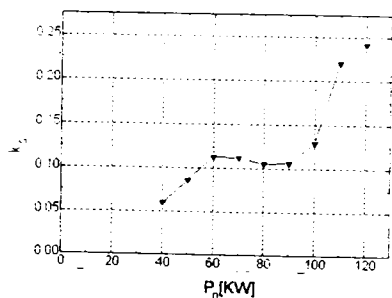
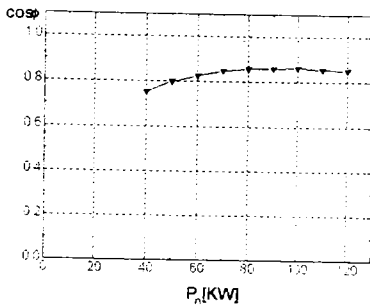
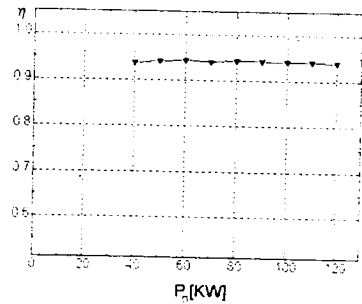


Fig.4.2. Dependenta $k_s=f(P_n)$

Fig.4.3. Dependenta $\cos\varphi=f(P_n)$ Fig.4.4. Dependenta $\eta=f(P_n)$

Dupa cum se poate vedea din (Tabelul 4.1) si din graficele de mai sus cuplul critic, care este important la pornirea motorului alimentat prin convertoare de frecventa, nu variaza mult cu variatia puterii. La fel se poate spune si despre randament. Variatii mai insemnate cu puterea prezinta factorul de saturatie care are valori mai reduse la puteri mai mici si factorul de putere care este mai mic la puteri mai mici. Se poate spune ca rezultatele cele mai bune se obtin pentru puterile de 60kW, 70kW si 80kW. Factorul de putere este in jur de 0.84, randamentul in jur de 0.94, factorul de saturatie in jur de 1.1 iar cuplul critic este in jur de 2200Nm.

In continuare voi prezenta rezultatele complete si graficele pentru diferite variante ale motorului de 70kW.

MIAD1

Motorul de inductie pentru actionare directa cu trei perechi de poli ($p=3$), de $P_n=70\text{kW}$, cu rotor in colivie din aluminiu turnat si crestaturi dreptunghiulare in stator si rotor. Numarul crestaturilor statorice este $NC1=54$ ($Q1=3$) iar al celor rotorice $NC2=64$. Infasurarea statorica este in doua straturi cu pas scurtat $\epsilon_1=2$ si o cale de infasurare in paralel $A1=1$. Numarul spirelor pe faza in stator este de $N1=36$.

Rezultate finale (Semnificatia marimilor este data in A.2.)

COD 3	IMP 1	IR 4	MR 500	MS 1
NSV 0	STR 2	STR2 1	ALFAI .66269D-00	ALFAR .15090D+01
A1 .10000D+01	A2 .10000D+01	BB2 .00000D+00	BDE .51228D+00	BDEM .33948D+00

Teza de doctorat

BEZ1H .10479D+01	BEZ10 .80528D+01	BEZ2H .17568D+01	BEZ20 .64176D+00	BJ1 .85884D+00
BJ2 .59901D+00	BP1 .22548D-01	BP2 .18544D+00	BR4 .20000D-02	BSV .00000D+00
BS4 .55000D-02	BZ1H .86304D-02	BZ10 .10906D-01	BZ2H .41746D-02	BZ20 .11548D-01
B01 .11400D-01	B02 .65000D-02	B1 .11400D-01	B2 .65000D-02	CC2 .41439D+00
CF .35295D+00	CFI .84757D+00	COST .25932D+07	CSI2 .00000D+00	CT .70421D+00
D .28000D+00	DE .10000D-02	DEX .41000D+00	DIL .23936D+00	DIN .13000D+00
F1 .10548D+04	F2 .89000D+03	G .58387D+03	GCU .11038D+03	GCUBL .22862D+02
GCUBP .00000D+00	GCUIL .24364D+01	GCUIP .00000D+00	GCU1 .85081D+02	GFE .47349D+03
GFE1 .27922D+03	GFE2 .19426D+03	GJ1 .20503D+03	GJ2 .13094D+03	GZ1 .74191D+02
GZ2 .63321D+02	HHZ1 .94654D+03	HHZ2 .86508D+03	HJ1 .31422D-01	HJ2 .43730D-01
HR2 .00000D+00	HR3 .00000D+00	HR4 .20000D-02	HS2 .20750D-02	HS3 .30000D-02
HS4 .20000D-02	H1 .33578D-01	H2 .30270D-01	IBL .27372D+03	IBP .00000D+00
IIL .93275D+03	IIP .00000D+00	IPD .66306D+03	IO .40518D+02	IOR .13104D+01
IOX .40497D+02	I1 .10280D+03	I2 .89924D+02	JBL .15517D+07	JBP .00000D+00
JIL .15546D+07	JIP .00000D+00	J1 .23342D+07	KAPAF .11009D+01	KDE .12676D+01
KDE1 .12149D+01	KDE2 .10434D+01	KEI .19767D+03	KEN .10000D+01	KES .10000D+01
KE1 .10000D+01	KI2 .30440D+01	KR .10002D+01	KRRP .00000D+00	KRY .21130D+01

Teza de doctorat

KS .11218D+00	KUEMTR .00000D+00	KUEMTS .79000D+00	KU2 .64938D+02	KX .99996D+00
KXXP .00000D+00	KXY .81941D+00	K1 .45000D+00	K1RR .00000D+00	K2 .13000D+00
K2RR .00000D+00	L .75000D+00	MKDG .26250D+04	MKDM .22359D+04	MN .68500D+03
MP .76937D+03	NC1 .54000D+02	NC2 .64000D+02	N1 .36000D+02	N2 .50000D+00
PCU .19233D+04	PCU1 .11263D+04	PCU2 .79699D+03	PFE .10556D+04	PFEJ1 .62611D+03
PFEZ1 .42300D+03	PMEC .49000D+03	PN .70072D+05	PO1 .10362D+02	PO2 .94442D+02
PP1 .63790D+01	PP2 .26217D+03	PSUP .35000D+03	QB .17640D-03	QBP .00000D+00
QB1 .44043D-04	QIL .60000D-03	QIP .00000D+00	R .32853D-01	RAN .94319D+00
RM .21324D+00	RP .65899D-01	R1 .35523D-01	R1BN .26483D-01	R1IN .90395D-02
R2BNL .29494D-01	R2BNP .00000D+00	R2INL .33531D-02	R2INP .00000D+00	SK .77500D-01
SN .11110D-01	TAU .14661D+00	TAU1 .18832D+00	TC1 .16290D-01	TC2 .13646D-01
TETA .35514D+04	UE1 .26686D+03	U1 .28300D+03	VDE .31004D+04	VJ1 .79081D+02
VJ2 .24135D+02	VZ1 .19069D+03	VZ2 .15711D+03	W .10981D+08	ZALIN .25244D+05
X1 .19564D+00	X2 .20481D+00	XM .65829D+01	XP .16153D+00	

Ruland din nou programul cu marimile obtinute din procesul de optimizare fixate si optiunea ZIPR=13 obtinem caracteristicile masinii din care am reprezentat grafic $M=f(s)$ (Fig.4.5), $I_1=f(s)$ (Fig.4.6), $\cos\phi=f(P_2)$ si $\eta=f(P_2)$ (Fig.4.7).

Graficele au fost trasate cu programul Origin 2.0 for Windows

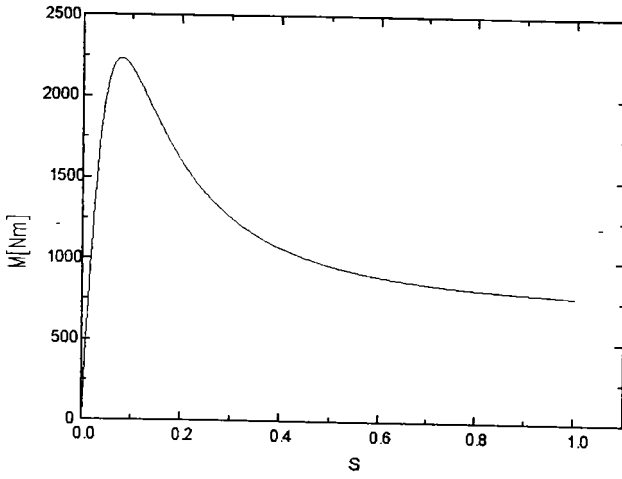


Fig.4.5

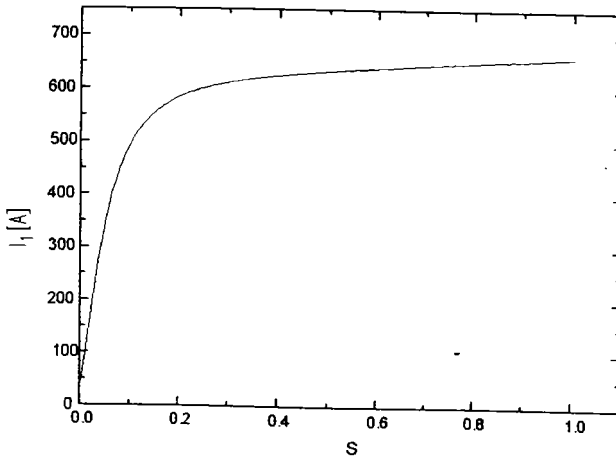


Fig.4.6

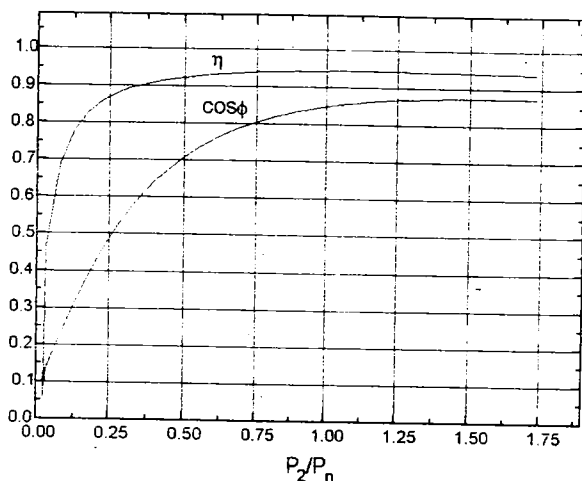


Fig.4.7

MIAD2

Motorul de inductie pentru actionare directa cu trei perechi de poli ($p=3$), de $P_n=70\text{kW}$, cu rotor in colivie cu bare din cupru si crestaturile dreptunghiulare in stator si rotor.

Numarul crestaturilor statorice este si aici $NC1=54$ iar al celor rotorice $NC2=64$. Infusurarea statorica este in doua straturi cu pas scurtat $\epsilon_1=2$ si o cale de infusurare in paralel $A1=1$. Numarul spirelor pe faza in stator este $N1=36$.

Avand in vedere ca rotorul este executat cu bare, distanta de la metalul laturii de bobina pana la peretele crestaturii rotorice este $DELZC2=0.0002$ iar distanta de la miezul feromagnetic pana la inelul de scurtcircuitare $DELBL=0.03$. In rest datele de intrare pentru aceasta varianta sunt aceleasi ca si pentru varianta cu rotor din aluminiu turnat.

Rezultate finale (Semnificatia marimilor este data in A.2.)

COD 3	IMP 1	IR 4	MR 500	MS 1
NSV 0	STR 2	STR2 1	ALFAI .66494D+00	ALFAR .15039D+01
A1 .10000D+01	A2 .10000D+01	BB2 .00000D+00	BDE .52341D+00	BDEM .34804D+00

Teza de doctorat

BEZ1H .10468D+01	BEZ10 .83332D+00	BEZ2H .17544D+01	BEZ20 .65891D+00	BJ1 .79116D+00
BJ2 .58653D+00	BP1 .23264D-01	BP2 .18997D+00	BR4 .20000D-02	BSV .00000D+00
BS4 .55000D-02	BZ1H .86123D-02	BZ10 .10499D-01	BZ2H .41641D-02	BZ20 .11205D-01
B01 .11100D-01	B02 .66000D-02	B1 .11100D-01	B2 .66000D-02	CC2 .28276D+00
CF .38785D+00	CFI .84154D+00	COST .25937D+07	-CSI2 .00000D+00	CT .68009D+00
D .27300D+00	DE .10000D-02	DEX .41000D+00	DIL .23236D+00	DIN .13000D+00
F1 .10600D+04	F2 .89437D+03	G .58970D+03	GCU .10522D+03	GCUBL .18043D+02
GCUBP .00000D+00	GCUIL .23651D+01	GCUIP .00000D+00	GCU1 .84815D+02	GFE .48447D+03
GFE1 .29592D+03	GFE2 .18855D+03	GJ1 .22102D+03	GJ2 .13437D+03	GZ1 .74900D+02
GZ2 .54177D+02	HHZ1 .10192D+04	HHZ2 .11632D+04	HJ1 .34116D-01	HJ2 .44642D-01
HR2 .00000D+00	HR3 .20000D-02	HR4 .20000D-02	HS2 .20750D-02	HS3 .30000D-02
HS4 .20000D-02	H1 .34384D-01	H2 .25858D-01	IBL .27401D+03	IBP .00000D+00
III .93371D+03	IIP .00000D+00	IPD .68441D+03	IO .41911D+02	IOR .12567D+01
IOX .41892D+02	I1 .10348D+03	I2 .90017D+02	JBL .21256D+07	JBP .00000D+00
JIL .15562D+07	JIP .00000D+00	J1 .23495D+07	KAPAF .11001D+01	KDE .12760D+01
KDE1 .12216D+01	KDE2 .10445D+01	KEI .19767D+03	KEN .10000D+01	KES .10000D+01
KE1 .10000D+01	KI2 .30440D+01	KR .10002D+01	KRRP .00000D+00	KRY .32398D+01

Teza de doctorat

KS .12253D+00	KUEMTR .00000D+00	KUEMTS .79000D+00	KU2 .64938D+02	KX .99997D+00
KXXP .00000D+00	KXY .75245D+00	K1 .45000D+00	K1RR .00000D+00	K2 .13000D+00
K2RR .00000D+00	L .75000D+00	MKDG .26308D+04	MKDM .22432D+04	MN .68500D+03
MP .65984D+03	NC1 .54000D+02	NC2 .64000D+02	N1 .36000D+02	N2 .50000D+00
PCU .15861D+04	PCU1 .11376D+04	PCU2 .44846D+03	PFE .10109D+04	PFEJ1 .57276D+03
PFEZ1 .43216D+03	PMEC .49000D+03	PN .70447D+05	PO1 .99868D+01	PO2 .92645D+02
PP1 .69231D+01	PP2 .23773D+03	PSUP .35000D+03	QB .12891D-03	QBP .00000D+00
QB1 .44043D-04	QIL .60000D-03	QIP .00000D+00	R .18448D-01	RAN .94869D+00
RM .19087D+00	RP .53069D-01	R1 .35411D-01	R1BN .26483D-01	R1IN .89283D-02
R2BNL .15334D-01	R2BNP .00000D+00	R2INL .31116D-02	R2INP .00000D+00	SK .43500D-01
SN .62520D-02	TAU .14294D+00	TAU1 .18985D+00	TC1 .15882D-01	TC2 .13303D-01
TETA .36738D+04	UE1 .26656D+03	U1 .28300D+03	VDE .31888D+04	VJ1 .70505D+02
VJ2 .23706D+02	VZ1 .21026D+03	VZ2 .18047D+03	W .10164D+08	ZALIN .26062D+05
X1 .19666D+00	X2 .20378D+00	XM .63573D+01	XP .15193D+00	

Pentru a putea face comparatie cu varianta precedenta voi reprezenta grafic aceleasi marimi $M=f(s)$ (Fig.4.8), $I_1=f(s)$ (Fig.4.9), $\cos\varphi=f(P_2)$ si $\eta=f(P_2)$ (Fig.4.10)

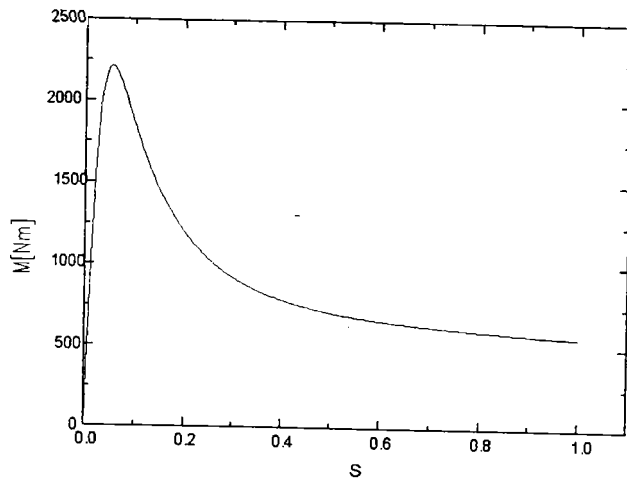


Fig.4.8

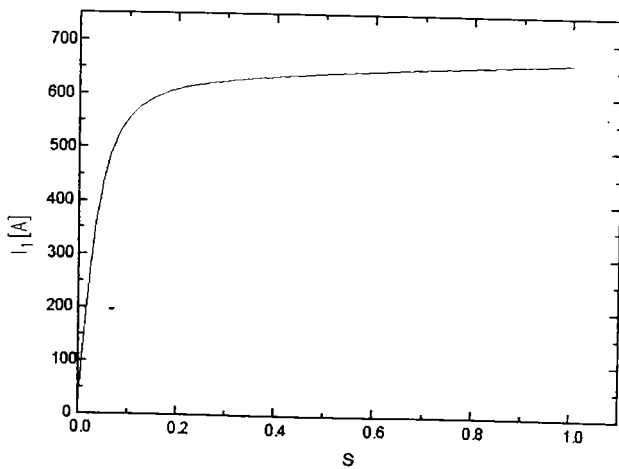


Fig.4.9

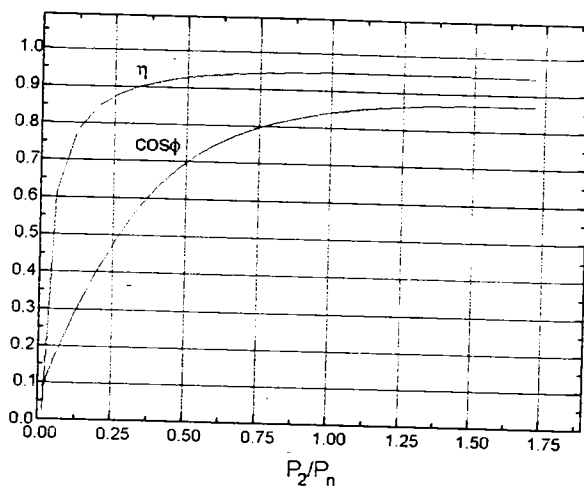


Fig.4.10

MIAD3

Motorul de actionare directa cu trei perechi de poli ($p=3$), de $P_n=70\text{kW}$, cu rotor in colivie din aluminiu turnat. Statorul are $NC1=54$ ($Q1=3$) iar rotorul $NC2=64$. Infasurarea statorica este in doua straturi, cu pas scurtat $\varepsilon_1=2$, cu doua cai de infasurare in paralel $A1=2$ si 27 spire pe faza ($N1=27$). In rest datele de intrare sunt aceeasi ca si la variantele precedente.

Rezultate finale (Semnificatia marimilor este data in A.2)

COD 3	IMP 1	IR 1	MR 500	MS 1
NSV 0	STR 2	STR2 1	ALFAI .66766D+00	ALFAR .14978D+01
A1 .20000D+01	A2 .10000D+01	BB2 .00000D+00	BDE .68951D+00	BDEM .46036D+00
BEZ1H .12094D+01	BEZ10 .10877D+01	BEZ2H .17759D+01	BEZ20 .86496D+00	BJ1 .10397D+01
BJ2 .74406D+00	BP1 .25014D-01	BP2 .18882D+00	BR4 .20000D-02	BSV .00000D+00

Teza de doctorat

BS4 .55000D-02	BZ1H .99512D-02	BZ10 .10790D-01	BZ2H .55348D-02	BZ20 .11450D-01
B01 .97000D-02	B02 .55000D-02	B1 .97000D-02	B2 .55000D-02	CC2 .34310D+00
CF .46723D+00	CFI .73092D+00	COST .81163D+06	CSI2 .00000D+00	CT .71601D+00
D .27800D+00	DE .10000D-02	DEX .41000D+00	DIL .24200D+00	DIN .13000D+00
F1 .10575D+04	F2 .89231D+03	G .59496D+03	GCU .80516D+02	.GCUBL .16135D+02
GCUBP .00000D+00	GCUIL .18474D+01	GCUIP .00000D+00	GCU1 .62533D+02	GFE .51445D+03
GFE1 .30601D+03	GFE2 .20843D+03	GJ1 .22504D+03	GJ2 .14493D+03	GZ1 .80968D+02
GZ2 .63504D-02	HHZ1 .15358D+04	HHZ2 .18062D+04	HJ1 .34800D-01	HJ2 .47400D-01
HR2 .00000D+00	HR3 .00000D+00	HR4 .20000D-02	HS2 .20750D-02	HS3 .30000D-02
HS4 .20000D-02	H1 .31200D-01	H2 .25600D-01	IBL .20312D+03	IBP .00000D+00
IIL .69215D+03	IIP .00000D+00	IPD .11545D+04	I0 .74372D+02	IOR .19417D+01
IOX .74347D+02	I1 .12008D+03	I2 .88971D+02	JBL .16315D+07	JBP .00000D+00
JIL .15381D+07	JIP .00000D+00	J1 .27797D+07	KAPAF .10992D+01	KDE .12699D+01
KDE1 .12167D+01	KDE2 .10437D+01	KEI .11119D+03	KEN .10000D+01	KES .10000D+01
KE1 .10000D+01	KI2 .22830D+01	KR .10001D+01	KRRP .00000D+00	KRY .17106D+01
KS .13513D+00	KUEMTR .00000D+00	KUEMTS .78981D+00	KU2 .48703D+02	KX .99999D+00
KXXP .00000D+00	KXY .87983D+00	K1 .45000D+00	K1RR .00000D+00	K2 .13000D+00

Teza de doctorat

K2RR .00000D+00	L .75000D+00	MKDG .48309D+04	MKDM .39021D+04	MN .68500D+03
MP .15085D+04	NC1 .54000D+02	NC2 .64000D+02	N1 .27000D+02	N2 .50000D+00
PCU .17871D+04	PCU1 .11740D+04	PCU2 .61318D+03	PFE .15763D+04	PFEJ1 .10072D+04
PFEZ1 .56004D+03	PMEC .49000D+03	PN .70160D+05	PO1 .18387D+02	PO2 .16841D+03
PP1 .86121D+01	PP2 .27401D+03	PSUP .35000D+03	QB .12450D-03	QBP .00000D+00
QB1 .21600D-04	QIL .45000D-03	QIP .00000D+00	R .25821D-01	RAN .93741D+00
RM .94514D-01	RP .42467D-01	R1 .27138D-01	R1BN .20250D-01	R1IN .68877D-02
R2BNL .23276D-01	R2BNP .00000D+00	R2INL .25425D-02	R2INP .00000D+00	SK .10850D+00
SN .85479D-02	TAU .14556D+00	TAU1 .19988D+00	TC1 .16173D-01	TC2 .13548D-01
TETA .48900D+04	UE1 .26905D+03	U1 .28300D+03	VDE .41808D+04	VJ1 .11296D+03
VJ2 .31288D+02	VZ1 .28751D+03	VZ2 .27743D+03	W .89070D+07	ZALIN .22274D+05
X1 .11223D+00	X2 .11107D+00	XM .36163D+01	XP .91625D-01	

Cu ajutorul rezultatelor finale obtinute din procesul de optimizare si urmand aceeasi procedura ca si in cazul variantelor precedente se pot obtine graficele masinii $M=f(s)$ (Fig.4.11), $I_1=f(s)$ (Fig.4.12), $\cos\varphi=f(P_2)$ si $\eta=f(P_2)$ (Fig.4.13).

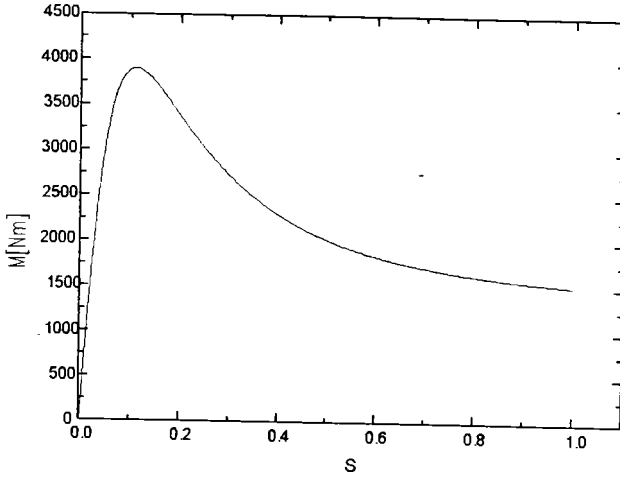


Fig.4.11.

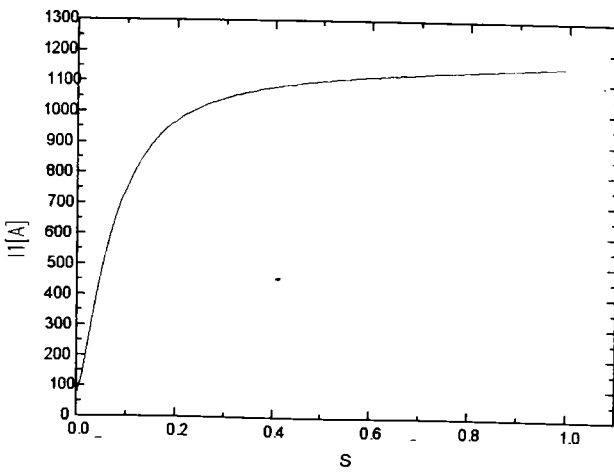


Fig.4.12

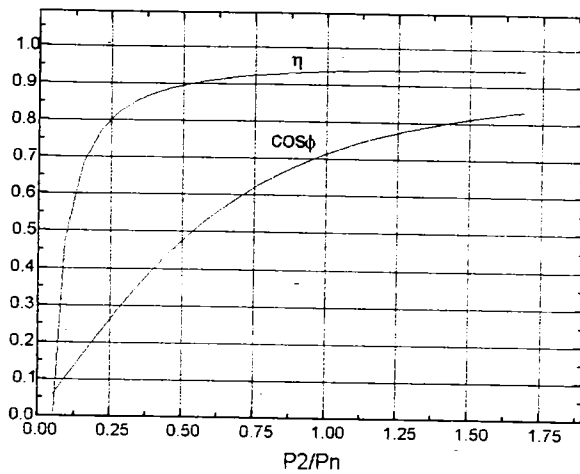


Fig.4.13.

MIAD4

Motorul de inducție pentru acționare directă cu trei perechi de poli ($2p=6$), de $P_n=70\text{KkW}$, cu rotor în colivie cu bare din alama și inel de scurtcircuitare din cupru. Numărul creștaturilor statorice este $NC1=54$ ($Q1=3$) iar al celor rotorice $NC2=64$.

Înfășurarea statorică este în două straturi, cu pas scurtat $\varepsilon_1=2$ și două cai de înfășurare în paralel $A1=2$. Numărul spirelor pe fază în stator este $N1=27$.

Distanța de la peretele creștaturii rotorice până la bara din alama este $DEIZC2=0.0002$ iar distanța de la miezul feromagnetic rotorice până la inelul de scurtcircuitare $DELBL=0.03$.

Rezultate finale (Semnificația marimilor este dată în A.2)

COD 3	IMP 1	IR 4	MR 500	MS 1
NSV 0	STR 2	STR2 1	ALFAI .66582D+00	ALFAR .15019D+01
A1 .20000D+01	A2 .10000D+01	BB2 .00000D+00	BDE .68353D+00	BDEM .45511D+00

Teza de doctorat

BEZ1H .12177D+01	BEZ10 .10725D+01	BEZ2H .17714D+01	BEZ20 .85570D+00	BJ1 .10511D+01
BJ2 .84718D+00	BP1 .24748D-01	BP2 .18632D+00	BR4 .20000D-02	BSV .00000D+00
BS4 .55000D-02	BZ1H .99042D-02	BZ10 .10964D-01	BZ2H .55654D-02	BZ20 .11597D-01
B01 .98000D-02	B02 .49000D-02	B1 .98000D-02	B2 .49000D-02	CC2 .43033D+00
CF .42019D+00	CFI .73246D+00	COST .25367D+07	CSI2 .00000D+00	CT .72406D+00
D .28100D+00	DE .10000D-02	DEX .41000D+00	DIL .24500D+00	DIN .13000D+00
F1 .10529D+04	F2 .88842D+03	G .62882D+03	GCU .11862D+03	GCUBL .52163D+02
GCUBP .00000D+00	GCUIL .61583D+01	GCUIP .00000D+00	GCU1 .60298D+02	GFE .51020D+03
GFE1 .30116D+03	GFE2 .20904D+03	GJ1 .22269D+03	GJ2 .12304D+03	GZ1 .78464D+02
GZ2 .86002D+02	HHZ1 .14907D+04	HHZ2 .12868D+04	HJ1 .34400D-01	HJ2 .41600D-01
HR2 .00000D+00	HR3 .20000D-02	HR4 .20000D-02	HS2 .20750D-02	HS3 .30000D-02
HS4 .20000D-02	H1 .30100D-01	H2 .32900D-01	IBL .20418D+03	IBP .00000D+00
IIL .69577D+03	IIP .00000D+00	IPD .10016D+04	I0 .73117D+02	IOR .19348D+01
IOX .73092D+02	I1 .12041D+03	I2 .89436D+02	JBL .17187D+07	JBP .00000D+00
JIL .15461D+07	JIP .00000D+00	J1 .28945D+07	KAPAF .10998D+01	KDE .12664D+01
KDE1 .12139D+01	KDE2 .10432D+01	KEI .11119D+03	KEN .10000D+01	KES .10000D+01
KE1 .10000D+01	KI2 .22830D+01	KR .10001D+01	KRRP .00000D+00	KRY .15425D+01

Teza de doctorat

KS .12660D+00	KUEMTR .00000D+00	KUEMTS .79070D+00	KU2 .48703D+02	KX .99997D+00
KXXP .00000D+00	KXY .84731D+00	K1 .45000D+00	K1RR .00000D+00	K2 .13000D+00
K2RR .00000D+00	L .75000D+00	MKDG .41475D+04	MKDM .34210D+04	MN .68800D+03
MP .15096D+04	NC1 .54000D+02	NC2 .64000D+02	N1 .27000D+02	N2 .50000D+00
PCU .21546D+04	PCU1 .12274D+04	PCU2 .92718D+03	PFE .15705D+04	PFEJ1 .10187D+04
PFEZ1 .54278D+03	PMEC .49000D+03	PN .70075D+05	PO1 .18626D+02	PO2 .16934D+03
PP1 .80983D+01	PP2 .35818D+03	PSUP .35000D+03	QB .11880D-03	QBP .00000D+00
QB1 .20800D-04	QIL .45000D-03	QIP .00000D+00	R .38638D-01	RAN .93176D+00
RM .97425D-01	RP .57399D-01	R1 .28219D-01	R1BN .21029D-01	R1IN .71905D-02
R2BNL .34392D-01	R2BNP .00000D+00	R2INL .42420D-02	R2INP .00000D+00	SK .14150D+00
SN .12869D-01	TAU .14713D+00	TAU1 .17539D+00	TC1 .16348D-01	TC2 .13695D-01
TETA .48074D+04	UE1 .26901D+03	U1 .28300D+03	VDE .41330D+04	VJ1 .11595D+03
VJ2 .35245D+02	VZ1 .26922D+03	VZ2 .25401D+03	W .11405D+08	ZALIN .22096D+05
X1 .11100D+00	X2 .15333D+00	XM .36778D+01	XP .12909D+00	

Cu ajutorul rezultatelor finale obtinute din procesul de optimizare si urmand aceeasi procedura ca si la variantele precedente se pot obtine graficele masinii $M=f(s)$ (Fig.4.14), $I_1=f(s)$ (Fig.4.15), $\cos\varphi=f(P_2)$ si $\eta=f(P_2)$ (Fig.4.16).

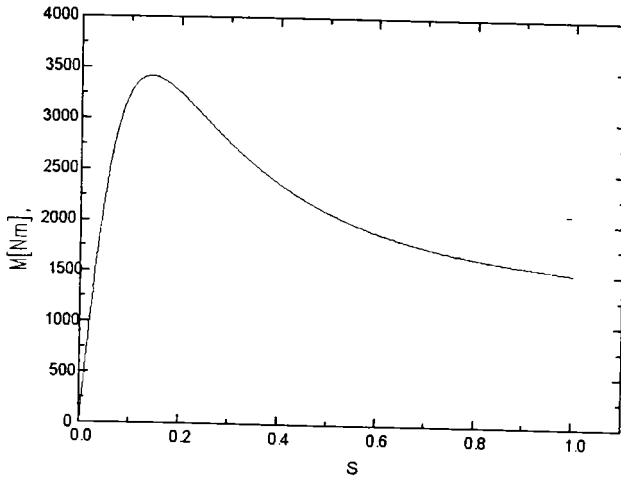


Fig.4.14

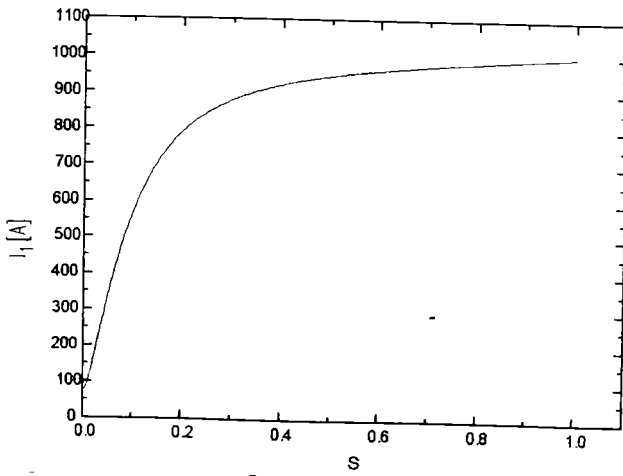


Fig.4.15.

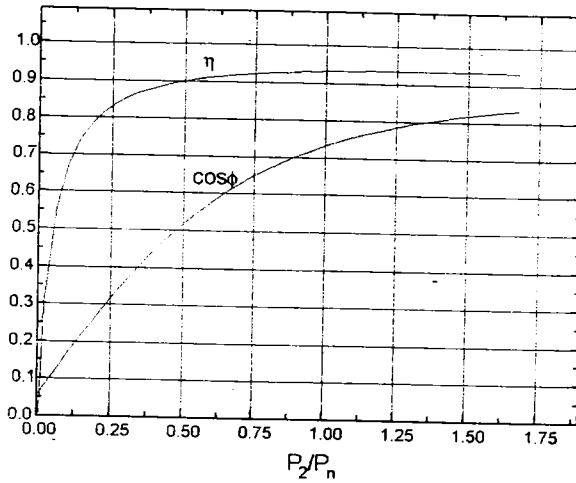


Fig.4.16

MIADS

Motorul de inductie pentru actionare directa cu trei perechi de poli ($p=3$), de $P_n=70\text{kW}$, cu rotor in colivie cu bare din cupru. Statorul are $NC1=54$ ($Q1=3$) iar rotorul $NC2=64$.

Infasurarea statorica este in doua straturi, cu pas scurtat $\epsilon_1=2$ si doua cai de infasurare in paralel $A1=2$. Numarul spirelor pe faza in stator este $N1=27$.

Distanța de la peretele crestaturii rotorice pana la bara din cupru este $DELZC2=0.0002$ iar distanța de la miezul feromagnetic rotorice pana la inelul de scurtcircuitare $DELBL=0.003$.

Rezultate finale (Semnificatia marimilor este data in A.2)

COD 3	IMP 1	IR 4	MR 500	MS 1
NSV 0	STR 2	STR2 1	ALFAI .66357D-00	ALFAR .15070D-01
A1 .20000D+01	A2 .10000D-01	BB2 .00000D+00	BDE .69754D+00	BDEM .46286D+00
BEZ1H .12129D+01	BEZ10 .11043D+01	BEZ2H .16624D+01	BEZ20 .87624D+00	BJ1 .10177D+01

Teza de doctorat

BJ2 .72290D+00	BP1 .25310D-01	BP2 .17804D+00	BR4 .20000D-02	BSV .00000D+00
BS4 .55000D-02	BZ1H .99680D-02	BZ10 .10673D-01	BZ2H .59625D-02	BZ20 .11352D-01
B01 .96000D-02	B02 .52000D-02	B1 .96000D-02	B2 .52000D-02	CC2 .28017D+00
CF .48733D+00	CFI .72999D+00	COST .28562D+07	CSI2 .00000D+00	CT .71096D+00
D .27600D+00	DE .10000D-02	DEX .41000D+00	DIL .24000D+00	DIN .13000D+00
F1 .10599D+04	F2 .89426D+03	G .62971D+03	GCU .10745D+03	GCUBL .38942D+02
GCUBP .00000D+00	GCUIL .60326D+01	GCUIP .00000D+00	GCU1 .62477D+02	GFE .52226D+03
GFE1 .31075D+03	GFE2 .21150D+03	GJ1 .22914D+03	GJ2 .15000D+03	GZ1 .81611D+02
GZ2 .61507D+02	HHZ1 .16044D+04	HHZ2 .13532D+04	HJ1 .35500D-01	HJ2 .48700D-01
HR2 .00000D+00	HR3 .20000D-02	HR4 .20000D-02	HS2 .20750D-02	HS3 .30000D-02
HS4 .20000D-02	H1 .31500D-01	H2 .23300D-01	IBL .20326D+03	IBP .00000D+00
IIL .69264D+03	IIP .00000D+00	IPD .10979D+04	I0 .74031D+02	IOR .19239D+01
IOX .74006D+02	I1 .12021D+03	I2 .89035D+02	JBL .24055D+07	JBP .00000D+00
JIL .15392D+07	JIP .00000D+00	J1 .27826D+07	KAPAF .11006D+01	KDE .12723D+01
KDE1 .12187D+01	KDE2 .10440D+01	KEI .11119D+03	KEN .10000D+01	KES .10000D+01
KE1 .10000D+01	KI2 .22830D+01	KR .10000D+01	KRRP .00000D+00	KRY .18079D+01
KS .11621D+00	KUEMTR .00000D+00	KUEMTS .78949D+00	KU2 .48703D+02	KX .99999D+00

Teza de doctorat

KXXP .00000D+00	KXY .77538D+00	K1 .45000D+00	K1RR .00000D+00	K2 .13000D+00
K2RR .00000D+00	L .75000D+00	MKDG .44868D+04	MKDM .36751D+04	MN .68500D+03
MP .10359D+04	NC1 .54000D+02	NC2 .64000D+02	N1 .27000D+02	N2 .50000D+00
PCU .16329D+04	PCU1 .11754D+04	PCU2 .45747D+03	PFE .15611D+04	PFEJ1 .98246D+03
PFEZ1 .56968D+03	PMEC .49000D+03	PN .70351D+05	PO1 .18415D+02	PO2 .16952D+03
PP1 .89266D+01	PP2 .23700D+03	PSUP .35000D+03	QB .84500D-04	QBP .00000D+00
QB1 .21600D-04	QIL .45000D-03	QIP .00000D+00	R .19236D-01	RAN .94013D+00
RM .94466D-01	RP .32613D-01	R1 .27113D-01	R1BN .20250D-01	R1IN .68634D-02
R2BNL .16459D-01	R2BNP .00000D+00	R2INL .27769D-02	R2INP .00000D+00	SK .75500D-01
SN .63774D-02	TAU .14451D+00	TAU1 .19029D+00	TC1 .16057D-01	TC2 .13450D-01
TETA .48676D+04	UE1 .26892D+03	U1 .28300D+03	VDE .42374D+04	VJ1 .10714D+03
VJ2 .30568D+02	VZ1 .30324D+03	VZ2 .18918D+03	W .11759D+08	ZALIN .22459D+05
X1 .11341D+00	X2 .12808D+00	XM .36312D+01	XP .10703D+00	

Cu ajutorul datelor finale obținute din procesul de optimizare și urmând aceeași procedură ca și în cazurile precedente se pot obține graficele mașinii $M=f(s)$ (Fig.4.17), $I_1=f(s)$ (Fig.4.18), $\cos\varphi=f(P_2)$ și $\eta=f(P_2)$ (Fig.4.19).

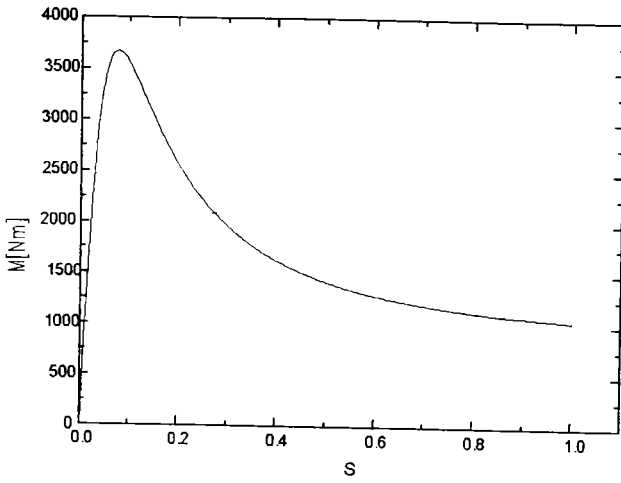


Fig.4.17.

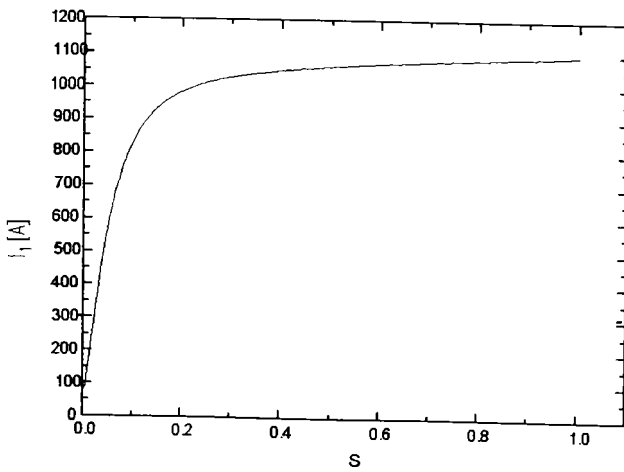


Fig.4.18.

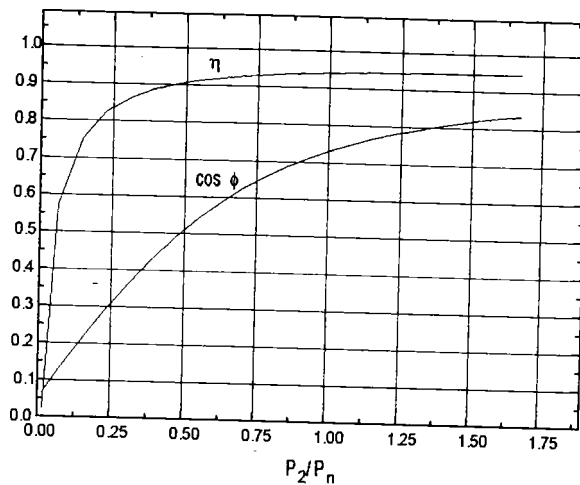


Fig.4.19.

In cele ce urmeaza va fi analizata masina cu patru perechi de poli ($p=4$), cu rotor in colivie. Numarul de crestaturi in stator este $NC1=48$ iar in rotor $NC2=60$. Infusurarea statorica este in doua straturi, cu pas scurtat $\varepsilon_1=1$ si 32 de spire pe faza. Calculul va fi facut pentru doua variante, una cu rotor din aluminiu turnat si cealalta cu rotor cu bare din cupru.

Pentru a alege puterea masini care este cea mai potrivita pentru actionarea directa am facut calculul , si in cazul acesta, pentru puteri de la $P_n=40\text{kW}$ pana la $P_n=120\text{kW}$ cu pasul de 10kW la masina cu rotor din aluminiu turnat.

$P_n[\text{kW}]$	$D[\text{mm}]$	$M_k[\text{Nm}]$	k_s	$\cos\phi$	η	$W[\text{Lei}]$
40	288	3045.8	0.132	0.521	0.92	9351500
50	288	3114.8	0.187	0.582	0.927	10275000
60	288	3072.8	0.225	0.63	0.931	11292000
70	288	3116.0	0.228	0.662	0.934	12395000
80	286	3173.0	0.343	0.683	0.936	13535000
90	286	3221.5	0.389	0.703	0.937	14790000
100	285	3191.2	0.413	0.716	0.937	16115000
110	284	3159.0	0.447	0.725	0.936	17595000
120	289	3203.0	0.476	0.737	0.936	19175000

Tabelul 4.2

Din tabel se vede ca in cazul masini cu patru perechi de poli rezultate mai bune sunt obtinute la puteri mai mari $P_n=80\text{kW}$, $P_n=90\text{kW}$, $P_n=100\text{kW}$.

Datele din tabel le putem reprezenta si grafic

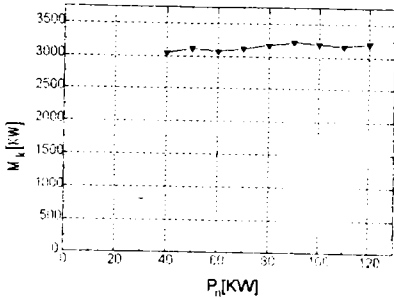


Fig.4.20 Dependenta $M_k=f(P_n)$

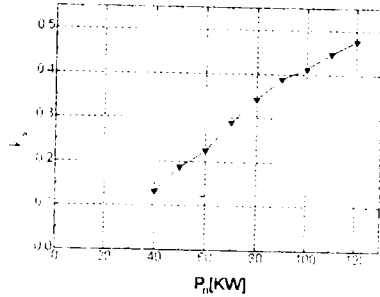


Fig.4.21 Dependenta $k_s=f(P_n)$

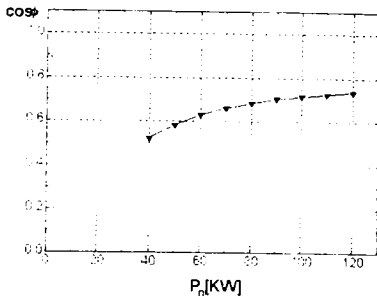


Fig.4.22. Dependenta $\cos\phi=f(P_n)$

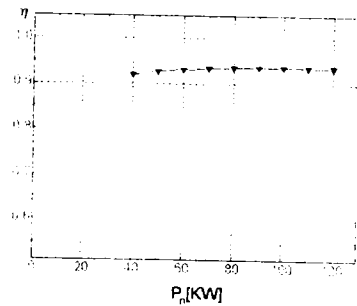


Fig.4.23. Dependenta $\eta=f(P_n)$

In cele ce urmeaza voi prezenta rezultatele complete pentru motorul de inductie pentru actionare directa de 90kW in varianta cu rotor din aluminiu turnat si varianta cu bare din cupru.

MIAD6

Motorul de inductie pentru actionare cu patru perechi de poli ($p=4$), de $P_n=90\text{kW}$, cu rotor in colivie din aluminiu turnat si crestaturi dreptunghiulare in stator si rotor. Numarul crestaturilor statorice este $NC1=48$ ($Q1=2$) iar al celor rotorice $NC2=60$. Infusurarea statorica este in doua straturi cu pas scurtat $e_1=1$, o cale de infasurare in paralel $A1=1$ si $N1=32$ spire pe faza.

Rezultate finale (Semnificatia marimilor este data in A.2)

COD	IMP	IR	MR	MS
3	1	4	500	1

Teza de doctorat

NSV 0	STR 2	STR2 1	ALFAI .71555D+00	ALFAR .13975D+01
A1 .10000D+01	A2 .10000D+01	BB2 .00000D+00	BDE .65870D+00	BDEM .47134D+00
BEZ1H .12543D+01	BEZ10 .97207D+00	BEZ2H .21693D+01	BEZ20 .81332D+00	BJ1 .11431D+01
BJ2 .70145D+00	BP1 .23199D-01	BP2 .21014D+00	BR4 .20000D-02	BSV .00000D+00
BS4 .55000D-02	BZ1H .10874D-01	BZ10 .13350D-01	BZ2H .45662D-02	BZ20 .12765D-01
B01 .12400D-01	B02 .64000D-02	B1 .12400D-01	B2 .64000D-02	CC2 .33973D+00
CF .35225D+00	CFI .70274D+00	COST .26717D+07	CSI2 .00000D+00	CT .76031D+00
D .28600D+00	DE .10000D-02	DEX .41000D+00	DIL .23440D+00	DIN .13000D+00
F1 .74169D+03	F2 .59335D+03	G .58082D+03	GCU .12226D+03	GCUBL .26336D+02
GCUBP .00000D+00	GCUIL .21759D+01	GCUIP .00000D+00	GCU1 .93750D+02	GFE .45856D+03
GFE1 .25948D+03	GFE2 .19908D+03	GJ1 .16982D+03	GJ2 .11619D+03	GZ1 .89666D+02
GZ2 .82886D+02	HHZ1 .32331D+04	HHZ2 .35629D+04	HJ1 .25634D-01	HJ2 .39720D-01
HR2 .00000D+00	HR3 .00000D+00	HR4 .20000D-02	HS2 .20750D-02	HS3 .30000D-02
HS4 .20000D-02	H1 .36366D-01	H2 .37280D-01	IBL .35957D+03	IBP .00000D+00
IIL .86471D+03	IIP .00000D+00	IPD .78794D+03	I0 .90960D+02	I0R .21226D+01
IOX .90936D+02	I1 .16065D+03	I2 .12043D+03	JBL .16588D+07	JBP .00000D+00
JIL .15802D+07	JIP .00000D+00	J1 .29504D+07	KAPAF .10819D+01	KDE .12288D+01

Teza de doctorat

KDE1 .11819D+01	KDE2 .10397D+01	KEI .17828D+03	KEN .10000D+01	KES .10000D+01
KE1 .10000D+01	KI2 .29856D+01	KR .10005D+01	KRRP .00000D+00	KRY .27166D+01
KS .38876D+00	KUEMTR .00000D+00	KUEMTS .79000D+00	KU2 .59713D+02	KX .99990D+00
KXXP .00000D+00	KXY .70859D+00	K1 .45000D+00	KIRR .00000D+00	K2 .13000D+00
K2RR .00000D+00	L .75000D+00	MKDG .36443D+04	MKDM .32215D+04	MN .11730D+04
MP .12703D+04	NC1 .48000D+02	NC2 .60000D+02	N1 .32000D+02	N2 .50000D+00
PCU .30034D+04	PCU1 .19828D+04	PCU2 .10202D+04	PFE .16530D+04	PFEJ1 .91864D+03
PFEZ1 .71463D+03	PMEC .63000D+03	PN .90153D+05	PO1 .12970D+02	PO2 .11006D+03
PP1 .40352D+01	PP2 .19588D+03	PSUP .45000D+03	QB .21676D-03	QBP .00000D+00
QB1 .54451D-04	QIL .54720D-03	QIP .00000D+00	R .23446D-01	RAN .93664D+00
RM .65837D-01	RP .60968D-01	R1 .25609D-01	R1BN .19041D-01	R1IN .65679D-02
R2BNL .21709D-01	R2BNP .00000D+00	R2INL .17252D-02	R2INP .00000D+00	SK .63500D-01
SN .11074D-01	TAU .11231D+00	TAU1 .19730D+00	TC1 .18719D-01	TC2 .14870D-01
TETA .73331D+04	UE1 .25648D+03	U1 .28300D+03	VDE .51529D+04	VJ1 .14892D+03
VJ2 .28108D+02	VZ1 .94060D+03	VZ2 .10626D+04	W .14790D+08	ZALIN .34330D+05
X1 .16326D+00	X2 .19141D+00	XM .28190D+01	XP .13403D+00	

Cu ajutorul rezultatelor finale se pot reprezenta graficele masinii $M=f(s)$ (Fig.4.24), $I_1=f(s)$ (Fig.4.25), $\cos\varphi=f(P_2)$ si $\eta=f(P_2)$ (Fig.4.26).

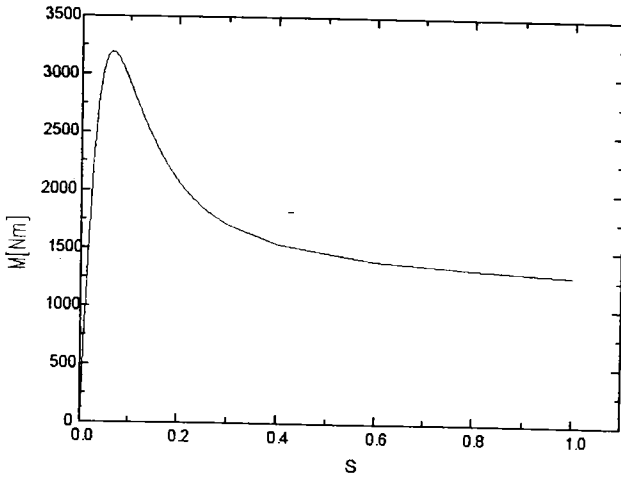


Fig.4.24

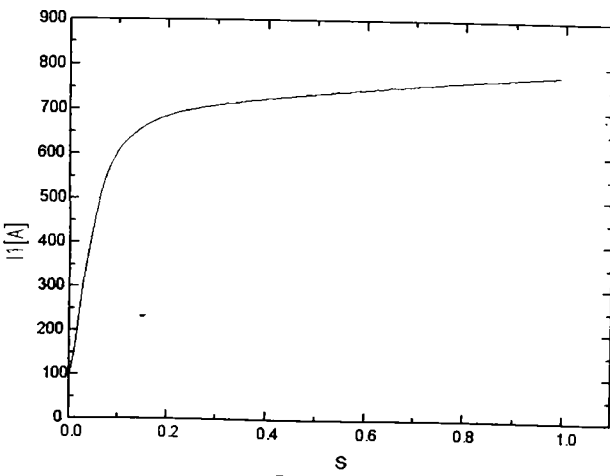


Fig.4.25

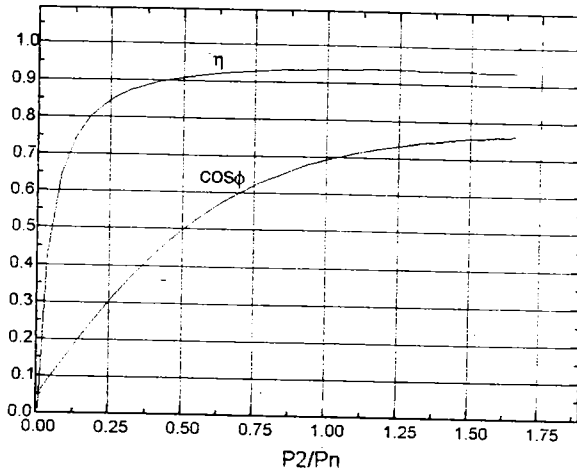


Fig.4.26

MIAD7

Motorul de inducție pentru acționare directă cu patru perechi de poli ($p=4$), de $P_n=90\text{KW}$, cu rotor în colivie cu bare din cupru și creștături dreptunghiulare atât în stator cât și în rotor. Numărul creștăturilor statorice este $NC1=48$ iar al celor rotorice $NC2=60$.

Înfășurarea statorică este în două straturi cu pas scurtat $\varepsilon_1=1$ și o cale de înfășurare în paralel $A1=1$. Numărul spirelor pe fază în stator este $N1=32$.

Ținând cont de faptul că colivie este cu bare admise pentru distanța de la peretele creștăturii până la bara din cupru $DEIZC2=0.0002$ iar pentru distanța de la miezul feromagnetic rotorice până la inelul de scurtcircuitare $DELBL=0.03$.

Rezultaté finale (Semnificatia marimilor este data în A.2)

COD 3	IMP 1	IR 4	MR 500	MS 1
NSV 0	STR 2	STR2 1	ALFAI .70598D+00	ALFAR .14165D+01
A1 .10000D+01	A2 .10000D+01	BB2 .00000D+00	BDE .68655D+00	BDEM .48469D+00
BEZ1H .12323D+01	BEZ10 .10281D+01	BEZ2H .19834D+01	BEZ20 .85306D+00	BJ1 .10446D+01

Teza de doctorat

BJ2 .66624D+00	BP1 .23936D-01	BP2 .19914D+00	BR4 .20000D-02	BSV .00000D+00
BS4 .55000D-02	BZ1H .11159D-01	BZ10 .12695D-01	BZ2H .51527D-02	BZ20 .12242D-01
B01 .11800D-01	B02 .60000D-02	B1 .11800D-01	B2 .60000D-02	CC2 .30795D+00
CF .36401D+00	CFI .69692D+00	COST .34444D+07	CSI2 .00000D+00	CT .75561D+00
D .27600D+00	DE .10000D-02	DEX .41000D+00	DIL .23400D+00	DIN .13000D+00
F1 .74302D+03	F2 .59441D+03	G .64312D+03	GCU .16833D+03	GCUBL .65672D+02
GCUBP .00000D+00	GCUIL .56465D+01	GCUIP .00000D+00	GCU1 .97015D+02	GFE .47478D+03
GFE1 .28040D+03	GFE2 .19439D+03	GJ1 .18374D+03	GJ2 .12267D+03	GZ1 .96656D+02
GZ2 .71715D+02	HHZ1 .34340D+04	HHZ2 .29770D+04	HJ1 .27900D-01	HJ2 .41500D-01
HR2 .00000D+00	HR3 .20000D-02	HR4 .20000D-02	HS2 .20750D-02	HS3 .30000D-02
HS4 .20000D-02	H1 .39100D-01	H2 .30500D-01	IBL .36146D+03	IBP .00000D+00
IIL .86926D+03	IIP .00000D+00	IPD .74258D+03	I0 .91267D+02	IOR .20805D+01
IOX .91243D+02	I1 .16184D+03	I2 .12107D+03	JBL .23780D+07	JBP .00000D+00
JIL .20122D+07	JIP .00000D+00	J1 .28593D+07	KAPAF .10854D+01	KDE .12387D+01
KDE1 .11897D+01	KDE2 .10412D+01	KEI .17828D+03	KEN .10000D+01	KES .10000D+01
KE1 .10000D+01	KI2 .29856D+01	KR .10004D+01	KRRP .00000D+00	KRY .26064D+01
KS .33256D+00	KUEMTR .00000D+00	KUEMTS .79165D+00	KU2 .59713D+02	KX .99990D+00

Teza de doctorat

KXXP .00000D+00	KXY .58059D+00	K1 .45000D+00	K1RR .00000D+00	K2 .13000D+00
K2RR .00000D+00	L .75000D+00	MKDG .34376D+04	MKDM .30725D+04	MN .11730D+04
MP .85053D+03	NC1 .48000D+02	NC2 .60000D+02	N1 .32000D+02	N2 .50000D+00
PCU .27848D+04	PCU1 .19272D+04	PCU2 .85759D+03	PFE .16130D+04	PFEJ1 .83013D+03
PFEZ1 .76371D+03	PMEC .63000D+03	PN .90361D+05	PO1 .12535D+02	PO2 .10853D+03
PP1 .46471D+01	PP2 .15275D+03	PSUP .45000D+03	QB .15200D-03	QBP .00000D+00
QB1 .56600D-04	QIL .43200D-03	QIP .00000D+00	R .19504D-01	RAN .93974D+00
RM .63815D-01	RP .46789D-01	R1 .24527D-01	R1BN .18318D-01	R1IN .62086D-02
R2BNL .16884D-01	R2BNP .00000D+00	R2INL .26140D-02	R2INP .00000D+00	SK .49500D-01
SN .93086D-02	TAU .10838D+00	TAU1 .19411D+00	TC1 .18064D-01	TC2 .14347D-01
TETA .73579D+04	UE1 .25536D+03	U1 .28300D+03	VDE .54141D+04	VJ1 .11637D+03
VJ2 .26853D+02	VZ1 .10742D+04	VZ2 .72640D+03	W .14960D+08	ZALIN .35836D+05
X1 .17111D+00	X2 .20466D+00	XM .27972D+01	XP .15503D+00	

Cu ajutorul rezultatelor finale obținute din procesul de optimizare, urmând aceeași procedură ca și la variantele precedente putem obține caracteristicile mașinii $M=f(s)$ (Fig.4.27), $I_1=f(s)$ (Fig.4.28), $\cos\varphi=f(P_2)$ și $\eta=f(P_2)$ (Fig.4.29).

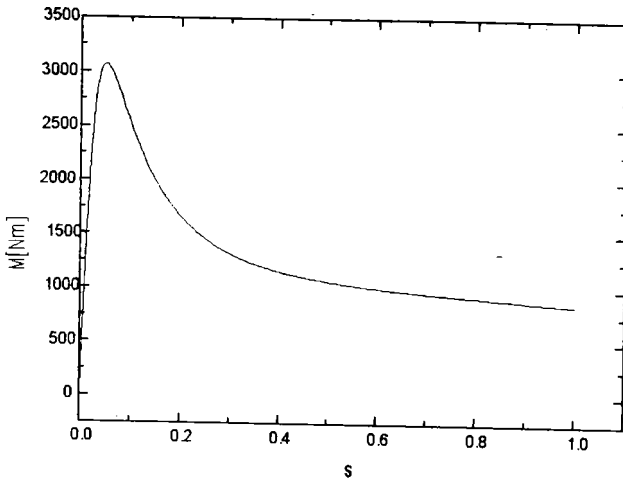


Fig. 4.27

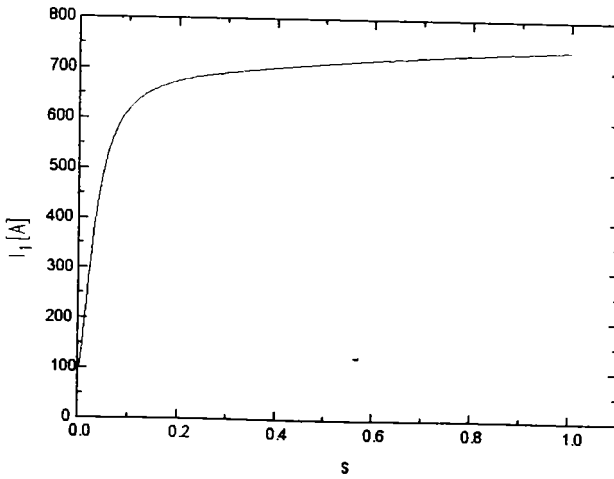


Fig. 4.28

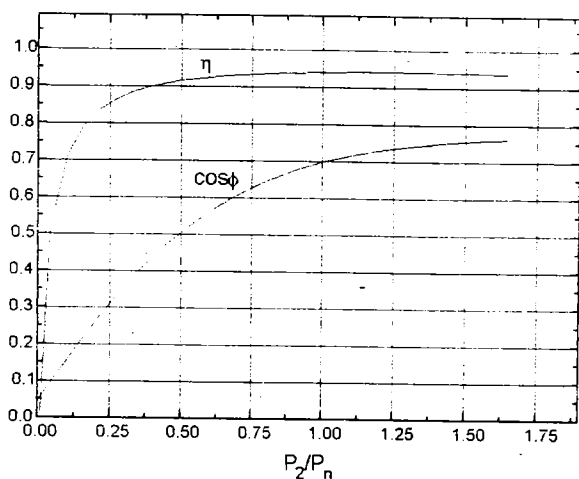


Fig. 4.29

Variante ale motorului de inducție pentru acționare directă în cazul în care se păstrează discul de frânare:

În cazul acesta lungimea activă a fierului este de 440mm. Pentru a obține cupluri suficient de mari am mărit tensiunea nominală la 335V iar diametrul exterior al miezului feromagnetic statoric l-am micșorat la 400mm pentru a lăsa o rezerva de spațiu pentru prinderea acestuia de partea interioară a carcasei.

Vor fi studiate trei variante care se deosebesc doar prin felul și materialul din care este executat rotorul. Motorele sunt cu patru perechi de poli ($p=4$), au înfășurarea statorică în două straturi, cu pas scurtat $\varepsilon_1=1$, cu două cai de înfășurare în paralel ($A1=2$) și 64 de spire pe fază. Numărul de creștături statorice este $NC1=48$ iar al celor rotorice $NC2=60$. Creștăturile statorice sunt dreptunghiulare iar cele rotorice trapezoidale.

Pentru a stabili care este puterea cea mai potrivită la noile dimensiuni impuse ale motorului am urmat aceeași procedură ca și în primul caz, deci am rulat programul IND pentru puteri de la 40kW până la 90kW cu pasul de 10kW, pentru prima variantă cu rotor din aluminiu turnat.

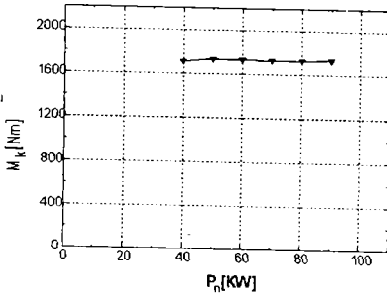
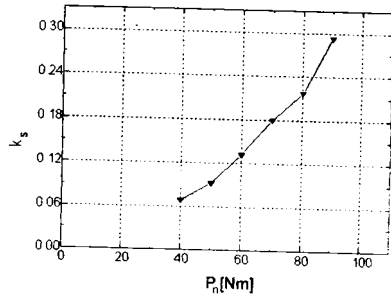
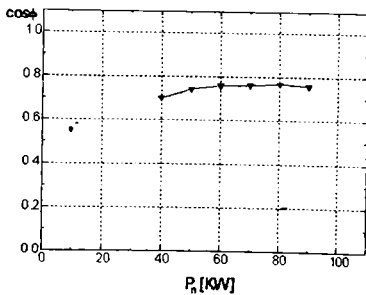
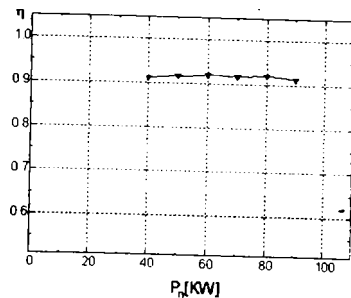
În cazul acesta am mers numai până la 90kW din cauza că la puteri mai mari mașina se saturează puternic iar inductiile în dinți primesc valori inadmisibile.

Din rezultatele obținute am ales câte un set de mărimi indicative pentru fiecare valoare a puterii și le-am reprezentat în (Tabelul 4.3).

P[kW]	D[mm]	M_k [Nm]	k_s	$\cos\varphi$	η	W[Lei]
40	294	1714.2	0.0685	0.701	0.911	9533000
50	292	1733.3	0.0917	0.742	0.916	1068200
60	288	1737.5	0.132	0.759	0.919	12347000
70	284	1726.0	0.18	0.762	0.917	14088000
80	285	1729.5	0.217	0.767	0.92	16080000
90	285	1732.3	0.293	0.759	0.912	18872000

Tabelul 4.3

Datele din tabel se pot prezenta si grafic

Fig.4.30. Dependenta $M_k=f(P_n)$ Fig.4.31. Dependenta $k_s=f(P_n)$ Fig.4.32. Dependenta $\cos\varphi=f(P_n)$ Fig.4.33. Dependenta $\eta=f(P_n)$

Si in acest caz cele mai bune caracteristici le au motoarele de 60kW, 70kW si 80kW. In cele ce urmeaza ma voi limita la puterea $P_n=70$ kW.

MIAD8

Motorul de inducție pentru acționare directă cu patru perechi de poli ($p=4$), de $P_n=70\text{kW}$, cu rotor în colivie din aluminiu turnat. Numărul creștaturilor statorice este $NC1=48$ și au formă dreptunghiulară iar al celor rotorice $NC2=60$ și sunt trapezoidale.

Infășurarea statorică este în două straturi cu pas scurtat $\epsilon_1=1$ și două cai de infășurare în paralel $A1=2$. Numărul spirelor pe fază în stator este $N1=64$.

Rezultate finale (Semnificația marimilor este dată în A.2)

COD 3	IMP 1	IR 4	MR 500	MS 1
NSV 0	STR 2	STR2 1	ALFAI .67714D+00	ALFAR .14768D+01
A1 .20000D-01	A2 .10000D-01	BB2 .00000D+00	BDE .68055D-00	BDEM .46083D-00
BEZ1H .13422D-01	BEZ10 .10072D-01	BEZ2H .17149D-01	BEZ20 .91344D-00	BJ1 .10335D-01
BJ2 .64713D+00	BP1 .47096D-01	BP2 .16730D+00	BR4 .30000D-02	BSV .00000D-00
BS4 .55000D-02	BZ1H .10564D-01	BZ10 .13219D-01	BZ2H .61841D-02	BZ20 .11661D-01
B01 .11800D-01	B02 .76000D-02	B1 .11800D-01	B2 .50000D-02	CC2 .35119D-00
CF .15782D-00	CFI .76240D-00	COST .51388D+06	CSI2 .00000D+00	CT .83220D-00
D .28400D+00	DE .10000D-02	DEX .40000D+00	DIL .23800D-00	DIN .13000D-00
F1 .73371D+03	F2 .58697D+03	G .33857D+03	GCU .62940D-02	GCUBL .13714D-02
GCUBP .00000D+00	GCUIL .25840D+01	GCLIP .00000D+00	GCU1 .46642D+02	GFE .27563D+03
GFE1 .14911D+03	GFE2 .12653D+03	GJ1 .10497D+03	GJ2 .72613D+02	GZ1 .44132D+02
GZ2 .53915D+02	HHZ1 .31199D+04	HHZ2 .91079D+03	HJ1 .27900D-01	HJ2 .41800D-01

Teza de doctorat

HR2 .00000D+00	HR3 .00000D+00	HR4 .20000D-02	HS2 .20750D-02	HS3 .30000D-02
HS4 .20000D-02	H1 .30100D-01	H2 .34200D-01	IBL .49002D+03	IBP .00000D+00
IIL .11784D+04	IIP .00000D+00	IPD .36145D+03	IO .41452D+02	IOR .93822D+00
IOX .41441D+02	II .98775D+02	I2 .82062D+02	JBL .25469D+07	JBP .00000D+00
JIL .18413D+07	JIP .00000D+00	J1 .50447D+07	KAPAF .10958D+01	KDE .12803D+01
KDE1 .11834D+01	KDE2 .10818D+01	KEI .71312D+03	KEN .10000D+01	KES .10000D+01
KE1 .10000D+01	KI2 .59713D+01	KR .10015D+01	KRRP .00000D+00	KRY .24816D+01
KS .18039D+00	KUEMTR .00000D+00	KUEMTS .78696D+00	KU2 .11943D+03	KX .99964D+00
KXXP .00000D+00	KXY .67588D+00	K1 .45000D+00	K1RR .00000D+00	K2 .13000D+00
K2RR .00000D+00	L .44000D+00	MKDG .20703D+04	MKDM .17260D+04	MN .91500D+03
MP .80141D+03	NC1 .48000D+02	NC2 .60000D+02	N1 .64000D+02	N2 .50000D+00
PCU .44451D+04	PCU1 .28840D+04	PCU2 .15611D+04	PFE .84299D+03	PFEJ1 .46421D+03
PFEZ1 .36877D+03	PMEC .49000D+03	PN .69643D+05	PO1 .19167D+02	PO2 .61283D+02
PP1 .80097D+01	PP2 .79024D+02	PSUP .35000D+03	QB .19240D-03	QBP .00000D+00
QB1 .97900D-05	QIL .64000D-03	QIP .00000D+00	R .77271D-01	RAN .91653D+00
RM .16167D+00	RP .18325D+00	R1 .98533D-01	R1BN .62130D-01	R1IN .36403D-01
R2BNL .71171D-01	R2BNP .00000D+00	R2INL .59908D-02	R2INP .00000D+00	SK .81500D-01

Teza de doctorat

SN .21723D-01	TAU .11153D+00	TAU1 .19959D+00	TC1 .18588D-01	TC2 .14765D-01
TETA .66837D+04	UE1 .29594D+03	U1 .33500D+03	VDE .55469D+04	VJ1 .11041D+03
VJ2 .26000D+02	VZ1 .75127D+03	VZ2 .24919D+03	W .11473D+08	ZALIN .42512D+05
X1 .39973D+00	X2 .50078D+00	XM .71375D+01	XP .35613D+00	

Cu ajutorul datelor finale optinute din procesul de optimizare cu programul IND si urmand in continuare aceeaasi procedura ca si in cazurile precedente putem reprezenta caracteristicile masinii $M=f(s)$ (Fig.4.34), $I_1=f(s)$ (Fig.4.35), $\cos\varphi=f(P_2)$ si $\eta=f(P_2)$ (Fig.4.36).

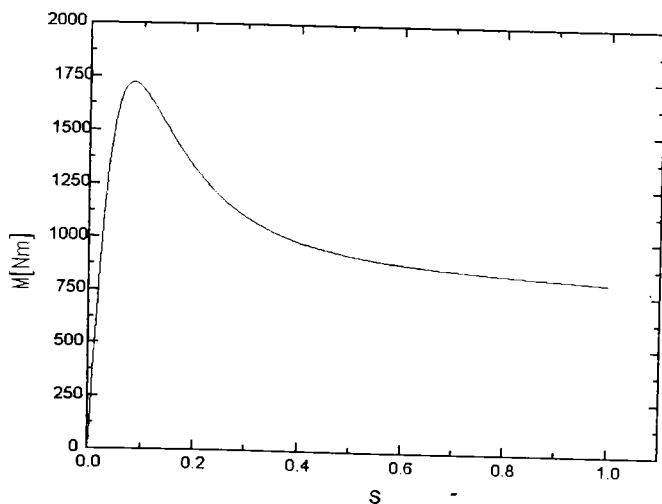


Fig.4.34

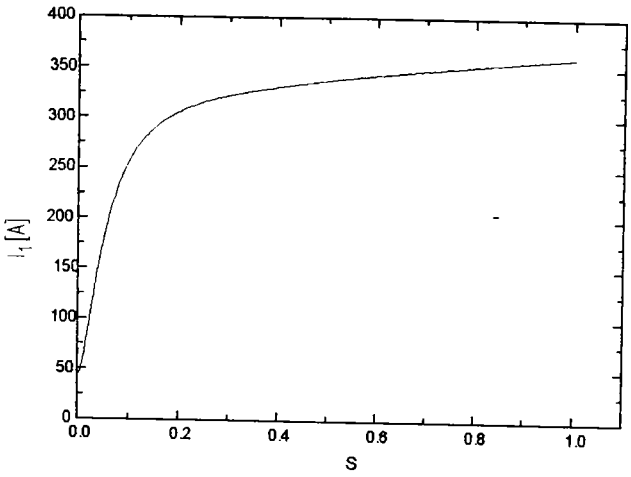


Fig.4.35.

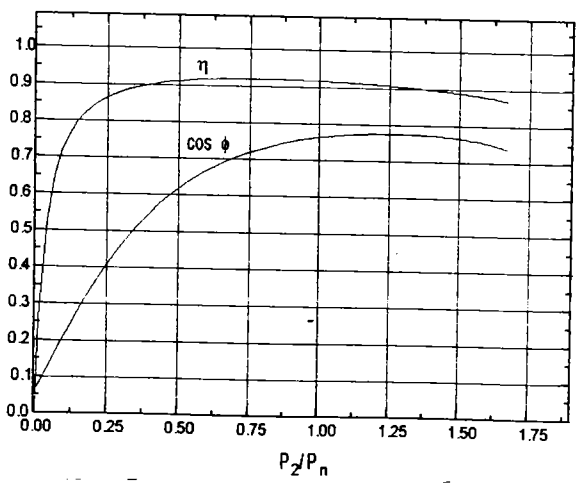


Fig.4.36.

MIAD9

Motorul de inductie pentru actionare directa cu patru perechi de poli ($p=4$), de $P_n=70kW$.
Varianta cu rotor in colivie cu bare din cupru.

Rezultate finale (Semnificatia marimilor este data in A.2.)

COD 3	IMP 1	IR 4	MR 500	MS 1
NSV 0	STR 2	STR2 1	ALFAI .67637D-00	ALFAR .14785D-01
A1 .20000D+01	A2 .10000D+01	BB2 .00000D+00	BDE .67268D+00	BDEM .45498D+00
BEZ1H .13553D+01	BEZ10 .99130D+00	BEZ2H .16857D+01	BEZ20 .90028D+00	BJ1 .10588D-01
BJ2 .63058D+00	BP1 .46844D-01	BP2 .16272D+00	BR4 .30000D-02	BSV .00000D+00
BS4 .55000D-02	BZ1H .10460D-01	BZ10 .13415D-01	BZ2H .62888D-02	BZ20 .11818D-01
B01 .12000D-01	B02 .81000D-02	B1 .12000D-01	B2 .50000D-02	CC2 .24096D-00
CF .17532D+00	CFI .75653D+00	COST .28277D+07	CSI2 .00000D-00	CT .81729D-00
D .28700D-00	DE .10000D-02	DEX .40000D+00	DIL .23100D-00	DIN .13000D-00
F1 .74009D-03	F2 .59207D-03	G .37405D+03	GCU .97228D+02	GCUBL .44808D-02
GCUBP .00000D-00	GCUIL .64515D+01	GCUIP .00000D-00	GCU1 .45968D-02	GFE .27682D-03
GFE1 .14544D+03	GFE2 .13139D+03	GJ1 .10253D+03	GJ2 .74783D-02	GZ1 .42905D-02
GZ2 .56604D+02	HHZ1 .31792D+04	HHZ2 .79444D+03	HJ1 .27200D-01	HJ2 .42800D-01
HR2 .00000D+00	HR3 .20000D-02	HR4 .20000D-02	HS2 .20750D-02	HS3 .30000D-02
HS4 .20000D-02	H1 .29300D-01	H2 .34700D-01	IBL .49313D+03	IBP .00000D+00

Teza de doctorat

III .11859D+04	IIP .00000D+00	IPD .35079D+03	IO .40784D+02	IOR .94593D+00
IOX .40773D+02	II .99698D+02	I2 .82583D+02	JBL .26064D+07	JBP .00000D+00
JIL .23718D+07	JIP .00000D+00	J1 .51764D+07	KAPAF .10961D+01	KDE .12767D+01
KDE1 .11812D+01	KDE2 .10809D+01	KEI .71312D+03	KEN .10000D+01	KES .10000D+01
KE1 .10000D+01	KI2 .59713D+01	KR .10014D+01	KRRP .00000D+00	KRY .31509D+01
KS .17666D+00	KUEMTR .00000D+00	KUEMTS .78903D+00	KU2 .11943D+03	KX .99961D+00
KXXP .00000D+00	KXY .49181D+00	K1 .45000D+00	K1RR .00000D+00	K2 .13000D+00
K2RR .00000D+00	L .44000D+00	MKDG .19156D+04	MKDM .16123D+04	MN .91500D+03
MP .55460D+03	NC1 .48000D+02	NC2 .60000D+02	N1 .64000D+02	N2 .50000D+00
PCU .39424D+04	PCU1 .29928D+04	PCU2 .95003D+03	PFE .84822D+03	PFEJ1 .47591D+03
PFEZ1 .36221D+03	PMEC .49000D+03	PN .70252D+05	PO1 .19633D+02	PO2 .62531D+02
PP1 .78382D+01	PP2 .79854D+02	PSUP .35000D+03	QB .18920D-03	QBP .00000D+00
QB1 .96300D-05	QIL .50000D-03	QIP .00000D+00	R .46433D-01	RAN .92314D+00
RM .16805D+00	RP .13662D+00	R1 .10036D+00	R1BN .63163D-01	R1IN .37201D-01
R2BNL .41685D-01	R2BNP .00000D+00	R2INL .46889D-02	R2INP .00000D+00	SK .45500D-01
SN .13220D-01	TAU .11270D+00	TAU1 .18869D+00	TC1 .18784D-01	TC2 .14923D-01
TETA .65759D+04	UE1 .29534D+03	U1 .33500D+03	VDE .54675D+04	VJ1 .11721D+03

Teza de doctorat

VJ2 .25409D+02	VZ1 .74521D+03	VZ2 .22054D+03	W .14451D+08	ZALIN .42461D+05
X1 .39737D+00	X2 .58039D+00	XM .72398D+01	XP .40382D+00	

Cu ajutorul datelor finale putem reprezenta graficele masinii

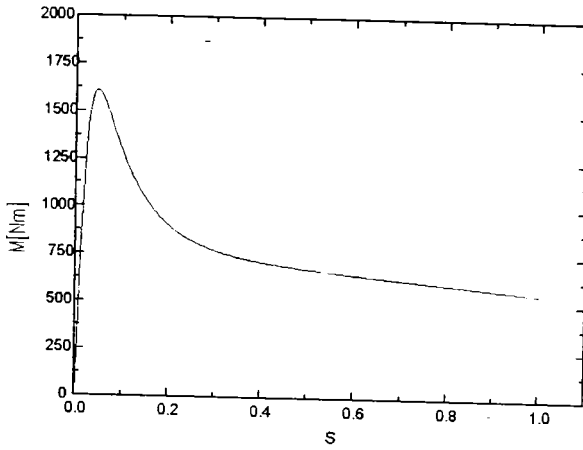


Fig.4.37.

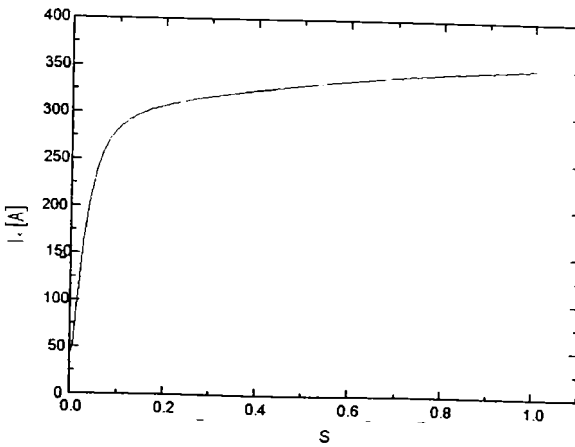


Fig.4.38.

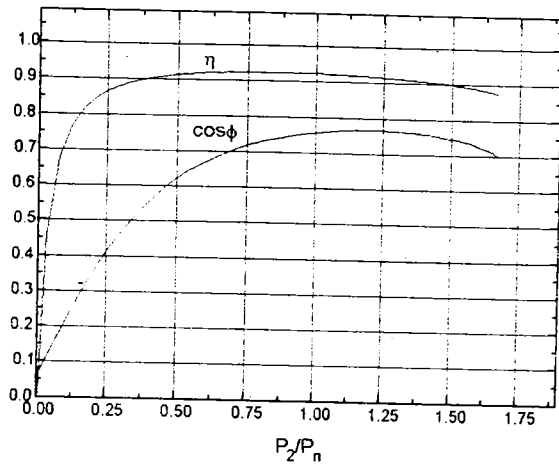


Fig.4.39.

MIAD10

Motorul de inducție pentru acționare directă cu patru perechi de poli ($p=4$), de $P_n=70\text{kW}$.
 Varianta cu rotor în colivie cu bare din alama.

Rezultate finale (Semnificatia marimilor este data în A.2)

COD 3	IMP 1	IR 4	MR 500	MS 1
NSV 0	STR 2	STR2 1	ALFAI .67424D-00	ALFAR .14831D+01
A1 .20000D+01	A2 .10000D+01	BB2 .00000D+00	BDE .66357D+00	BDEM .44741D+00
BEZ1H .12914D+01	BEZ10 .97254D+00	BEZ2H .19023D+01	BEZ20 .88480D+00	BJ1 .12080D+01
BJ2 .75801D+00	BP1 .44086D+01	BP2 .18109D+00	BR4 .30000D+02	BSV .00000D+00
BS4 .55000D+02	BZ1H .10996D+01	BZ10 .13677D+01	BZ2H .55243D+02	BZ20 .12027D+01
B01 .11900D+01	B02 .82000D+02	B1 .11900D+01	B2 .50000D+02	CC2 .41540D+00
CF .15389D+00	CFI .74955D+00	COST .25119D+07	CSI2 .00000D+00	CT .84091D+00

Teza de doctorat

D .29100D+00	DE .10000D-02	DEX .40000D+00	DIL .22843D+00	DIN .13000D+00
F1 .72849D+03	F2 .58279D+03	G .37467D+03	GCU .10899D+03	GCUBL .52010D+02
GCUBP .00000D+00	GCUIL .81662D+01	GCUP .00000D+00	GCU1 .48815D+02	GFE .26568D+03
GFE1 .13742D+03	GFE2 .12826D+03	GJ1 .90534D+02	GJ2 .59408D+02	GZ1 .46883D+02
GZ2 .68855D+02	-HHZ1 .21690D+04	HHZ2 .10253D+04	HJ1 .23800D-01	HJ2 .35500D-01
HR2 .00000D+00	HR3 .20000D-02	HR4 .20000D-02	HS2 .20750D-02	HS3 .30000D-02
HS4 .20000D-02	H1 .30700D-01	H2 .44000D-01	IBL .49943D+03	IBP .00000D+00
IIL .12011D+04	IIP .00000D+00	IPD .31394D+03	IO .40126D+02	IOR .10264D+01
IOX .40113D+02	I1 .10116D+03	I2 .83638D+02	JBL .21667D+07	JBP .00000D+00
JIL .18767D+07	JIP .00000D+00	J1 .49588D+07	KAPAF .10968D+01	KDE .12722D+01
KDE1 .11782D+01	KDE2 .10797D+01	KEI .71312D+03	KEN .10000D+01	KES .10000D+01
KE1 .10000D+01	KI2 .59713D+01	KR .10022D+01	KRRP .00000D+00	KRY .23080D+01
KS .16634D+00	KUEMTR .00000D+00	KUEMTS .78856D+00	KU2 .11943D+03	KX .99939D+00
KXXP .00000D+00	KXY .65783D+00	K1 .45000D+00	K1RR .00000D+00	K2 .13000D+00
K2RR .00000D+00	L .44000D+00	MKDG .17486D+04	MKDM .15023D+04	MN .92000D+03
MP .70993D+03	NC1 .48000D+02	NC2 .60000D+02	N1 .64000D+02	N2 .50000D+00
PCU .49887D+04	PCU1 .29164D+04	PCU2 .20723D+04	PFE .91839D+03	PFEJ1 .54695D+03

Teza de doctorat

PFEZ1 .36040D+03	PMEC .49000D+03	PN .69485D+05	PO1 .19520D+02	PO2 .61858D+02
PP1 .73503D+01	PP2 .11657D+03	PSUP .35000D+03	QB .23050D-03	QBP .00000D+00
QB1 .10200D-04	QIL .64000D-03	QIP .00000D+00	R .98747D-01	RAN .90834D+00
RM .18797D+00	RP .22267D+00	R1 .94999D-01	R1BN .59633D-01	R1IN .35366D-01
R2BNL_ .94352D-01	R2BNP .00000D+00	R2INL .41875D-02	R2INP .00000D+00	SK .89500D-01
SN .28680D-01	TAU .11428D+00	TAU1 .17667D+00	TC1 .19046D-01	TC2 .15132D-01
TETA .64694D+04	UE1 .29468D+03	U1 .33500D+03	VDE .53741D+04	VJI .17213D+03
VJ2 .29541D+02	VZ1 .53271D+03	VZ2 .36090D+03	W .16445D+08	ZALIN .42490D+05
X1 .40706D+00	X2 .65376D+00	XM .73415D+01	XP .49912D+00	

Cu ajutorul rezultatelor finale se pot reprezenta graficele masinii

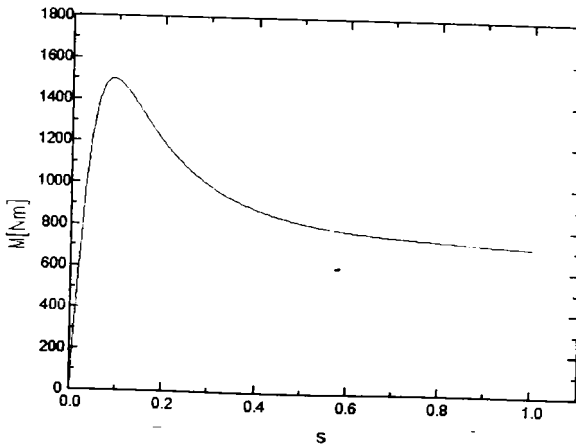


Fig. 4.40

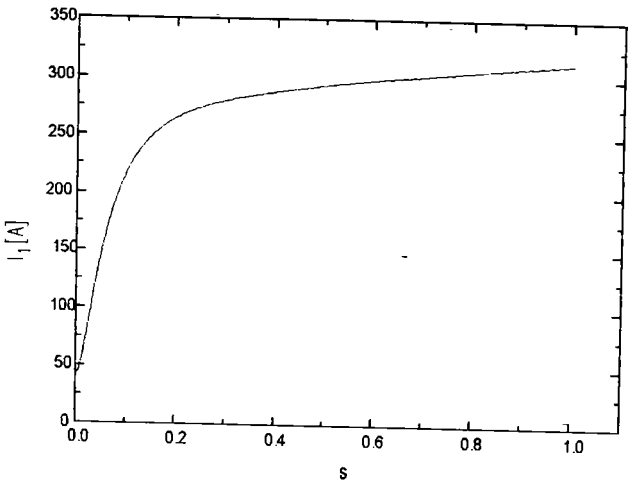


Fig.4.41

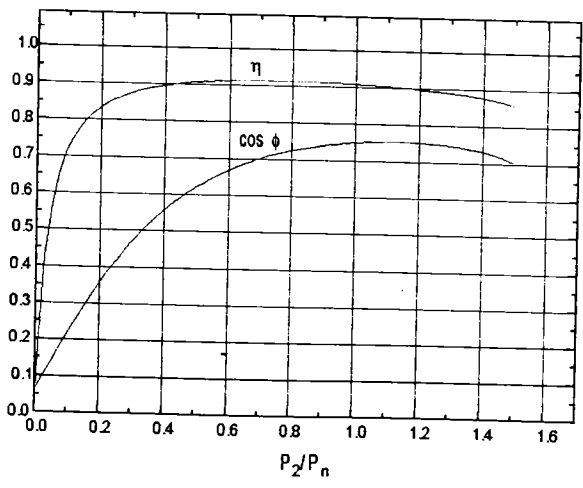


Fig. 4.42

4.4. ALEGEREA VARIANTEI OPTIME A MOTORULUI DE INDUCTIE PENTRU ACTIONARE DIRECTA

La alegerea unui motor de tractiune electrica pentru un anumit vehicul, in cazul de fata pent un tramvai, pe langa caracteristicile mecanice ale motorului, un rol foarte important le au cerinte de mers impuse vehicului.

Miscarea vehiculului in lungul caii de circulatie este determinata de:

- forte controlabile de catre conducatorul vehiculului, reprezentand fortele de tractiune si franare
- forte necontrolabile de pe vehicul, reprezentand fortele de rezistenta la inaintare

Ca sens pozitiv al fortei de tractiune F_t se considera sensul miscarii utile de translatie vehicului in lungul caii de circulatie, iar ca sens pozitiv al fortei de franare F_f si al fortei totale rezistenta la inaintare F_r , sensul opus acestei miscari. Ca atare, fortele de tractiune si de franare su intodeauna pozitive iar forta de rezistenta totala la inaintare este pozitiva in majoritatea situatiil dar poate deveni si nula sau chiar negativa in cazul in care vehiculul coboara pante suficient mari.

Cu precizarile anterioare, situatia miscarii utile a vehiculului, in lungul caii de circulatie poate scrie aplicand vehiculului legea fundamentala a dinamicii

$$m_a \frac{dv}{dt} = F_t - F_f - F_r \tag{4.2}$$

Prin integrarea acestei ecuatii se obtin dependentele temporale $v(t)$ si $s(t)$ ale vitezei spatiului parcurs, a caror reprezentare grafica defineste diagramele de mers ale vehicului (Fig.4.43).

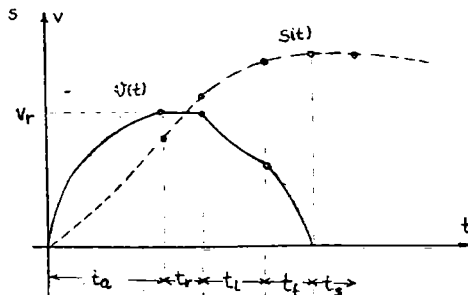


Fig.4.43

Teza de doctorat

Ciclul de deplasare utila a unui vehicul corespunzator parcursului dintre doua statii succesive, incepand cu pornirea din repaus si terminand cu franarea pana la oprire, este alcatuit din mai multe faze:

- faza de demaraj, de durata t_d , in care viteza de deplasare utila a vehiculului creste de la zero la valoarea de regim v_r ,

- faza de mers cu viteza constanta, de durata t_c , in care vehiculul se deplaseaza cu viteza de regim stabilizat $v_r = \text{const}$.

- faza de mers lansat de durata t_l , in care are loc o decelerare a vehiculului, aflat in regim de mers fara curent

- faza de franare, de durata t_f , cand asupra vehiculului actioneaza fortele de franare si de rezistenta la inaintare, determinand, in final, oprirea vehiculului

Pentru demarajul tramvaiului TIMIS si pentru a-i impune o acceleratie suficienta sunt necesare mai multe motoare de inductie pentru actionare directa. In cazul de fata am adoptat solutia cu patru motoare.

Avand in vedere lipsa reductorului este necesar ca motorul sa dezvolte un cuplu cat mai mare la pornire. La alimentarea motoarelor de inductie prin convertoare statice de frecventa, pornind de la frecvente mici, se poate porni cu cuplul critic.

Alegerea variantei optime a motorului de inductie pentru actionare directa poate fi facuta dupa mai multe criterii: cuplu critic mare, factor de putere si randament cat mai buni, costuri minime etc.

In cazul actionarii directe din cauza lipsei reductorului criteriul dominant este cuplul motorului care trebuie sa fie suficient de mare pentru a impune vehiculului o accelerare suficienta, iar celelalte marimi trebuie sa fie in limite acceptabile.

Forta de tractiune se calculeaza cu ecuatia

$$F_t = \frac{2}{D} Mn \quad (4.3)$$

in care sunt

D - diametrul rotii

M - cuplul motorului de tractiune

n - numarul motoarelor de tractiune

Pentru ca forta de tractiune sa poata fi transmisa in intregime la calea de rulare, ea trebuie constransa la valoarea maxima corespunzatoare limitei de aderenta roata-cale, astfel incat sa nu apara patinarea.

Aceasta se poate reprezenta cu relatia

$$F_{t \max} \leq G_a f_a \quad (4.4)$$

Teza de doctorat

in care sunt:

G_a - greutatea aderenta a vehiculului

f_a - coeficientul global de aderenta

Forța de tractiune trebuie sa depaseasca forța rezistentelor la inaintare F_r si sa accelereze vehiculul cu acceleratia dorita.

Relatia care exprima aceasta este:

$$F_t \geq [F_r + 100(1 + \varepsilon)\alpha_{\max} \pm i]m. \quad (4.5)$$

in care sunt

m_t - masa totala a vehiculului incarcat, compusa din masa proprie a vehiculului m_v si masa calatorilor m_c

ε - corectia de masa

i - declivitatea

Pentru calculul fortei de rezistenta la inaintare s-a ales o relatie care se foloseste pentru tramvaie in SUA [37]

$$\sum F_r = 4.5 \sqrt{\frac{m}{G}} + 5.67 \frac{m}{G} + 0.028v + 0.0045 \frac{Sv^2}{G} \quad (4.6)$$

in care sunt

G - greutatea pe osie

S - suprafata sectiunii transversale

v - viteza tramvaiului

m - numarul osiilor

Pentru a face mai usoara urmarirea rezultatelor variantele calculate au fost impartite in doua mari grupe, primei grupe ii apartin motoarele cu lungimea pachetului de tole de $L=750\text{mm}$ iar grupei a doua motoarele cu lungimea pachetului de tole de $L=440\text{mm}$. In cadrul fiecarei grupe se pot forma mai multe subgrupe (Tabelul 4.4).

Grupa	Subgrupa	Varianta
Motoare cu $L=750\text{mm}$	$P=70\text{KW}$, $p=3$, $A1=1$, $N1=36$	MIAD1, MIAD2
	$P=70\text{KW}$, $p=3$, $A1=2$, $N1=27$	MIAD3, MIAD4, MIAD5
	$P=90\text{KW}$, $p=4$, $A1=1$, $N1=32$	MIAD6, MIAD7
Motoare cu $L=440\text{mm}$	$P=70\text{KW}$, $p=4$, $A1=2$, $N1=64$	MIAD8, MIAD9, MIAD10

Tabelul 4.4

Univ. Tehn. Bucuresti
Facultatea de Inginerie
Mecanica

Teza de doctorat

In cele ce urmeaza va fi analizata cate o varianta, din fiecare subgrupa, a motorului de inductie pentru actionare directa. Variantele din cadrul unei subgrupe se deosebesc intre ele doar prin modul in care este executata colivia rotorica si de materialul care a fost folosit in acest scop.

MIAD1

Datele caracteristice ale acestui motor cu $L=750\text{mm}$ sunt:

$$P_n=70\text{kW}, p=3, f=50\text{Hz}, M_n=685\text{Nm}, M_k=2235.9\text{Nm}, \cos\varphi=0.85, \eta=0.943$$

Prin modificarea frecventei in limitele (0 - 25)Hz se obtin viteze de deplasare (0 - 65)km/h

Fora de tractiune dezvoltata de cele patru motoare de tractiune la pornire se calculeaza cu ecuatiia (4.3)

$$F_t = \frac{2}{D} M_k n = 26.1\text{kN}$$

Fora rezistentelor la inaintare se calculeaza cu ecuatiia (4.6), tinand cont ca la pornire $v=0$
 $\Sigma F_r=10.4 \text{ daN/t}$

Acceleratia vehiculului se calculeaza din relatia (4.5), tinand cont de masa vehiculului maxim incarcat $m_t=m_v+m_c=60.3 \text{ t}$, si admitand $\varepsilon=0.15$ si $i=0$ cste

$$a_{\max}=0.29\text{m/s}^2$$

Aceasta valoare a acceleratiei a tramvaiului maxim incarcat cu motoare pentru actionare directa este mai mica decat la tramvaiele cu reductor la care depaseste 0.5 m/s^2 iar la tramvaiele moderne depaseste chiar 1m/s^2 . In schimb factorul de putere este foarte bun $\cos\varphi=0.85$ ceea ce este important la franarea cu recuperare, la fel si randamentul $\eta=0.943$ ceea ce implica pierderi si costuri mai mici la exploatare.

⋮

MIAD3

Datele caracteristice ale acestui motor cu $L=750\text{mm}$ sunt

$$P_n=70\text{kW}, p=3, f=50\text{Hz}, M_n=685\text{Nm}, M_k=3902.1\text{Nm}, \cos\varphi=0.73, \eta=0.94$$

Prin modificarea frecventei in limitele (0 - 25)Hz se obtin viteze de deplasare (0 - 65)km/h

Urmand aceeasi procedura ca si in cazul precedent se calculeaza fora de tractiune $F_t=45\text{kN}$ si acceleratia vehiculului maxim incarcat $a_{\max}=0.56\text{m/s}^2$.

Aceasta valoare a acceleratiei este foarte buna pentru un tramvai cu actionare directa si este apropiata de valoarea acceleratiei la tramvaiul TIMIS-2 propulsat cu motoare de c.c. (0.7m/s^2), factorul de putere este mai slab decat la varianta precedenta dar se incadreaza in limite acceptabile iar randamentul este si in cazul acesta foarte bun.

MIAD6

Datele caracteristice ale acestui motor cu $L=750\text{mm}$ sunt:

$$P_n=90\text{kW}, p=4, f=50\text{Hz}, M_n=1174\text{Nm}, M_k=3270.8\text{Nm}, \cos\varphi=0.7, \eta=0.936$$

Prin modificarea frecventei in limitele (0 - 35)Hz se obtin viteze de deplasare de (0 - 67)Hz

Pentru acceleratia vehiculului maxim incarcat s-a obtinut $a_{\max}=0.46\text{m/s}^2$.

Valoarea obținută a accelerației în cazul acesta este bună pentru un vehicul propulsat cu motoare de acționare directă, în schimb factorul de putere a primit o valoare cam mică iar randamentul s-a menținut și în cazul acesta la o valoare foarte bună .

MIAD8

Datele caracteristice ale acestui motor cu $L=440\text{mm}$ sunt:

$P_n=70\text{kW}$, $p=4$, $f=50\text{Hz}$, $M_n=915\text{Nm}$, $M_k=1726\text{Nm}$, $\cos\varphi=0.768$, $\eta=0.917$

Prin modificarea frecvenței în limitele (0 -35)Hz, se obțin viteze de deplasare (0 - 67)km/h

Forța de tracțiune este $F_t=20\text{kN}$ iar accelerația tramvaiului maxim încărcat $a_{\max}=0.2\text{m/s}^2$.

Această valoare a accelerației este cea mai mică din cele calculate dar era de așteptat având în vedere scurtarea pachetului de tole cu 40% . În schimb factorul de putere și randamentul au valori normale pentru o mașină electrică de acest tip.

4.5 CONCLUZII

În acest capitol au fost calculate și analizate mai multe variante ale mașinii de inducție pentru acționare directă la două lungimi a pachetului de tole.

Mășinile cu lungimea pachetului de tole de 750mm dezvoltă cupluri mai mari și sunt mai puțin solicitate magnetic. Din această grupă mașinile cu trei perechi de poli, o cale de înfășurare în paralel și două spire pe bobina au cel mai bun factor de putere și randament iar mașinile cu trei perechi de poli, două cai de înfășurare în paralel și trei spire pe bobina dezvoltă cele mai mari cupluri dar au factor de putere mai slab. Despre mașinile cu patru perechi de poli putem spune că se situează între primele două subgrupe. Ele au factor de putere și randament mai mici decât mașinile din prima subgrupă și cupluri mai mici decât mașinile din subgrupă a doua. Avantajul lor rezultă însă din particularitățile mașinii pentru acționare directă care funcționează la frecvențe mici așa că ele se apropie cel mai mult de regimul nominal, la care sunt proiectate.

Mășinile cu lungimea pachetului de tole de 440mm au fost proiectate numai cu patru perechi de poli din cauza că mașinile cu trei perechi de poli dezvoltă cupluri mult prea slabe pentru o mașină de tracțiune pentru acționare directă. Avantajele lor rezultă din dimensiunile mai mici și masele reduse, fiind mai ușor de montat pe boghiurile existente fără a fi nevoie să se modifice sistemul de frânăre.

5. APLICAREA MOTORULUI DE INDUCTIE PENTRU ACTIONARE DIRECTA

Din masinile pentru actionare directa calculate in capitolul precedent am optat pentru varianta MLAD3 in cazul in care se utilizeaza tot spatiul disponibil intre cele doua cutii de unsoare si pentru varianta MLAD8 in cazul in care se pastreaza discul de franare, lungimea motorului fiind mai mica. Ambele sisteme au si avantaje si dezavantaje.

In primul caz avem cupluri mai mari cand se obtin performante mai bune ale tramvaiului, densitatile de curent in infasurarea statorica si in colivia rotorica sunt mai mici si prin urmare avem pierderi si costuri mai mici. Dezavantajul acestei variante este ca nu poate fi mentinut sistemul de franare existent.

In cazul al doilea din cauza scurtarii lungimii active a masinii se poate pastra actualul sistem de franare cu disc pe osie, in schimb cuplurile obtinute sunt mai mici iar masina este mai sollicitata.

5.1. SISTEMUL DE ACTIONARE PENTRU VARIANTA MLAD3

Ideea , in cazul acesta, este sa se foloseasca cutiile de unsoare care sunt prevazute cu lagare cu rulmenti pentru sprijinirea carcasi masinii (Fig.5.1).

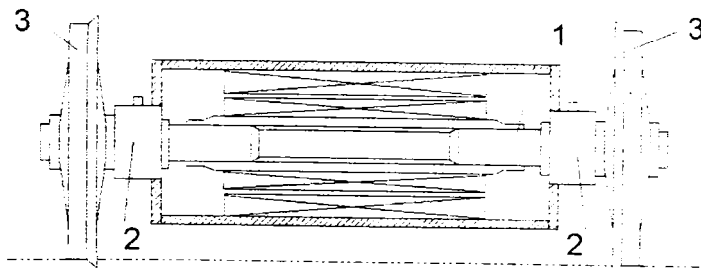


Fig.5.1

1. Osie
2. Cutie de unsoare cu lagar osie
3. Roata elastica

Statorul masinii este presat si fixat in interiorul carcasei . Lungimea masurata intre cutiile de unsoare la boghiunile tramvaiului din seria TIMIS-2 este de 1050mm. Daca se scade din aceasta lungimea activa a fierului, care este in cazul acesta de 750mm, mai raman cate 150mm de fiecare parte pentru capetele de bobina. Diametrul exterior al miezului feromagnetic statoric este de 410mm iar impreuna cu grosimea carcasei da 430mm. Daca scadem aceasta valoare din diametrul rotii de 686mm si impartim cu doi obtinem distanta pana la calea de rulare de 128mm, ceea ce corespunde normelor care prevad ca garda la sol sa fie 125mm (A.3).

Avantajul acestei solutii este ca se folosesc rulmentii deja existenti in cutiile de unsoare asa ca se evita introducerea altor lagare cu rulmenti pe osie, rulmentii fiind elemente care se uzeaza iar inlocuirea lor ar fi dificila pentru ca ar trebuii scoase si cutiile de unsoare ai caror rulmenti sunt presati pe osie. Problema care trebuie rezolvata este prinderea carcasei de cutiile de unsoare.

Racirea masinii se va face axial fiind prevazute in acest scop canale de ventilatie rotunde, atat in miezul statoric cat si in cel rotoric. Aerul cald scos din interiorul masinii poate fi folosit pe timpul sezonului rece pentru incalzirea compartimentului pentru calatori . In acest scop trebuie realizat un sistem de tevi cu filtre speciale care sa filtreze aerul cald de toate impuritatile.

5.2. SISTEMUL DE ACTIONARE PENTRU VARIANTA MIAD8

In cazul acesta se va pastra discul de franare de pe osie asa ca nu va fi nevoie sa se recurga la modificari la sistemul de franare (Fig.5.2).

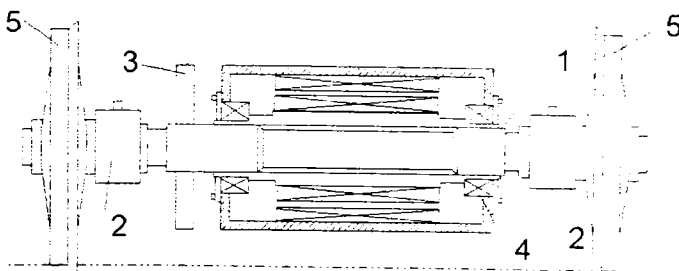


Fig.5.2

1. Osie
2. Cutie de unsoare cu lagar osie
3. Disc frana
4. Lagar aditional
5. Roata elastica

Daca din distanta dintre cutiile de unsoare scadem latimea discului frana si distanta necesara pentru manevrarea clestelor de franare ne mai ramane la dispozitie 654mm pentru masina de tractiune. Lungimea pachetului de tole am stabilit-o la 440mm, tinand cont de grosimea carcasi 10mm si admitand pentru capetele de bobina 80mm de o parte, respectiv 90mm de cealalta, ramanand cate 10mm de la capetele de bobina pana la carcasa. Diametrul exterior l-am fixat la 400mm pentru a avea mai mult spatiu pentru fixarea statorului in interiorul carcasi (A.4).

Pentru sprijinirea carcasi pe osie in cazul acesta este necesara introducerea unor lagare aditionale cu rulmenti in suportii statorului. Totusi viteza de rotatie mica face ca rulmentii sa nu fie foarte solicitati.

Racirea masinii se va face axial; principiul fiind acelasi ca si in cazul precedent.

5.3. CARACTERISTICILE DE REGLARE ALE MOTORULUI DE INDUCTIE PENTRU ACTIONARE DIRECTA

In literatura de specialitate [21,39] se recomanda ca modificarea frecventei in timpul reglării vitezei de rotatie sa se faca in asa fel ca raportul U/f sa se mentina constant. In (Fig.5.3) sunt reprezentate caracteristicile cuplului ale motorului MIAD3 la frecventele $f=4,5,6, \dots, 25$ Hz.

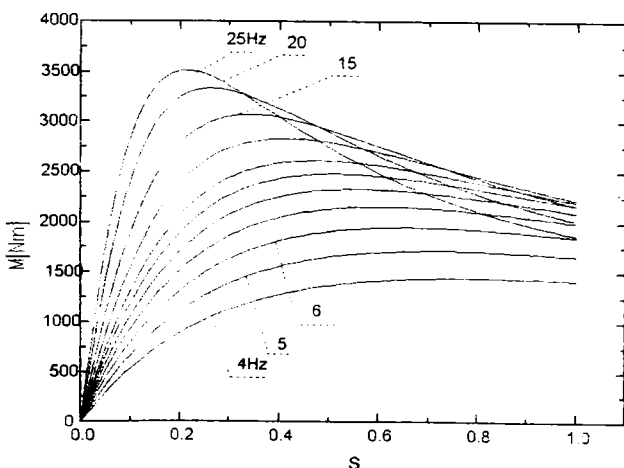


Fig.5.3

Dupa cum se vede cuplul critic scade sensibil cu micșorarea frecventei. Pentru a mentine cuplul critic la aceeași valoare am recurs la mărirea tensiunii.

Cu Δu am reprezentat diferenta dintre tensiunea marita a motorului cu care se asigura $M_k = \text{const.}$ (U_{kf}) si valoarea tensiunii care asigura $U/f = \text{const.}$ (U_f) raportata la U_f .

$$\Delta u = \frac{U_{kf} - U_f}{U_f} \quad (5.1)$$

MIAD3

In (Tabelul 5.1) sunt date tensiunea U_{kf} , diferenta de tensiune Δu , curentul I_1 , factorul de saturatie k_s , factorul de putere $\cos\varphi$ si randamentul η pentru motorul MIAD3.

f[Hz]	U_{kf} [V]	Δu	I_1 [A]	k_s	$\cos\varphi$	η
4	36.91	0.63	221.72	1.206	0.407	0.481
5	42.04	0.486	174.37	0.843	0.451	0.62
6	47.22	0.39	153.08	0.637	0.498	0.694
7	52.43	0.32	141.42	0.51	0.539	0.743
8	57.66	0.27	134.62	0.426	0.571	0.775
9	62.93	0.235	130.38	0.368	0.595	0.798
10	68.21	0.205	127.58	0.326	0.615	0.816
12	78.83	0.16	124.4	0.27	0.643	0.842
15	94.8	0.117	122.16	0.225	0.669	0.867
20	121.94	0.07	120.78	0.185	0.694	0.893
25	148.38	0.052	120.24	0.166	0.707	0.908

Tabelul 5.1

Marimile din tabel se pot reprezenta si grafic

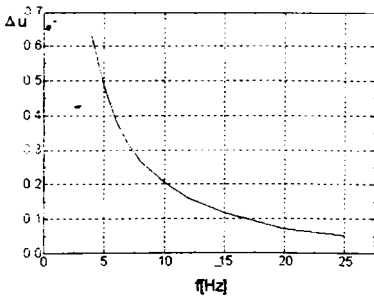


Fig.5.4

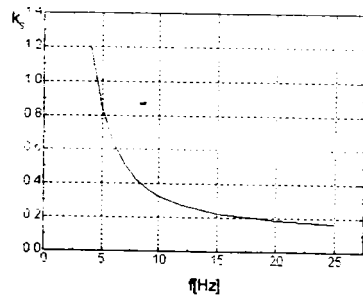


Fig.5.5

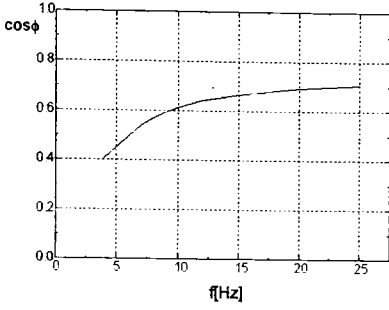


Fig.5.6

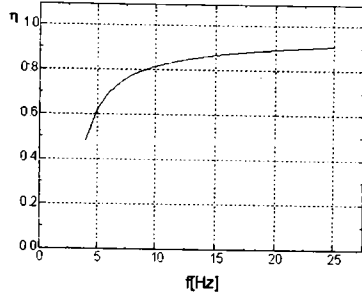


Fig.5.7

Caracteristicile de reglare $M=f(s)$, $M=f(n)$ si $I_1=f(s)$ ale motorului MIAD3 pentru frecventele $f=4,5,6,7,8,9,10,12,15,20,25$ Hz :

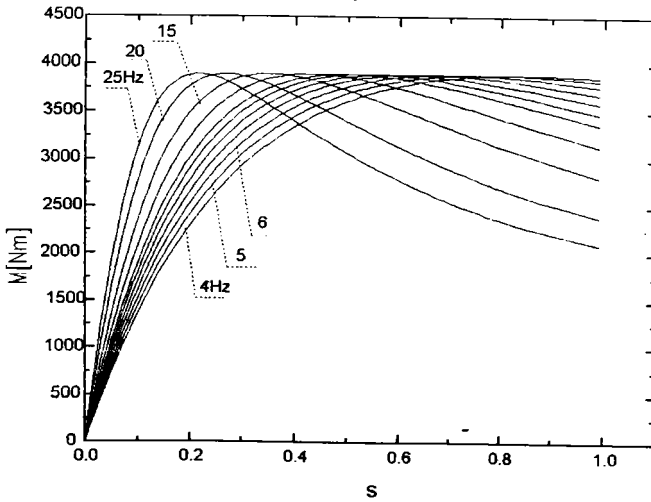


Fig.5.8

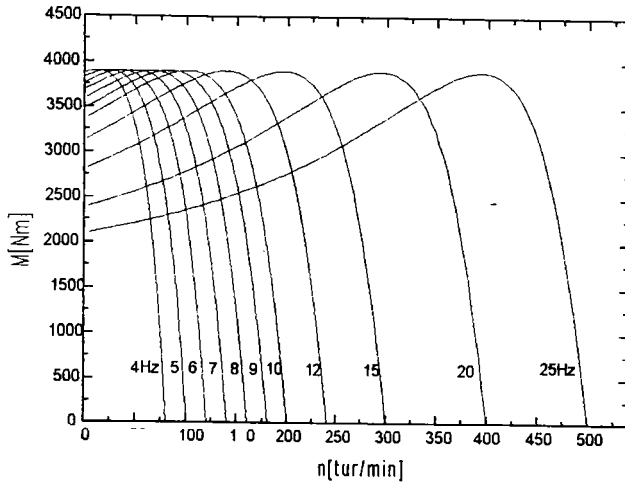


Fig.5.9

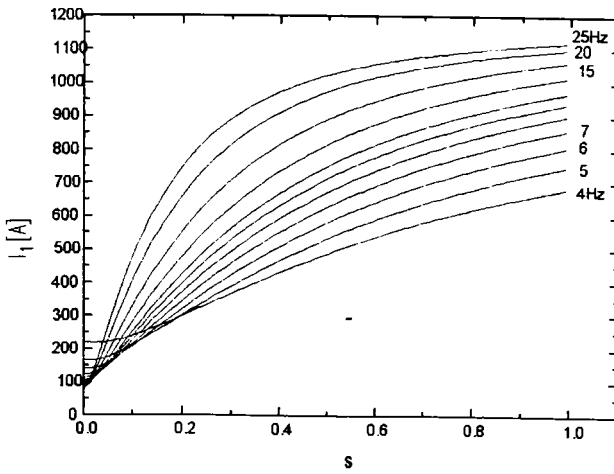


Fig.5.10

MIAD8

În (Tabelul 5.2) sunt date valorile U_{kr} , Δu , I_1 , k_s , $\cos\varphi$ și η în funcție de frecvență, care în cazul motorului MIAD8 ia valori în intervalul (4÷35)Hz.

f [Hz]	U_{kr} [V]	Δu	I_1 [A]	k_s	$\cos\varphi$	η
4	42.1	0.57	111.21	0.979	0.678	0.451
5	47.98	0.43	101.17	0.713	0.71	0.54
6	54.1	0.346	97.43	0.569	0.732	0.597
7	60.2	0.284	95.98	0.477	0.746	0.637
8	66.48	0.24	95.47	0.419	0.754	0.669
9	72.68	0.204	95.38	0.372	0.761	0.695
10	78.9	0.178	95.45	0.341	0.764	0.717
12	91.56	0.139	95.78	0.299	0.767	0.752
15	110.5	0.1	96.37	0.26	0.769	0.789
20	142.45	0.064	97.08	0.228	0.769	0.831
25	174.2	0.04	97.67	0.209	0.768	0.858
30	206.2	0.026	98.05	0.198	0.767	0.877
35	238.5	0.017	98.27	0.192	0.765	0.891

Tabelul 5.2

Marimile din tabel se pot reprezenta și grafic:

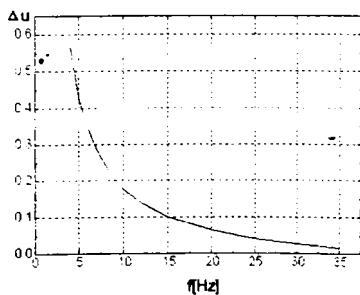


Fig.5.11

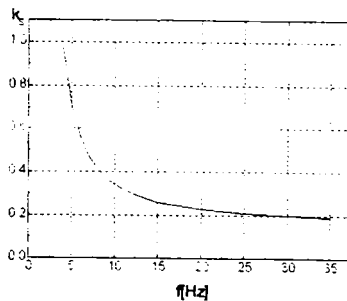


Fig.5.12

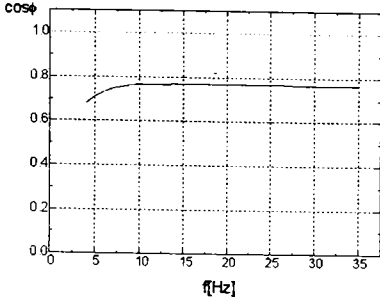


Fig.5.13

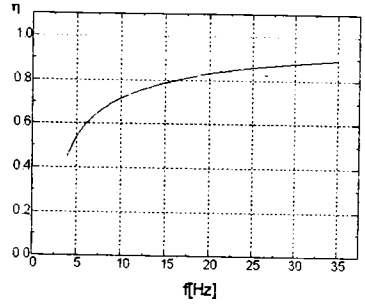


Fig.5.14

Caracteristicile de reglare $M=f(s)$, $M=f(n)$ si $I_1=f(s)$ ale masinii MLAD8:

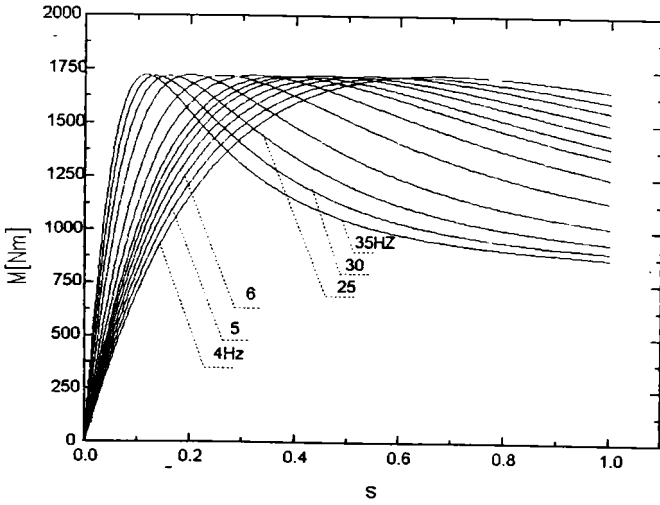


Fig.5.15

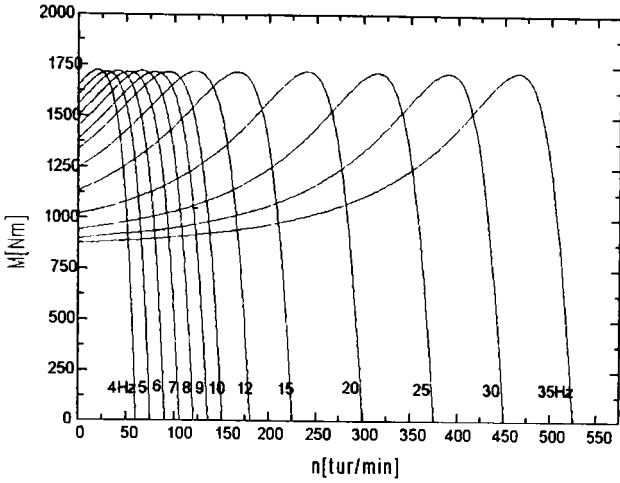


Fig.5.16

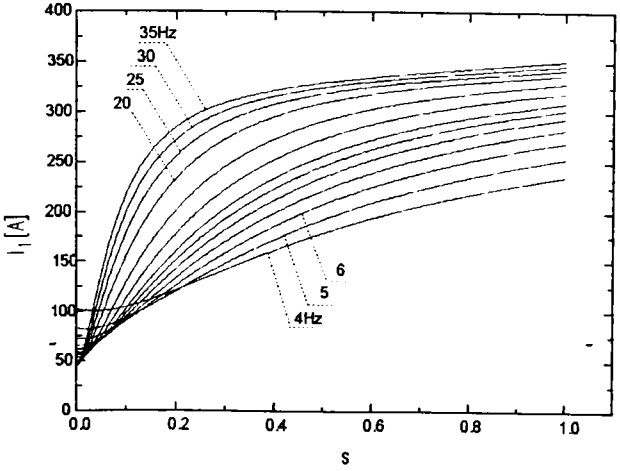


Fig.5.17

5.4 DIAGrameLE DE MERS ALE TRAMVAIULUI

La alegerea motoarelor de tractiune pentru un VEM pe langa caracteristicile mecanice ale motorului un rol hotarator il au si cerintele de mers impuse vehiculului, reprezentate de diagramele de mers [18,32].

In cele ce urmeaza se urmareste, obtinerea diagramelor de mers ale tramvaielor echipate cu motoare MIAD3 si MIAD8 in cazurile: franare numai electrica, prin recuperare si franare mixta, electrica prin recuperare si mecanica si calculul vitezei de exploatare in ambele cazuri.

Pentru construirea diagramelor de mers trebuie cunoscute valorile fortelor care actioneaza asupra vehiculului in diversele regimuri ale miscarii sale utile: forta de tractiune F_t , forta de franare F_f si forta de rezistenta totala la inaintare F_r .

Pierderile de energie la franare rezulta din diferenta dintre energia cinetica a unitatii de transport din momentul inceperii franarii si lucrul mecanic al fortelor de rezistenta ce actioneaza asupra acesteia [40]:

$$W = \frac{m_t}{2} v_f^2 - F_r m_t s \quad (5.2)$$

In care m_t este masa unitatii de transport, s spatiul de franare, v_f viteza de la care incepe franarea iar F_r rezistentele specifice la inaintare.

La franarea prin recuperare se inapoiaza in retea energia electrica $W \eta_{tr}$ in care η_{tr} este randamentul vehiculului in regim de franare si are valori in jur de 0.7.

5.4.1. DIAGrameLE DE MERS ALE TRAMVAIULUI ECHIPAT CU MOTOARE MIAD3

Datele caracteristice ale motorului MIAD3 sunt:

$$P_n = 70 \text{ kW}, p=3, f=50 \text{ Hz}, M_n = 685 \text{ Nm}, M_k = 3902.1 \text{ Nm}, \cos \varphi = 0.73, \eta = 0.937$$

Prin modificarea frecventei in limitele (0 - 25Hz) se obtine variatia vitezei de deplasare in limitele (0 - 65km/h).

Forta de tractiune $F_t = 45 \text{ kN}$ si forta rezistentelor la mers $F_r = 10.4 \text{ daN/t}$ au fost calculate in (paragraful 4.4).

Am admis ca viteza de regim a tramvaiului este obtinuta la 18Hz si are valoarea de 46.6km/h sau 12.9m/s.

Introducand in ecuatia (4.5) valorile pentru F_t si F_r , putem calcula acceleratia tramvaiului si declivitatea pe care poate sa o depaseasca la mersul in rampa. In (Tabelul 5.3) sunt date valorile calculate ale acceleratiei la mers in palier ($i=0$) si declivitatea la o viteza oarecare considerand ca

faza de accelerare s-a terminat ($a_s=0$), in functie de raportul dintre masa calatorilor m_c si masa calatorilor in caz ca tramvaiul este maxim incarcat m_p .

m_c/m_p	i [%o]	a_s [m/s ²]
0	115.3	1.0
0.25	96.9	0.84
0.5	83.3	0.72
0.75	72.7	0.63
1	64.2	0.56

Tabelul 5.3.

Marimile din tabel le putem reprezenta si grafic:

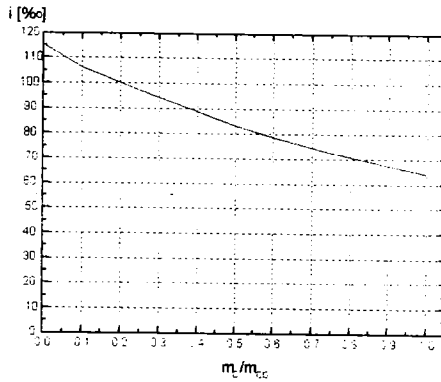


Fig.5.18

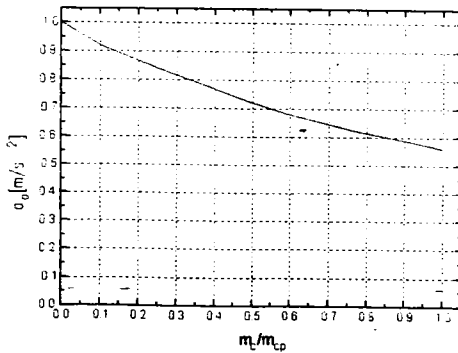


Fig.5.19

In cele ce urmeaza vor fi reprezentate, in mod simplu cu ajutorul valorilor medii, diagramele de mers ale tramvaiului echipat cu motoare MIAD3, pentru o distanta medie de 300m intre doua statii, in cateva cazuri caracteristice, tramvai gol, tramvai incarcat 50% si tramvai maxim incarcat, cu franare numai electrica, prin recuperare si franare mixta, electrica prin recuperare si mecanica.

Pentru a impune tramvaiului maxim incarcat o deceleratie de 1.2 m/s^2 , ca si la tramvaiul Timis-2, este nevoie ca pe langa frana electrica $F_e=45\text{kN}$ sa actioneze si frana mecanica cu forta $F_{fm}=32\text{kN}$.

I. Tramvai gol si franare electrica cu recuperare

Acceleratia tramvaiului este $a_a=1\text{m/s}^2$ iar deceleratia in cazul in care se utilizeaza numai frana electrica este $a_d=1.18\text{m/s}^2$.

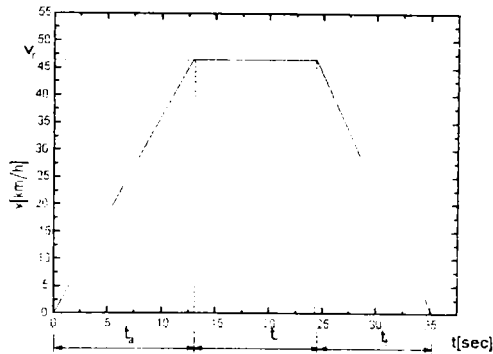


Fig.5.20

Tramvaiul parcurge distanta de 300m in $t=35.2\text{sec.}$, din care fazei de accelerare ii revine $t_a=12.9\text{sec.}$, fazei de mers cu viteza de regim $t_r=11.4$, si fazei de franare $t_f=10.9\text{sec.}$

Energia obtinuta in regimul de franare este $W=2.72\text{MJ}$

Din aceasta energie se inapoiaza in retea $W_r=1.9\text{MJ}$

II. Tramvai gol si franare mixta

Deceleratia in cazul in care frana mecanica actioneaza cu aceeasi intensitate ca si la tramvaiul maxim incarcat este $a_d=1.96\text{m/s}^2$.

Tramvaiul parcurge distanta de 300m in $t=33\text{sec.}$, din care fazei de accelerare ii revine $t_a=12.9\text{sec.}$, fazei de mers cu viteza de regim $t_r=13.5\text{sec.}$ si fazei de franare $t_f=6.6\text{sec.}$

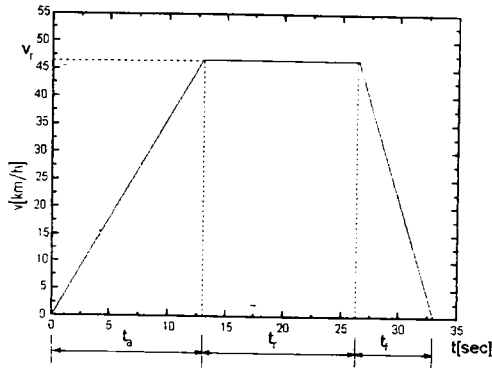


Fig.5.21

Energia obtinuta in regimul de franare este $W=1.46\text{MJ}$

Din aceasta energie se inapoiaza in retea $W_r = 1.02\text{MJ}$

Raportul dintre energia recuperata la franarea numai electrica cu recuperare si energia recuperata la franarea mixta este $n=1.86$.

III. Tramvai 50% incarcat si franare electrica prin recuperare

Acceleratia tramvaiului este $a_a=0.72\text{m/s}^2$ iar deceleratia in cazul in care se utilizeaza numai frana electrica este $a_d=0.9\text{m/s}^2$.

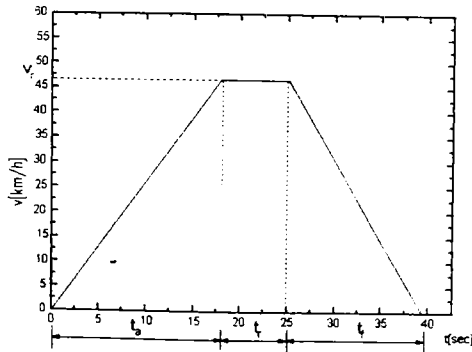


Fig.5.22

Distanța de 300m este parcursa în $t=39.3\text{sec}$. din care fazei de accelerare îi revine $t_a=17.9\text{sec}$., fazei de mers cu viteza de regim $t_r=7.2\text{sec}$. iar fazei de franare $t_f=14.3\text{sec}$.

Energia obtinuta in regimul de franare este $W=3.54\text{MJ}$

Din aceasta energie se inapoiaza in retea $W_r = 2.48\text{MJ}$

IV. Tramvai 50% incarcat si franare mixta

Daca frana mecanica actioneaza cu aceasi forta ca si la tramvaiul maxim incarcat vom obtine o deceleratie de 1.48m/s^2 .

Distanta de 300m este parcursa in $t=36.5\text{sec}$. din care fazei de accelerare ii revine $t_a=17.9\text{sec}$., fazei de mers cu viteza de regim $t_r=9.9\text{sec}$. iar fazei de franare $t_f=8.7\text{sec}$.

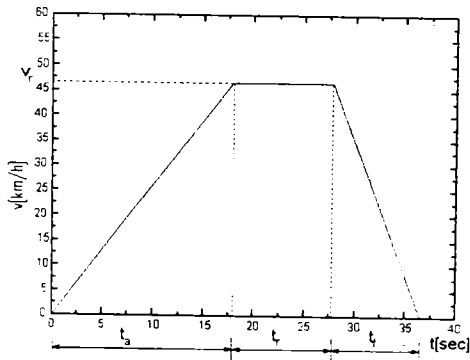


Fig.5.23

Energia obtinuta in regimul de franare este $W=1.92\text{MJ}$

Din aceasta energie se inapoiaza in retea $W_r= 1.34\text{MJ}$

Raportul dintre energia recuperata la franarea numai cu recuperare si energia recuperata la franarea mixta este $n=1.85$

V. Tramvai maxim incarcat si franare electrica prin recuperare

Acceleratia tramvaiului este $a_a=0.56\text{m/s}^2$ iar deceleratia in cazul in care se utilizeaza numai frana electrica este $a_d=0.74\text{m/s}^2$.

Distanta de 300m este parcursa in $t=43.5\text{sec}$. din care fazei de accelerare ii revine $t_a=23\text{sec}$., fazei de mers cu viteza de regim $t_r=3.1\text{sec}$. iar fazei de franare $t_f=17.4\text{sec}$.

Energia obtinuta in regimul de franare este $W=4.31\text{MJ}$

Din aceasta energie se inapoiaza in retea $W_r= 3.02\text{MJ}$

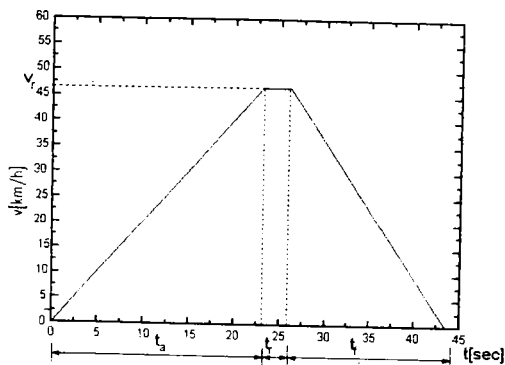


Fig.5.24

VI. Tramvai maxim incarcat franare mixta

Acceleratia tramvaiului este $a_a=0.56\text{m/s}^2$ iar deceleratia, in cazul in care se utilizeaza si frana mecanica, este identica cu cea de la tramvaiul Timis-2, $a_d=1.2\text{m/s}^2$.

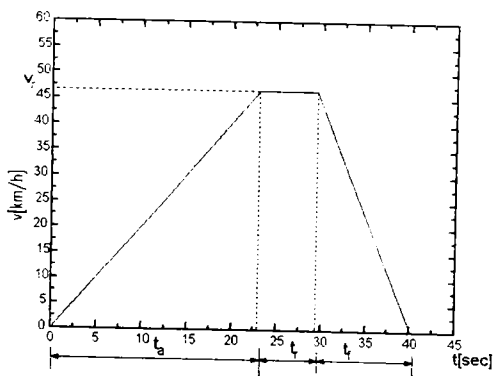


Fig.5.25

Tramvaiul parcurge distanta de 300m in $t=40.2\text{sec}$. din care fazei de accelerare ii revine $t_a=23\text{sec}$. , fazei de mers cu viteza de regim $t_r=6.4\text{sec}$. si fazei de franare $t_f=10.8\text{sec}$. .

Energia obtinuta in regimul de franare este $W=2.35\text{MJ}$

Din aceasta energie se inapoiaza in retea $W_r=1.65\text{MJ}$

Raportul dintre energia recuperata la franarea numai electrica cu recuperare si energia recuperata la franarea mixta este $n=1.83$.

5.4.2. DIAGrameLE DE MERS ALE TRAMVAIULUI ECHIPAT CU MOTOARE MIAD8

Datele caracteristice ale motorului MIAD8 sunt:

$$P_n=70\text{kW}, p=4, f=50, M_n=915\text{Nm}, M_k=1726\text{Nm}, \cos\varphi=0.76, \eta=0.917$$

Modificarea frecvenței în limitele (0 - 35Hz) conduce la obținerea vitezei de deplasare în limitele (0 - 67km/h).

Am admis ca viteza de regim a tramvaiului este obținută la frecvența de 23Hz și are valoarea de 44.6km/h sau 12.4m/s .

Forța de tracțiune și accelerația tramvaiului MIAD3 maxim încațcat, $F_t=20\text{kN}$ și $a_p=0.2\text{m/s}^2$ au fost calculate în (paragraful 4.4) .

În cazul acesta pentru a atinge viteza de regim este nevoie de $t_p=62\text{sec}$ ceea ce înseamnă ca tramvaiul ar trebui să parcurgă cu viteza medie $v_p/2$ distanța de 384m.

Concluzia este că în timp ce cu varianta MIAD3 se obțin rezultate satisfăcătoare, cu varianta MIAD8 nu se poate atinge viteza de regim admisă pe o distanță de 300m.

Soluția ar fi să se mărească numărul motoarelor de tracțiune sau să se mărească tensiunea motoarelor la pornire.

Din cele două soluții amintite prima ar duce la transformarea vagonului remorca în vagon motor și prin urmare la sporirea costurilor de fabricație. Rămâne soluția a doua, mărirea tensiunii, care trebuie făcută în așa fel încât să nu pună în pericol funcționarea mașinii.

În (Tabelul 5.4.) sunt date câteva mărimi caracteristice ale mașinii MIAD8 la diferite tensiuni, începând de la tensiunea nominală $U_n=335\text{V}$ și până la $U=420\text{V}$, în scopul alegerii tensiunii optime cu care să se facă accelerația tramvaiului.

$U_i[\text{V}]$	$I_i[\text{A}]$	$M_k[\text{Nm}]$	k_t	$\cos\varphi$	η
335	98.78	1726	0.18	0.762	0.917
350	96.44	1911	0.23	0.75	0.919
360	95.44	2041	0.275	0.733	0.92
370	94.83	2272	0.32	0.718	0.921
380	94.62	2320	0.367	0.701	0.922
390	94.76	2576	0.416	0.683	0.922
400	95.25	2621	0.468	0.663	0.921
410	96.18	2905	0.525	0.641	0.92
420	97.54	2948	0.586	0.619	0.92

Tabelul 5.4

Am admis ca pornirea se va face la 400V care este cea mai mica valoare cu care se poate atinge viteza de regim 12.4m/s ($v_r=44.6\text{km/h}$) la tramvaiul maxim incarcat pe distanta de 300m. Din (Tabelul 5.4) se poate vedea ca cuplul critic al motorului, cu care se face pornirea tramvaiului, are valoarea $M_k=2620\text{Nm}$. Forta de tractiune a tramvaiului obtinuta cu acest cuplu de la patru motoare de tractiune este $F_t=30\text{kN}$.

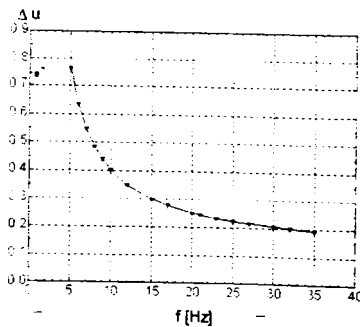
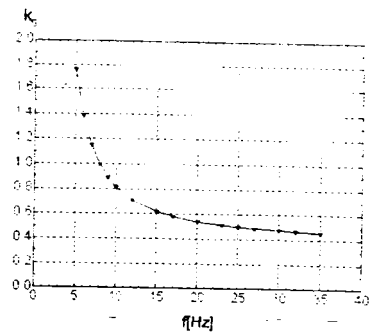
Pentru a mentine cuplul critic la valoarea necesara $M_k=2620\text{Nm}$ si la frecvente mici, trebuie din nou sa se recurga la marirea tensiunii asa ca marimile din (Tabelul 5.2) vor primi alte valori.

Valorile marimilor care corespund noii situatii sunt date in (Tabelul 5.5).

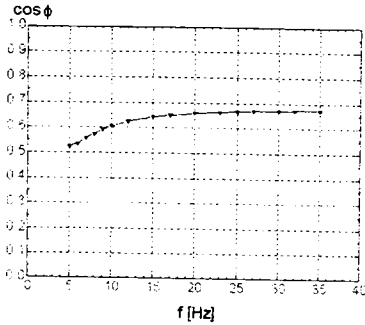
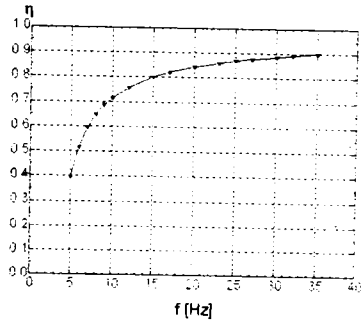
$f[\text{Hz}]$	$U_{Ld}[\text{V}]$	Δu	$I_1[\text{A}]$	k_c	$\cos\varphi$	η
5	59.25	0.77	161.23	1.77	0.525	0.397
6	65.76	0.64	134.05	1.39	0.535	0.516
7	72.62	0.55	120.24	1.15	0.556	0.594
8	79.67	0.49	112.52	1.0	0.575	0.647
9	86.81	0.44	107.89	0.89	0.592	0.686
10	94.02	0.4	104.77	0.81	0.605	0.715
12	108.6	0.35	101.09	0.71	0.625	0.758
15	130.8	0.3	98.42	0.62	0.642	0.8
20	167.8	0.25	96.55	0.54	0.658	0.843
25	205.12	0.22	95.76	0.5	0.666	0.869
30	242.58	0.21	95.37	0.48	0.67	0.886
35	280.1	0.19	95.14	0.46	0.673	0.9

Tabelul 5.5

In continuare sunt reprezentate grafic cateva din marimile caracteristice date in tabel:

Fig.5.26. Dependenta $\Delta u=f(f)$ Fig.5.27. Dependenta $k_c=f(f)$

Se poate vedea din (Fig.5.26.) ca la pornirea de la 5Hz tensiunea trebuie marita cu aproximativ 80% peste valoarea cu care U/f se mentine constant. In consecinta factorul de saturatie are o valoare foarte mare $k_s=1.8$ (Fig.5.27) cea ce insemna ca masina este puternic saturata la pornire. Marind frecventa, Δu se micsoareaza iar k_s primeste valori normale.

Fig.5.28. Dependenta $\cos\phi=f(f)$ Fig.5.29. Dependenta $\eta=f(f)$

Din (Fig. 5.28) si (Fig.5.29) se poate vedea ca factorul de putere si randamentul au valori foarte mici la frecvente scazute. Aceste marimi primesc valori normale pentru o masina de inductie in jurul frecventei de 30Hz cu care se obtin viteze de rulare apropiate de viteza maxima.

Pentru a avea mai multe date despre comportarea masinii la frecvente mici am reprezentat si inductiile magnetice (Tabelul 5.6): inductia magnetica din intrefier (BDE), inductia magnetica din jugul statoric (BJ1), inductia magnetica de la radacina dintelui statoric (BEZ1H) si inductia magnetica de la radacina dintelui rotorului (BEZ2H).

f[Hz]	BDE[T]	BJ1[T]	BEZ1H[T]	BEZ2H[T]
5	0.931	1.852	1.914	2.274
6	0.901	1.722	1.83	2.212
7	0.879	1.632	1.773	2.163
8	0.861	1.566	1.732	2.127
9	0.848	1.516	1.70	2.098
10	0.838	1.477	1.675	2.076
12	0.823	1.422	1.639	2.044
15	0.809	1.37	1.603	2.013
20	0.796	1.32	1.568	1.983
25	0.788	1.292	1.548	1.966
30	0.783	1.275	1.535	1.954
35	0.779	1.262	1.526	1.947

Tabelul 5.6

Marimile din tabel se pot reprezenta si grafic:

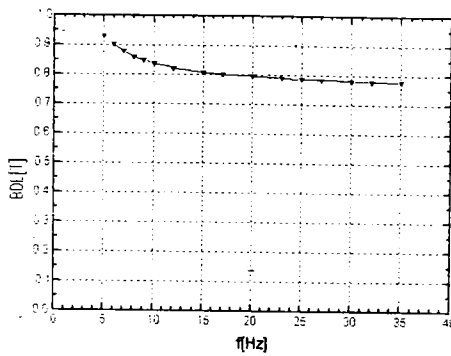


Fig.5.30. Dependenta BDE=f(f)

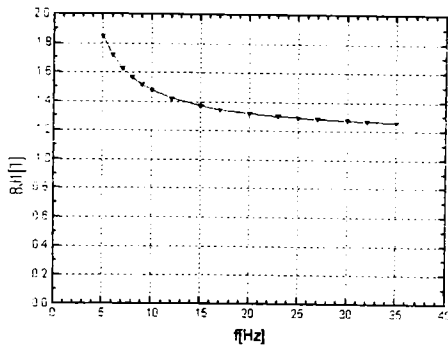


Fig.5.31. Dependenta BJ1=f(f)

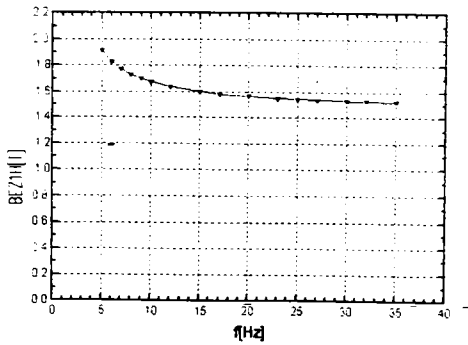
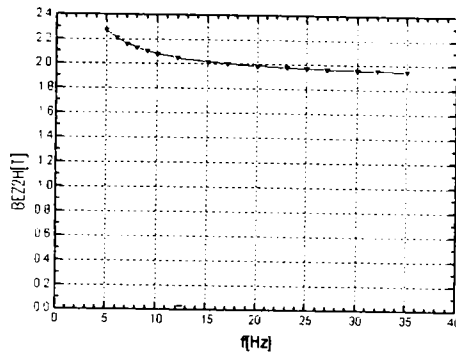


Fig.5.32. Dependenta BEZ1H=f(f)

Fig.5.33. Dependenta $BEZ2H=f(f)$

Analizand curbele de mai sus se poate vedea ca in zona frecventelor mici (sub 8Hz) inductiile magnetice primesc valori mari si in consecinta masina este puternic solicitata magnetic. Pentru o functionare sigura a masinii este necesar sa se evite aceasta zona cu solicitari magnetice intense si prin urmare pornirea trebuie facuta de la frecventa mai mare.

Pentru a determina care este cea mai potrivita frecventa pentru pornirea masinii am reprezentat in (Fig. 5.34) curbele cuplului pentru frecventele $f=8,9,10\text{Hz}$

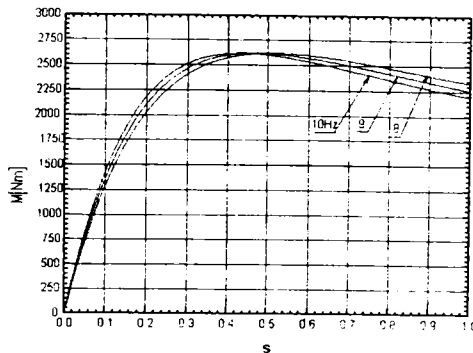


Fig.5.34

Din grafic se poate vedea ca cuplul de pornire nu mai este egal cu cuplul maxim ci este ceva mai mic si scade cu marirea frecventei..

Avand in vedere ca inductiile magnetice nu difera mult pentru aceste frecvente ceea ce este valabil si pentru cuplul de pornire am admis ca pornirea incepe de la 9Hz.

Curbele curentilor pentru frecventele $f=8,9,10\text{Hz}$ sunt date in (Fig.5.35)

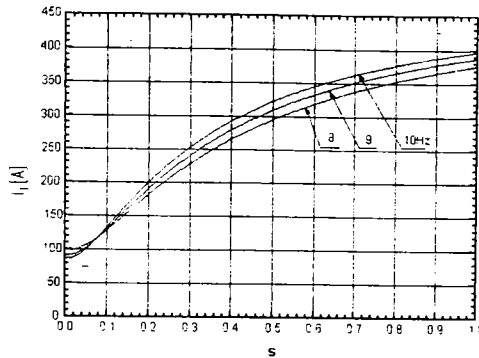


Fig.5.35

Dupa cum se poate vedea din (Fig.5.35) nici curentii la pornire nu difera mult pentru aceste frecvente asa ca si din acest punct de vedere este posibil ca pornirea sa inceapa de la 9Hz.

Avand in vedere cele doua posibilitati prezentate: pornirea de la 5Hz cu masina mai solicitata magnetic dar cu cuplu de pornire mai mare si pornirea de la 9Hz cu masina mai putin solicitata magnetic dar si cu cuplu de pornire mai mic, este interesant sa se vada care sunt consecintele pornirii cu frecventa mai mare asupra performantelor masinii.

In scopul compararii celor doua cazuri (Tabelul 5.7) sunt date valorile calculate ale acceleratiei la mers in palier ($i=0$) si declivitata la o viteza oarecare, pentru ambele cazuri, considerand ca faza de accelerare s-a terminat ($a=0$), in functie de raportul dintre masa calatorilor m_c si masa calatorilor in caz ca tramvaiul este maxim incarcat m_{cp} .

m_c/m_m	pornire de la 5Hz		pornire de la 9Hz	
	i [%o]	a_c [m/s ²]	i [%o]	a_c [m/s ²]
0	73.4	0.64	62.2	- 0.54
0.25	61.2	0.53	51.6	0.45
0.5	52	0.45	43.7	0.38
0.75	45	0.39	37.6	0.33
1	39.4	0.34	32.7	0.28

Tabelul 5.7.

Marimile din tabel in cazul porniri de la 5Hz sunt prezentate grafic in (Fig.5.36) si (Fig.5.37).

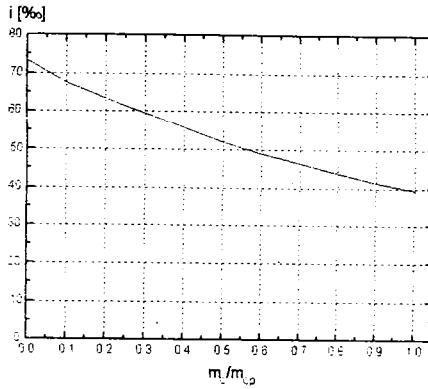


Fig.5.36

Curba din (Fig.5.36) reprezinta declivitatea maxima pe care tramvaiul poate sa o depaseasca la mersul in rampa, in functie de sarcina.

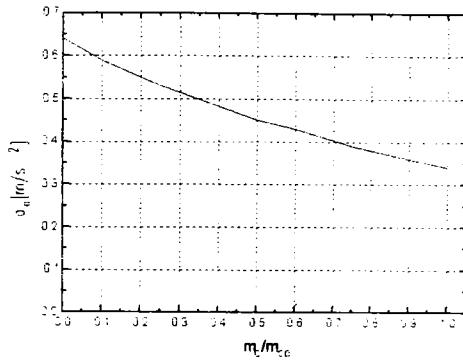


Fig.5.37

Curba din (Fig.5.37) reprezinta acceleratia maxima a tramvaiului in functie de sarcina.

Marimile din tabel in cazul porniri de la 9Hz sunt reprezentate grafic in (Fig.5.38) si (Fig.5.39).

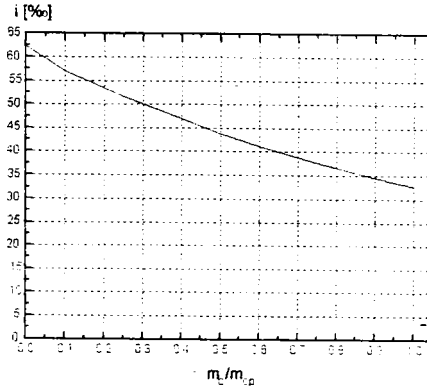


Fig.5.38

Curba din (Fig. 5.38) reprezinta declivitatea maxima pe care tramvaiul poate sa o depaseasca la mersul in rampa, in functie de sarcina.

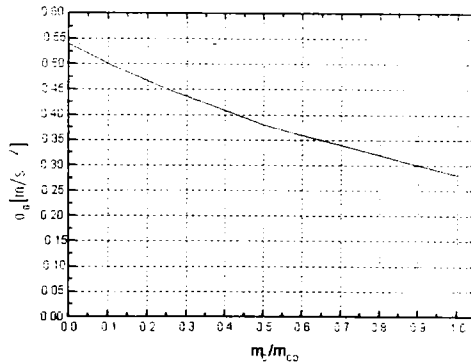


Fig.5.39

Curba din (Fig. 5.39) reprezinta acceleratia maxima a tramvaiului in functie de sarcina.

Din diagramele precedente se poate vedea ca performantele tramvaiului nu se micsoreaza sensibil in cazul in care pornirea se face cu 9Hz.

In continuare se va considera ca pornirea se face de la 9Hz.

Diagramele de mers in cazul pornirii de la 9Hz:

Daca pornirea se face incepand de la 9Hz cuplul de pornire este $M_p=2230\text{Nm}$ iar forta de tractiune dezvoltata de cele patru motoare de tractiune $F_t=26\text{kN}$. Viteza de regim pe care tramvaiul o poate atinge pe distanta de 300m este $v_r=11.3\text{m/s}$, obtinuta la 21Hz.

Pentru a obtine aceeasi deceleratie a tramvaiului maxim incarcat ca si la tramvaiul Timis-2 este necesara o forta mecanica de franare de $F_{fm}=51\text{kN}$ care sa functioneze concomitent cu frana electrica.

I. Tramvai gol si franare electrica cu recuperare

Acceleratia tramvaiului este $a_a=0.54\text{m/s}^2$ iar deceleratia in cazul in care se utilizeaza numai frana electrica este $a_d=0.72\text{m/s}^2$.

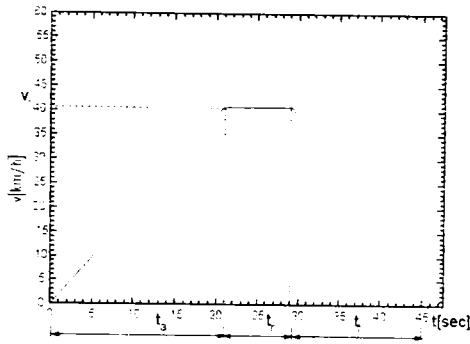


Fig.5.40

Tramvaiul parcurge distanta de 300m in 44.8sec., din care fazei de accelerare ii revine $t_a=20.9\text{sec.}$, fazei de mers cu viteza de regim $t_r=8.2\text{sec.}$ iar fazei de franare $t_f=15.7\text{sec.}$

Energia obtinuta in regimul de franare $W=1.95\text{MJ}$

Din aceasta energie se inapoiaza in retea $W_r=1.37\text{MJ}$

II. Tramvai gol si franare mixta

Acceleratia tramvaiului este $a_a=0.54\text{m/s}^2$ iar deceleratia in cazul in care frana mecanica actioneaza cu aceeasi intensitate ca si la tramvaiul maxim incarcat este $a_d=1.96\text{m/s}^2$.

Tramvaiul parcurge distanta de 300m in 39.9sec., din care fazei de accelerare ii revine $t_a=20.9\text{sec.}$, fazei de mers cu viteza de regim $t_r=13.2\text{sec.}$ iar fazei de franare $t_f=5.8\text{sec.}$

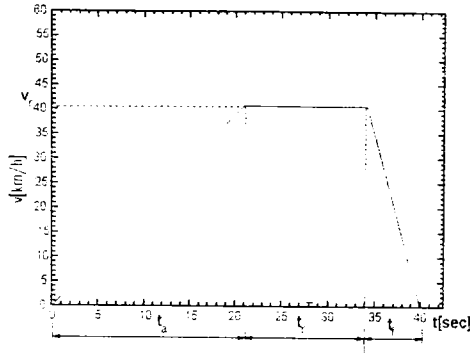


Fig.5.41

Energia obtinuta in regimul de franare $W=0.49MJ$

Din aceasta energie se inapoiaza in retea $W_r=0.34MJ$

Raportul dintre energia recuperata la franarea numai cu recuperare si energia recuperata la franarea mixta $n=4.03$

III. Tramvai 50% incarcat si franare electrica cu recuperare

Acceleratia este $a_a=0.38m/s^2$ iar deceleratia la franare $a_d=0.56m/s^2$

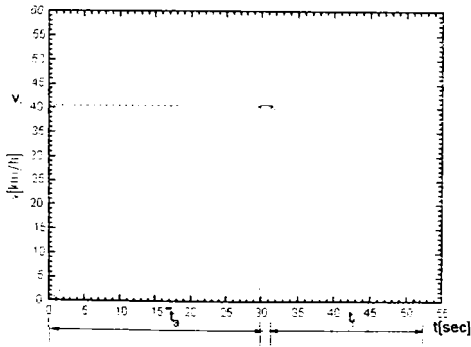


Fig.5.42

Distanta de 300m este parcursa in 51.5sec. din care fazei de accelerare ii revine $t_a=29.7sec.$, fazei de mers cu viteza de regim $t_r=1.6sec.$ si fazei de franare $t_f=20.2sec.$

Energia obtinuta in regimul de franare $W=2.5MJ$

Din aceasta energie se inapoiaza in retea $W_r=1.75MJ$

IV. Tramvai 50% incarcat cu franare mixta

Acceleratia este $a_a=0.38m/s^2$ iar deceleratia la franare $a_d=1.48m/s^2$

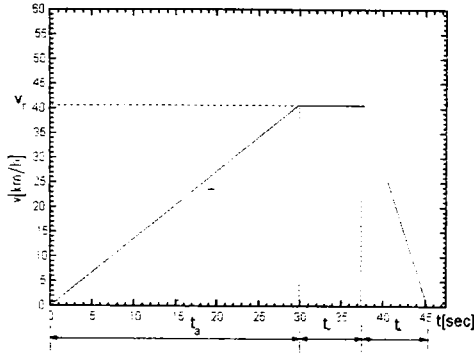


Fig.5.43

Distanța de 300m este parcursă în 45.2sec. din care fazei de accelerare îi revine $t_a=29.7sec.$, fazei de mers cu viteza de regim $t_r=7.9sec.$ și fazei de franare $t_f=7.6sec.$

Energia obținută în regimul de franare $W=0.66MJ$

Din această energie se înapoiază în rețea $W_r=0.46MJ$

Raportul dintre energia recuperată la franarea numai cu recuperare și energia recuperată la franarea mixtă $n=3.8$

V. Tramvai maxim incarcat și franare electrică prin recuperare

Acceleratia în cazul acesta este $a_a=0.28m/s^2$, deceleratia la franare $a_d=0.47m/s^2$ și $v_f=10.2m/s$

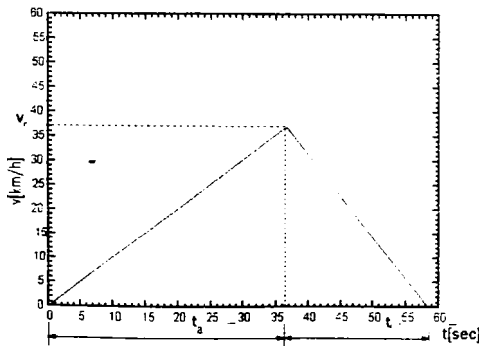


Fig.5.44

Tramvaiul parcurge distanta de 300m in $t=58.4\text{sec.}$. Fazei de accelerare ii revine $t_a=36.4\text{sec.}$ dupa care, in mai putin de 1sec. , se trece in regim de franare care dureaza $t_f=21.7\text{sec.}$

Energia obtinuta in regimul de franare $W=2.44\text{MJ}$

Din aceasta energie se inapoiaza in retea $W_r=1.71\text{MJ}$

VI. Tramvai maxim incarcat si franare mixta

Acceleratia in cazul acesta este $a_a=0.28\text{m/s}^2$ iar deceleratia la franare $a_d=1.2\text{m/s}^2$.

Tramvaiul parcurge distanta de 300m in $t=51.4\text{sec.}$. Fazei de accelerare ii revine $t_a=40.4\text{sec.}$ dupa care, in mai putin de 2sec. , se trece in regim de franare care dureaza $t_f=9.4\text{sec.}$

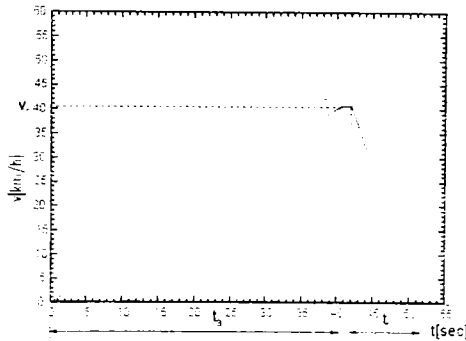


Fig.5.45

Energia obtinuta in regimul de franare $W=0.81\text{MJ}$

Din aceasta energie se inapoiaza in retea $W_r=0.57\text{MJ}$

Raportul dintre energia recuperata la franarea numai cu recuperare si energia recuperata la franarea mixta $n=3$.

5.5.COMPARAREA SOLUTIILOR PROPUSE CU SOLUTIA EXISTENTA IN TIMISOARA

Pentru a calcula viteza de exploatare a tramvaiului echipat cu patru motoare de tip MIAD3 in cele trei cazuri caracteristice, tramvai gol, tramvai 50% incarcat si tramvai maxim incarcat, am ales din retea de tramvai, Linia-1 pe intreg circuitul si am calculat timpii de rulare pentru fiecare interstatie. Rezultatele sunt prezentate in (Tabelul 5.8).

Am luat in considerare cazul in care se foloseste preponderent franarea cu recuperare, frana mecanica folosindu-se doar cand este necesar pentru oprirea definitiva a tramvaiului.

La timpii totali de rulare se adauga timpii de stationare in statii, care sunt in medie de 30" si timpii de oprire la semafoare.

Cu aceste viteze medii de exploatare devin:

- tramvai gol $v_c=6.1\text{m/s}$ sau 22km/h
- tramvai incarcat 50% $v_c=5.7\text{m/s}$ sau 20.5km/h
- tramvai incarcat 100% $v_c=5.4\text{m/s}$ sau 19.4km/h

Din cauza ca trebuie respectat un program de mers stabilit dinainte, tramvaiul in cazul in care nu este maxim incarcat nu va folosii toata capacitatea motoarelor, cand acestea sunt mai solicitate, asa ca se va respecta viteza din regimul 100% incarcat, deci $v_c=19.4\text{km/h}$.

Pentru a calcula viteza de exploatare a tramvaiului echipat cu patru motoare de tip MIAD8 in cele trei cazuri caracteristice, tramvai gol, tramvai 50% incarcat si tramvai maxim incarcat, am procedat ca si in cazul tramvaiului echipat cu motoare MIAD3, deci am calculat timpii de rulare pentru fiecare interstatie pe Linia-1, pe intreg circuitul . Am luat in considerare si aici cazul in care se foloseste preponderent franarea cu recuperare, frana mecanica folosindu-se doar pentru oprirea definitiva a tramvaiului.

Rezultatele sunt prezentate in (Tabelul 5.9).

La timpii totali de rulare se adauga timpii de stationare in statii, care sunt in medie de 30" si timpii de oprire la semafoare.

Cu aceste viteze medii de exploatare devin:

- tramvai gol $v_c=5.3\text{m/s}$ sau 19.1km/h
- tramvai incarcat 50% $v_c=4.9\text{m/s}$ sau 17.6km/h
- tramvai incarcat 100% $v_c=4.5\text{m/s}$ sau 16.2km/h

Se va respecta viteza din regimul 100% incarcat, deci $v_c=16.2\text{km/h}$.

Pentru verificarea rezultatelor calculate s-a facut comparatie cu rezultatele care se obtin cu tramvaiul Timis-2. In acest scop autorul a cronometrat mersul tramvaiului Timis-2, pe traseul ales, la o ora de medie frecventa.

Rezultatele obtinute pe interstatii la rulare sunt date in (Tabelul 5.10) .

Cu aceasta viteza de exploatare devine:

$$v_c=4.1\text{m/s sau } 14.6\text{km/h}$$

Interstatia	Distanța [m]	Timpul de deplasare în sec. pentru m, m ₀		
		0	0.5	1
Gara N. - Casa Studentilor	750	63.8	68.8	74
Casa studentilor - P-ta Kutl	300	35.2	39.3	43.5
P-ta Kutl - P-ta Maria	350	39	43.2	47.3
P-ta Maria - Catedrala	580	52.5	57.5	62.7
Catedrala - P-ta 700	850	70.5	75.5	80.7
P-ta 700 - P-ta Libertatii	300	35.2	39.3	43.5
P-ta Libertatii - Continental	500	47.2	52.1	57.4
Conti - Parcul Copiilor	400	42.9	47.1	51.2
Parcul Copiilor-Parcul Pop.	420	41.8	46.8	52
Parcul Popor. - P-ta Traian	480	45.8	50.8	56
P-ta Traian - Str. Tigrlui	500	47.2	52.1	57.4
Str. Tigrlui - Pod Bega	440	43.2	48.1	53.4
Pod Bega - Modern1	400	42.9	47.1	51.2
Modern1 - Modern2	250	31.3	35.5	39.6
Modern2 - Sp. V. Babes	600	53.8	58.8	64
Sp. V. Babes - UMT1	300	35.2	39.3	43.5
UMT1 - UMT2	250	31.3	35.5	39.6
UMT2 - Club 1 Mai	360	39.8	44	48.1
Club 1 Mai - Gara Est	560	51.2	56.1	61.4
Gara Est - F-ca de ciorapi	260	32.1	36.3	40.5
F-ca ciorapi - P-ta B.Cartan	250	31.3	35.5	39.6
P-ta B.Cartan - P-ta Traian	550	50.5	55.5	60.7
P-ta Traian - Parcul Pop.	480	45.8	50.8	56
Parcul Pop. - Parcul Copiilor	420	41.8	46.8	52
Parcul Copiilor - Continental	400	42.9	47.1	51.2
Continental - P-ta Libertatii	500	47.2	52.1	57.4
P-ta Libertatii - P-ta 700	300	35.2	39.3	43.5
P-ta 700 -Catedrala	850	70.5	75.5	80.7
Catedrala - P-ta Maria	580	52.5	57.5	62.7
P-ta Maria - P-ta Kutl	350	39	43.2	47.3
P-ta Kutl - Casa Studentilor	300	35.2	39.3	43.5
Casa Studentilor- Gara Nord	750	63.8	68.8	74
Total	14580	1437.6	1584.6	1735.6

Tabelul 5.8

Teza de doctorat

Interstatia	Distanța [m]	Timpul de deplasare în sec. pentru m _c , m _m		
		0	0,5	1
Gara N. - Casa Studentilor	750	74.3	83.1	92.7
Casa studentilor - P-ta Kutl	300	44.8	51.5	58.4
P-ta Kutl - P-ta Maria	350	49.3	55.9	63.3
P-ta Maria - Catedrala	580	63	71.8	81.7
Catedrala - P-ta 700	850	81	89.8	99.4
P-ta 700 - P-ta Libertatii	300	44.8	51.5	58.4
P-ta Libertatii - Continental	500	57.6	66.5	75.5
Conti - Parcul Copiilor	400	53.7	60.8	67.6
Parcul Copiilor-Parcul Pop.	420	55.5	62.1	69.4
Parcul Popor. - P-ta Traian	480	60.8	67.4	74.7
P-ta Traian - Str. Tigrlui	500	57.6	66.5	75.5
Str. Tigrlui - Pod Bega	440	57.2	63.9	71.1
Pod Bega - Modern1	400	53.7	60.8	67.6
Modern1 - Modern2	250	40.4	47	53.4
Modern2 - Sp. V. Babes	600	64.3	73.1	83.3
Sp. V. Babes - UMT1	300	44.8	51.5	58.4
UMT1 - UMT2	250	40.4	47	53.4
UMT2 - Club 1 Mai	360	50.2	56.8	64.1
Club 1 Mai - Gara Est	560	61.6	70.5	80.2
Gara Est - F-ca de ciorapi	260	41.3	48	54.5
F-ca ciorapi - P-ta B.Cartan	250	40.4	47	53.4
P-ta B.Cartan - P-ta Traian	550	61	69.8	79.4
P-ta Traian - Parcul Pop.	480	60.8	67.4	74.7
Parcul Pop.- Parcul Copiilor	420	55.5	62.1	69.4
Parcul Copiilor - Continental	400	53.7	60.8	67.6
Continental - P-ta Libertatii	500	57.6	66.5	75.5
P-ta Libertatii - P-ta 700	300	44.8	51.5	58.4
P-ta 700 - Catedrala	850	81-	89.8	99.4
Catedrala - P-ta Maria	580	63	71.8	81.7
P-ta Maria - P-ta Kutl	350	49.3	55.9	63.3
P-ta Kutl - Casa Studentilor	300	44.8	51.5	58.4
Casa Studentilor- Gara Nord	750	74.3	83.1	92.7
Total	14580	1782.5	2022.7	2276.5

Tabelul 5.9

Interstatia	Distanta	Timp mers	Timp stationare
	[m]	[sec]	[sec.]
Gara N. - Casa Studentilor	750	120	30
Casa studentilor - P-ta Kutl	300	60	40
P-ta Kutl - P-ta Maria	350	90	25
P-ta Maria - Catedrala	580	65	20
Catedrala - P-ta 700	850	160	15
P-ta 700 - P-ta Libertatii	300	110	25
P-ta Libertatii - Continental	500	75	50
Conti - Parcul Copiilor	400	70	15
Parcul Copiilor-Parcul Pop.	420	60	15
Parcul Popor. - P-ta Traian	480	70	30
P-ta Traian - Str. Tigrulei	500	50	20
Str. Tigrulei - Pod Bega	440	55	20
Pod Bega - Modern1	400	50	10
Modern1 - Modern2	250	45	40
Modern2 - Sp. V. Babes	600	75	20
Sp. V. Babes - UMT1	300	70	25
UMT1 - UMT2	250	45	45
UMT2 - Club1Mai	360	55	15
Club1Mai - Gara Est	560	80	30
Gara Est - F-ca de ciorapi	260	60	10
F-ca ciorapi - P-ta B.Cartan	250	30	35
P-ta B.Cartan - P-ta Traian	550	130	40
P-ta Traian - Parcul Popor.	480	85	40
Parcul Pop. - Parcul Copiilor	420	70	35
Parcul Copiilor - Continental	400	85	35
Continental - P-ta Libertatii	500	85	50
P-ta Libertatii - P-ta 700	300	110	40
P-ta 700 - Catedrala	850	170	35
Catedrala - P-ta Maria	580	80	35
P-ta Maria - P-ta Kutl	350	100	30
P-ta Kutl - Casa Studentilor	300	80	60
Casa Studentilor- Gara Nord	750	125	50
Total	14580	2615	985

Tabelul 5.10

5.5 CONCLUZII

Din analiza datelor obtinute experimental pentru tramvaiul Timis-2 prezentate in (Tabelul 5.10) se poate constata o concordanta relativ buna a acestora cu rezultatele obtinute prin calcul pentru tramvaiul propulsat cu motoare MIAD3 (Tabelul5.8) si MIAD8 (Tabelul5.9).

Se poate constata ca motoarele pentru actionare directa calculate pot face fata traficului urban iar franarea cu recuperare poate fi utilizata pana la oprirea tramvaiului, o parte din energie putand fi returnata in retea, in timp ce frana mecanica s-ar utiliza numai in caz de necesitate pentru oprirea definitiva a tamvaiului.

6. CONCLUZII GENERALE

Tractiunea electrica fara angrenaje reprezinta o solutie de viitor care poate mari fiabilitatea sistemelor de tractiune. Ca si orice solutie noua ea prezinta si avantaje si dezavantaje.

Lucrarea de fata studiaza masina de inductie pentru actionare directa cu rotor interior la tramvaie, putand fi utilizata si la alte vehicule de tractiune usoara, precum troleibus, metro etc.

In literatura de specialitate romaneasca, aceasta problema a fost putin abordata iar in literatura straina cel mai mult a fost studiată in cea britanica, precum la GEC ALSTHOM Transportation Projects Ltd. , dar acolo a fost studiată masina de inductie cu rotor exterior pentru trenuri de mare viteza.

Contributiile aduse de constructorii britanici precum si stadiul actual de dezvoltare a tehnologiilor au facut ca solutia sa devina realizabila in prezent.

Lucrarea isi propune sa arate ca este posibila eliminarea angrenajelor si obtinerea unor performante corespunzatoare ale tramvaielor cu motoare de inductie pentru actionare directa. Totodata s-a urmarit ca orice varianta de motor din cele calculate sa se poata monta pe boghiurile tramvaiului TIMIS-2 cu foarte mici modificari la boghiu.

Cu tendinta de a obtine masini electrice cu performante cat mai bune tinand cont de spatiul disponibil redus, masinile proiectate vor fi mai solicitate decat cele pentru actionare indirecta. De aceea este necesar sa fie luate in considerare unele fenomene greu de stapanit: fenomenul de saturatie a cailor principale si de dispersie ale fluxului magnetic, fenomenul de refluxare a curentului in barele rotorului, fenomenul termic etc. Programul de optimizare IND tine cont de aceste fenomene si astfel se poate face controlul prin calcul al saturatiei campului magnetic.

Au fost calculate in total zece variante de motor la doua lungimi a pachetului de tole, la 750mm in cazul in care se utilizeaza tot spatiul disponibil dintre cutiile de unsoare si la 440mm in cazul in care se pastreaza discul de franare pe osie.

Pentru fiecare subgrupa aparte a fost facut un studiu pentru alegerea puterii optime pentru masina de actionare directa, facandu-se calcule pentru diferite puteri si comparand rezultatele obtinute, care au fost reprezentate si tabelar si grafic.

In cadrul fiecărei subgrupe au fost calculate mai multe variante ale masinii de inductie pentru actionare directa (cu rotor in colivie din aluminiu turnat ori cu bare din cupru sau alama) ramanand ca firma producatoare de motoare sa aleaga varianta dorita in functie de tehnologia de care dispune.

Analiza facuta in (Capitolul 5) arata ca motoarele de inductie pentru actionare directa pot fi folosite la tramvaie, obtinandu-se date tehnice (acceleratie, viteza maxima, randament, factor de putere) destul de bune si ca acestea pot face fata traficului urban. Acceleratiile obtinute sunt mai mici decat la vehiculele cu reductor ceea ce se poate compensa prin utilizarea mai multor motoare de tractiune sau prin marirea tensiunii de alimentare la pornire.

Problemele prezentate in lucrare, rezultatele obtinute prin calcul si concluziile stabilite confera tezei originalitate deschizand noi perspective de transpunere in practica a actionarii directe.

Dupa parerea autorului principalele contributii ale lucrarii sunt:

- calculul si obtinerea caracteristicilor de reglare a motoarelor de actionare directa la frecvente mici, corespunzatoare vitezelor reduse de deplasare.
- studiul privind alegerea puterii optime pentru masina de inductie.
- analiza factorilor care influenteaza saturatia magnetica la pornirea masinii de la turatii mici.
- analiza diagramelor de mers in privinta satisfacerii cerintelor traficului urban.

ANEXE

A.1. SEMNIFICATIA MARIMILOR DIN DATE DE INTRARE

A.1.1. Marimi reale

1. AA - distanta intre bobinele statorice in zona capetelor de bobina. -
2. AIZCB - distanta dintre capetele de bobine rotorice.
3. AS - coeficientul din expresia permeantei de calcul a capetelor de bobina statorice la infasurarile intr-un singur strat.
4. ASR - coeficientul din expresia permeantei de calcul a capetelor de bobina rotorice la infasurarile intr-un singur strat.
5. A1 - numarul de cai in paralel pentru infasurarea statorica.
6. A2 - numarul de cai in paralel pentru infasurarea rotorica.
7. BDEMA - valoarea maxima a inductiei magnetice din intrefier.
8. BDEMI - valoarea minima a inductiei magnetice din intrefier.
9. BPO - valoarea inductiei magnetice pentru care, la frecventa f , se dau cifrele de pierderi in tabla utilizata la constructia jugului.
10. BRDII | - marimi care se refera la crestatura generala. Pentru $IR=0$ sau 1, deci rotor
11. BRDIS | bobinat sau colivie simpla nu se iau in considerare, se pune valoarea 0.
12. BRDSI |
13. BRDSS|
14. BRD00 |
15. BRD01 |
16. BRD02 |
17. BRD03 |
18. BRD04 |
19. BRD05 |
20. BRD07 |
21. BRD08 |
22. BRD09 |
23. BRD10 |
24. BRD11 |
25. BRD12 |
26. BRD6I |
27. BRD6S|

Teza de doctorat

28. **BR4** - reprezinta deschiderea crestaturii rotorice.
29. **BS** - coeficientul din expresia permeantei de calcul a capetelor de bobina statorice, la infasarile intr-un singur strat.
30. **BSR** - corespunde lui BS de la stator si impreuna cu ASR intra in expresia permeantei de calcul a capetelor de bobine rotorice la infasarari intr-un singur strat.
31. **BSV** - reprezinta latimea canalelor de ventilatie.
32. **BS4** - reprezinta deschiderea crestaturii statorice.
33. **B0** - reprezinta inductia magnetica pentru care, la frecventa f , se dau cifrele de pierderi in fier, avand in vedere zona dinților.
34. **B01** - lungimea segmentului determinat de prelungirea peretilor crestaturii-si cercul care trece prin capetele de dinti si are centrul in axa masinii.
35. **B02** - marime similara lui B01, dar pentru rotor.
36. **B1** - latimea crestaturii statorice la baza.
37. **B2** - latimea crestaturii rotorice la baza.
38. **CFI** - reprezinta factorul nominal de putere cu care trebuie sa functioneze masina.
39. **CX2I** - coeficient de reducere a reactantei de dispersie rotorice, cauzata de saturatie, la pornire fata de mersul normal in sarcina.
40. **C01N** - coeficient care reprezinta cu cat se reduce reactanta de dispersie statorica de dubla inlantuire, la pornire, fata de mersul normal.
41. **C02N** - coeficient similar cu C01N, dar referitor la rotor.
42. **C1DN** - coeficient care reprezinta cu cat se reduce reactanta de dispersie statorica corespunzatoare capetelor de dinti, la scurtcircuit, fata de regimul normal.
43. **C1NN** - coeficient care reprezinta cu cat se reduce reactanta de dispersie statorica corespunzatoare crestaturii, la pornire, fata de regimul normal.
44. **C1SN** - coeficient care reprezinta cu cat se reduce reactanta de dispersie statorica corespunzatoare capetelor de bobine, la scurtcircuit, fata de regimul normal.
45. **C2DN** - coeficient similar lui C1DN, dar referitor la rotor. Are valori similare.
46. **C2NN** - coeficient similar lui C1NN, dar referitor la rotor. Are valori similare.
47. **C2SN** - coeficient similar lui C1SN, dar referitor la rotor. Are valori similare.
48. **D** - diametrul interior al statorului.
49. **DB01** - pasul cu care se modifica B01.
50. **DB02** - pasul cu care se modifica B02.
51. **DB1** - pasul cu care se modifica B1.
52. **DB2** - pasul cu care se modifica B2.
53. **DE** - reprezinta intrefierul cu care se executa masina.
54. **DEIZC1** - reprezinta distanta de la metalul laturii de bobina pana la peretele crestaturii statorice
55. **DEIZC2** - marime similara lui DEIZC1, dar referitoare la crestatura rotorica.

56. DELBL - reprezinta distanta de la miezul feromagnetic rotorice pana la inelul de scurtcircuitare pentru colivia de lucru
57. DELBP - similar lui DELBL, dar pentru bara coliviei de pornire.
58. DELD - pasul cu care se modifica diametrul interior statoric D.
59. DELFE - grosimea tablei fara izolatia din care se executa miezul feromagnetic al masinii.
60. DELLAM - valoarea maxima cu care se poate abate $\lambda = l_1 \cdot \gamma$ (l_1 - lungimea ideala, γ - pasul polar) in jurul valorii medii uzuale.
61. DELTR - se refera la rotoare cu inele de contact si este grosimea izolatiei dintre partile metalice conductoare ale celor doua laturi de bobina dintr-o crestatura rotorica.
62. DELTS - marime similara cu DELTR, dar referitoare la crestatura statorica.
63. DEX - diametrul exterior al miezului feromagnetic statoric.
64. DIN - diametrul interior al miezului feromagnetic rotorice.
65. DIP - diametrul mediu al inelului de scurtcircuitare.
66. DIVLAM - numarul prin intermediul caruia se stabileste pasul cu care se modifica λ .
67. DIZ1 - reprezinta lungimea partii drepte a conductorului statoric de la iesirea din crestatura pana la curbarea lui in vederea formarii capatului de bobina.
68. DIZ2 - marime similara lui DIZ1 pentru rotoare cu inele de contact, dar referitoare la conductorul rotorice, cu aceleasi recomandari.
69. DJJL - pasul cu care se modifica densitatea curentului electric in inelul de scurtcircuitare al coliviei de lucru.
70. DJ1 - pasul cu care se modifica densitatea curentului electric din infasurarea statorica.
71. DJ2 - pasul cu care se modifica densitatea curentului electric din infasurarea rotorica.
72. DKBJ1 - pasul cu care se modifica valoarea lui KBJ1 in jurul valorii initiale KBJ10.
73. DKBJ2 - marime similara la jugul rotorice, cu aceleasi recomandari.
74. DRIL - diferenta intre raza cercului exterior rotorice si raza cercului exterior al inelului de scurtcircuitare al coliviei de lucru la rotoare in colivie.
75. DRINAB - pasul cu care se modifica RINAB a carui valoare initiala este RINAB0.
76. DS1 - prima valoare data alunecarii s.
77. DS2 - variatia alunecarii s pentru domeniul alunecarii de la 0 pana la alunecarea critica.
78. DS3 - variatia alunecarii pentru s pentru domeniul alunecarilor mari.
79. DURATA - durata de viata, in ore, a masinii.
80. EPS1 - scurtarea deschiderii bobinei statorice fata de pasul polar, exprimata in pasi de crestatura.
81. EPS2 - scurtarea deschiderii bobinei rotorice fata de pasul polar, exprimata in pasi de crestatura.
82. F - frecventa tensiunii de alimentare.
83. FUR - raportul dintre aria sectiunii materialului conductor dintr-o crestatura rotorica si cea marginita in interior de izolatia crestaturii.
84. FUS - marime similara lui FUR, dar pentru crestatura statorica.

85. GACUB - masa specifica a materialului barelor de colivie; la masinile cu rotor in dubla colivie, se refera la barele coliviei de lucru.
86. GACUBP - masa specifica a materialului barelor coliviei de pornire la rotor in dubla colivie.
87. GACUIL - masa specifica a materialului inelului de scurtcircuitare. La dubla colivie cu inele separate se refera numai la colivia de lucru.
88. GACUIP - masa specifica a materialului inelului de scurtcircuitare al coliviei de pornire.
89. GAMCU1 - masa specifica a materialului din care se executa infasurarea statorica.
90. GAMFE - masa specifica a tablei feromagnetice.
91. HRDII | - marimi care se refera la crestatura generala. Pentru $IR=0$ sau 1, deci rotor
92. HRDIS | bobinat sau colivie simpla nu se iau in considerare, se pune valoarea 0.
93. HRDSI |
94. HRDSS |
95. HRD01 |
96. HRD02 |
97. HRD03 |
98. HRD04 |
99. HRD05 |
100. HRD06 |
101. HRD07 |
102. HRD08 |
103. HRD09 |
104. HRD10 |
105. HRD11 |
106. HRD12 |
107. HR2 - distanta de la pana pana la metalul conductor al laturii de bobina in crestatura rotorica.
108. HR3 - inaltimea partii inclinate a crestaturii rotorice care sprijina pana.
109. HR4 - inaltimea deschiderii crestaturii rotorice.
110. HS2 - distanta de la pana pana la metalul conductor al laturii de bobina in crestatura statorica.
111. HS3 - inaltimea partii inclinate a crestaturii statorice care sprijina pana.
112. HS4 - inaltimea deschiderii crestaturii statorice.
113. H1 - adancimea totala a crestaturii statorice.
114. H2 - adancimea totala a crestaturii rotorice.
115. IC - inclinarea relativa a crestaturilor in pasi de crestaturi statorice.
116. JI - valoarea initiala a densitatii curentului electric in inelul de scurtcircuitare.
117. J1 - valoarea initiala a densitatii curentului electric in infasurarea statorica.
118. J2 - valoarea initiala a densitatii curentului electric in infasurarea rotorica.
119. KBJ10 - valoarea initiala a raportului dintre inductia magnetica din jugul statoric si inductia magnetica din intrefier.

120. KBJ20 - valoarea initiala a raportului dintre inductia magnetica din jugul rotorice si inductia magnetica din intrefier.
121. KCBR - raportul dintre latimea laturii de bobina, izolata, din capatul de bobina si latimea laturii din crestatura pentru rotor bobinat in doua strate.
122. KCBS - marime similara lui KCBR, dar pentru stator.
123. KDIM - valoarea minim admisibila a raportului dintre latimea dintelui statoric, sau rotorice la radacina lui si pasul crestaturii, din intrefier sub care nu are sens sa se caute solutie.
124. KE - factor de umplere a miezului feromagnetic.
125. K0 - coeficient prin intermediul caruia se tine seama de calitatea si dimensiunile tolelor din care se executa miezul feromagnetic al masinii, la calculul pierderilor de suprafata.
126. KPJ - coeficient de prelucrare pentru calculul pierderilor in jugul statoric.
127. KPZ - coeficient de prelucrare la calculul pierderilor in dinti.
128. KQ1 - factor de zona pentru infasurarea statorica.
129. KQ2 - factor de zona pentru infasurarea rotorica.
130. KS - valoarea initiala a factorului de saturatie cu care se incepe calculul.
131. KW - factor supraunitar prin intermediul caruia se selecteaza cazul optim.
132. K1 - coeficient prin intermediul caruia se reprezinta contributia diametrului masinii la lungimea unui conductor al infasurarii statorice.
133. K1R - coeficient care intervine la calculul reactantei de dispersie pentru infasarile rotorice in doua strate, la rotor cu inele de contact.
134. K1RR - coeficient similar lui K1, dar referitor la rotor.
135. K1S - coeficient care intervine la calculul reactantei de dispersie pentru infasarile statorice in doua straturi.
136. K2 - coeficient care reprezinta suma partilor drepte ale unui capat de bobina statorica.
137. K2R - coeficient pentru calculul reactantei de dispersie, referitor la rotor bobinat.
138. K2RR - coeficient similar lui K2 de la stator, dar referitor la rotor bobinat.
139. K2S - coeficient din expresia reactantei de dispersie a infasarilor statorice in doua straturi.
140. L - lungimea axiala a tuturor pachetelor de tole.
141. LAMDA0 - valoarea initiala a coeficientului λ .
142. MN - momentul nominal de rotatie al masinii.
143. M1 - numarul de faze ale infasurarii statorice.
144. M2 - numarul de faze ale infasurarii rotorice.
145. NCUBL - pretul unitatii de masa pentru materialul infasurarii rotorice. La rotoare cu dubla colivie se refera numai la barele coliviei de lucru.
146. NCUBP - pretul unitatii de masa pentru materialul barei de pornire.
147. NCUIL - pretul unitatii de masa pentru materialul inelelor de scurtcircuitare. La rotoare in dubla colivie se refera numai la inelul coliviei de lucru.
148. NCUIP - pretul unitatii de masa pentru inelele coliviei de pornire.
149. NCU1 - pretul unitatii de masa pentru materialul infasurarii statorice.

Teza de doctorat

150. NFE - pretul unitatii de masa pentru tabla din care se executa miezul feromagnetic.
151. NKWH - pretul unei Wh.
152. N1 - numarul de spire pe faza, in primar.
153. P - numarul de perechi de poli ai masinii.
154. P MEC - pierderile mecanice din masina.
155. PN - puterea nominala a masinii.
156. P0P - pierderile de suprafata si prin pulsatie.
157. PP0 - pierderile specifice ale tolei in zona jugurilor pentru inductia $BP0$ si frecventa f .
158. PSUP - pierderile suplimentare cauzate de efectul pelicular in infasurarea statorica si de campurile magnetice in piesele metalice din apropierea capetelor de bobina.
159. P0 - pierderile specifice ale tolei in zona dintilor pentru inductia $B0$ si frecventa f .
160. QBL - aria initiala a sectiunii conductorului din care se realizeaza infasurarea rotorica. La rotor in dubla colivie reprezinta aria sectiunii barei coliviei de lucru.
161. QBP - aria initiala a sectiunii barei coliviei de pornire la rotoare in dubla colivie.
162. QB1 - aria initiala a sectiunii conductorului cu care se realizeaza infasurarea statorica.
163. QIL - aria initiala a sectiunii inelului de scurtcircuitare. La rotor in dubla colivie reprezinta aria sectiunii inelului de scurtcircuitare al coliviei de lucru.
164. QIP - aria initiala a sectiunii inelului de scurtcircuitare al coliviei de pornire.
165. Q1 - numarul de crestaturi pe pol si faza in stator.
166. Q2 - numarul de crestaturi pe pol si faza in rotor.
167. RAN - randamentul masinii (orientativ, ulterior se calculeaza exact in program).
168. RINAB0 - valoarea initiala a raportului dintre dimensiunile dupa raza si axa masinii ale inelului de scurtcircuitare.
169. ROB01 | - rezistivitatea electrica a materialului zonei 1...12, din care este compusa
170. ROB02 | crestatura generala. Daca intr-o zona oarecare nu exista material conductor se
172. ROB04 | pune 1.D6.
173. ROB05 |
174. ROB06 |
175. ROB07 |
176. ROB08 |
177. ROB09 |
178. ROB10 |
179. ROB11 |
180. ROB12 |
181. ROIL - rezistivitatea electrica a materialului inelului de scurtcircuitare la rotor in simpla colivie.
182. ROIP - rezistivitatea electrica a inelului de scurtcircuitare al coliviei de pornire.
183. RO1 - rezistivitatea electrica a materialului infasurarii statorice.
184. SB2 - numarul de spire ale unei bobine rotorice la rotor bobinat. La rotor in colivie $SB2=1$.

Teza de doctorat

185. SIGMW - coeficientul pierderilor specifice prin fenomenul de curenti turbionari.
186. SIGM01 - coeficientul de dispersie a intrefierului, pentru stator.
187. SIGM02 - coeficientul de dispersie a intrefierului, pentru rotor.
188. SN - alunecarea nominala cu care functioneaza masina. Este necesar sa fie data o valoare aproximativa, dar diferita de 0. Valoarea exacta se calculeaza in program.
189. U1 - tensiunea de faza la bornele infasurarii statorice.
190. V01 - grosimea stratului izolant de la baza crestaturii statorice pe care se sprijina bobina izolata.
191. V02 - marime similara lui V01, dar referitoare la crestatura rotorica.
192. ZALIMA - valoarea maxima a puterii de curent peste care nu mai are sens sa se caute solutii.

A.1.2 Marimi intregi

1. COD - marime de comanda pentru alegerea marimii criteriale. Marimea criteriala poate fi: masa materialelor active, costul materialelor active sau costul materialelor active si al energiei corespunzatoare pierderilor pe durata de viata a masinii.
2. I - variabila intreaga de comanda pentru felul imprimarilor.
3. IB01F | - limitele maxima(finala) si minima(initiala) la contorul IB01 prin care se modifica B01.
4. IB01I |
5. IB02F | - limitele maxima si minima la contorul IB02 prin care se modifica B02.
6. IB02I |
7. IB1F | - limitele maxima si minima la contorul IB1 prin care se modifica B1.
8. IB1I |
9. IB2F | - limitele maxima si minima la contorul IB2 prin care se modifica B2.
10. IB2I |
11. IC1 - variabila de comanda a formei crestaturii statorice.
12. IC2 - variabila de comanda a formei crestaturii rotorice.
13. IDEXF | - limitele contorului IDEX de modificare a diametrului exterior (DEX) al
14. IDEXI | miezului feromagnetic.
15. IDF | - limitele contorului ID de modificare a diametrului interior (D) al statorului.
16. IDI |
17. IDINF | - limitele contorului IDIN de modificare a diametrului interior (DIN) al
18. IDINI | miezului feromagnetic rotorice.
19. IIB01 - variabila de comanda pentru B01.
20. IIB02 - variabila de comanda pentru B02.
21. IIB1 - variabila de comanda pentru B1.
22. IIB2 - variabila de comanda pentru B2.
23. IID - variabila de comanda pentru D.
24. IIDEX - variabila de comanda pentru DEX.
25. IIDIN - variabila de comanda pentru DIN.

26. IIIH1 - variabila de comanda pentru H1.
27. IIIH2 - variabila de comanda pentru H2.
28. IIJ1 - variabila de comanda pentru J1.
29. IIJ1 - variabila de comanda pentru J1.
30. IIJ2 - variabila de comanda pentru J2.
31. IIL - variabila de comanda pentru L.
32. IINEL - variabila de comanda pentru RINAB.
33. IISB1 - variabila de comanda pentru N1.
34. IJIF | - limitele contorului IJ1 de modificare a densitatii curentului electric in inelul
35. IJII | de scurtcircuitare.
36. IJIF | - limitele contorului IJ1 de modificare a densitatii curentului in infasurarea statorica.
37. IJII |
38. IJ2F | - limitele contorului IJ2 de modificare a densitatii curentului in infasurarea rotorica.
39. IJ2I |
40. ILAF | - limitele contorului IIA de modificare a lungimii axiale L a miezului feromagnetic
41. LAI | fara canale de ventilatie.
42. IMP - marime de comanda pentru tipul crestaturii rotorice.
43. INELF | - limitele contorului INEL de modificare a raportului RINAB dintre dimensiunea
44. INELI | radiala si cea axiala a sectiuni de scurtcircuitare la rotoarele cu colivie simpla.
45. IORA - variabila de comanda pentru imprimarea orei conform ceasului intern.
46. IR - marime de comanda a tipului masinii.
47. ISB1F | - limitele contorului ISB1 de modificare a numarului de spire pe o bobina la
48. ISB1I | infasurarea statorica.
49. KDR - variabila de comanda prin intermediul careia se specifica tipul crestaturii rotorice.
50. KDS - variabila de comanda prin intermediul careia se specifica tipul crestaturii statorice
51. L1 - numarul de puncte ale intervalului alunecarii s, in care pasul este DS2.
52. L2 - numarul de puncte ale intervalului alunecarii s, pana la care, de la L1, se merge cu pasul DS3.
53. MR - variabila de comanda prin intermediul careia se considera influenta saturatiei asupra factorului de putere.
54. NSV - numarul canalelor de ventilatie.
55. STR - marime de comanda pentru numarul de straturi ale infasurarii statorice.
56. STR2 - marime de comanda a tipului infasurarii rotorice, la rotor bobinat.
57. TH - numarul fasilor crestaturii generale.
58. T1 - numarul de puncte prin care se da curba de magnetizare.
59. ZIPR - marime de comanda pentru numarul de reluari la calculul caracteristicilor.
60. ZIS - marime de comanda pentru modificarea valorilor extreme ale contoarelor corespunzatoare marimilor modificabile, definitorii pentru masina.

A.2. SEMNIFICATIA MARIMILOR DIN REZULTATE FINALE

COD - precizat la A.1.2. pct.1.

IMP - precizat la A.1.2. pct.42.

IR - precizat la A.1.2. pct.46.

MR - precizat la A.1.2. pct.53.

MS - variabila intreaga care obtine valoarea 1 cand crestatura statorica are forma dreptunghiulara si 2 cand crestatura statorica are forma trapezoidala.

NSV - precizat la A.1.2. pct.54.

STR - precizat la A.1.2. pct.55.

STR2 - precizat la A.1.2. pct.56.

ALFAI - factorul de acoperire polara.

ALFAR - inversul factorului de acoperire polara.

A1 - precizat la A.1.1. pct.5.

A2 - precizat la A.1.1. pct.6.

BB2 - coeficient pentru calculul permeantei de calcul a crestaturii rotorice.

BDE - inductia magnetica din intrefier.

BDEM - inductia magnetica medie din intrefier.

BEZ1H - inductia magnetica de la radacina dintelui statoric.

BEZ10 - inductia magnetica de la capatul dintelui statoric.

BEZ2H - inductia magnetica de la radacina dintelui rotoric.

BEZ20 - inductia magnetica de la capatul dintelui rotoric.

BJ1 - inductia magnetica din jugul statorului.

BJ2 - inductia magnetica din jugul rotorului.

BP1 - inductia magnetica de pulsatie din dintii statorici.

BP2 - inductia magnetica de pulsatie din dintii rotorici.

BR4 - precizat la A.1.1. pct.28.

BSV - precizat la A.1.1. pct.31.

BS4 - precizat la A.1.1. pct.32.

BZ1H - latimea dintelui statoric la radacina.

BZ10 - latimea dintelui statoric la capat.

BZ2H - latimea dintelui rotoric la radacina.

BZ20 - latimea dintelui rotoric la capat.

B01 - precizat la A.1.1. pct.34.

B02 - precizat la A.1.1. pct.35.

B1 - precizat la A.1.1. pct.36.

B2 - precizat la A.1.1. pct.37.

Teza de doctorat

- CC2 - reprezinta raportul dintre pierderile in infasurarea rotorica si pierderile in ambele infasurari.
- CF - reprezinta raportul dintre pierderile in fier si suma pierderilor in fier si infasurari.
- CFI - precizat la A.1.1. pct.38.
- COST - reprezinta costul materialelor active.
- CSI2 - inaltimea de calcul a barei pentru calculul coeficientilor de modificare a rezistentei si reactantei de dispersie, ca urmare a efectului pelicular.
- CT - raportul dintre suma pierderilor principale din fier si infasurari, catre pierderile totale din masina.
- D - precizat la A.1.1. pct.48.
- DE - precizat la A.1.1. pct.53.
- DEX - precizat la A.1.1. pct.63.
- DIL - diametrul mediu al inelului de scurtcircuitare al coliviei. La rotoare in dubla colivie, se refera la colivia de lucru.
- DEN - precizat la A.1.1. pct.64.
- F1 - frecventa de pulsatie din dintii statorici.
- F2 - frecventa de pulsatie din dintii rotorici.
- G - masa materialelor active.
- GCU - masa infasurarilor active.
- GCUBL - masa infasurarii rotorice pentru masina cu inele de contact si masa barelor coliviei de lucru la masinile cu rotor in colivie.
- GCUBP - masa barelor coliviei de pornire.
- GCUIL - masa inelelor de scurtcircuitare ale coliviei de lucru.
- GCUIP - masa inelelor de scurtcircuitare ale coliviei de pornire.
- GCU1 - masa infasurarii statorice.
- GFE - masa miezului feromagnetic al masinii.
- GFE1 - masa miezului feromagnetic statoric.
- GFE2 - masa miezului feromagnetic rotoric.
- GJ1 - masa jugului statoric.
- GJ2 - masa jugului rotoric.
- GZ1 - masa dintilor statorici.
- GZ2 - masa dintilor rotorici.
- HHZ1 - valoarea medie a intensitatii de camp magnetic din dintii statorici.
- HHZ2 - valoarea medie a intensitatii de camp magnetic din dintii rotorici.
- HJ1 - inaltimea jugului statoric.
- HJ2 - inaltimea jugului rotoric.
- HR2 - precizat la A.1.1. pct.107.
- HR3 - precizat la A.1.1. pct.108.
- HR4 - precizat la A.1.1. pct.109.
- HS2 - precizat la A.1.1. pct.110.

Teza de doctorat

HS3 - precizat la A.1.1. pct.111.

HS4 - precizat la A.1.1. pct.112.

H1 - precizat la A.1.1. pct.113.

H2 - precizat la A.1.1. pct.114.

IBL - intensitatea curentului din bara coliviei de lucru.

IBP - intensitatea curentului din bara coliviei de pornire.

IIL - intensitatea curentului din inelul coliviei de lucru.

IIP - intensitatea curentului din inelul coliviei de pornire.

IPD - intensitatea curentului la pornire ($s=1$).

I0 - intensitatea curentului la mers in gol.

I0R - componenta activa a lui I0.

I0X - componenta reactiva a lui I0.

I1 - intensitatea curentului de faza din stator

I2 - intensitatea curentului din rotor redus la stator.

JBL - densitatea curentului din bara coliviei de lucru.

JBP - densitatea curentului din bara coliviei de pornire.

JIL - densitatea curentului din inelul coliviei de lucru.

JIP - densitatea curentului din inelul coliviei de pornire.

J1 - densitatea curentului statoric.

KAPAF - factor de forma.

KDE - factor total de intrefier.

KDE1 - factor de intrefier pentru stator.

KDE2 - factor de intrefier pentru rotor.

KEI - factorul total de transformare a masinii $k_r k_o$.

KEN - factor prin care se tine seama de faptul ca are loc camp magnetic de tipul campului transversal din crestatura pe o anumita lungime a conductorului din canalul de ventilatie.

KES - raportul dintre lungimea axiala a pachetelor de tole si lungimea axiala a fierului (inclusiv canalele de ventilatie).

KE1 - raportul dintre lungimea pachetelor de tole si lungimea ideala a masinii (fara canale de ventilatie).

KI2 - raportul de transformare a curentilor.

KR - coeficientul de modificare a rezistentei pentru alunecarea nominala.

KRRP - coeficientul de modificare a rezistentei pentru colivia de pornire la alunecarea nominala.

KRY - coeficientul de modificare a rezistentei rotorice la $s=1$.

KS - precizat la A.1.1. pct.130.

KUEMTR - factorul de umplere a crestaturii rotorice.

KUEMTR - factorul de umplere a crestaturii statorice..

KU2 - factorul de transformare a tensiunilor.

KX - factorul de modificare a reactantei pentru pentru alunecarea nominala.

KXXP - factorul de modificare a reactantei coliviei de pornire pentru alunecarea nominala.

KXY - factorul de modificare a reactantei pentru $s=1$.

K1 - precizat la A.1.1. pct.132.

K1RR - precizat la A.1.1. pct.134.

K2 - precizat la A.1.1. pct.136.

K2RR - precizat la A.1.1. pct.138.

L - precizat la A.1.1. pct.140.

MKDG - momentul critic pentru regimul de generator.

MKDM - momentul critic pentru regimul de motor.

MN - precizat la A.1.1. pct.142.

MP - momentul de pornire.

NC1 - numarul de crestaturi in stator.

NC2 - numarul de crestaturi in rotor.

N1 - precizat la A.1.1. pct.152.

N2 - numarul de spire pe faza in rotor.

PCU - pierderile in infasurari.

PCU1 - pierderile principale in infasurarea statorica.

PCU2 - pierderile principale in infasurarea rotorica.

PFE - pierderile principale in fier.

PFEJ1 - pierderile in jugul statoric.

PFEZ1 - pierderile principale in dintii statorici.

PMEC - precizat la A.1.1. pct.154.

PN - puterea nominala a masinii.

PO1 - pierderile de suprafata in dintii statorici.

PO2 - pierderile de suprafata in dintii rotorici.

PP1 - pierderile prin pulsatie in dintii statorici.

PP2 - pierderile prin pulsatie in dintii rotorici.

PSUP - precizat la A.1.1. pct.158.

QB(QBL) - precizat la A.1.1. pct.160.

QBP - precizat la A.1.1. pct.161.

QB1 - precizat la A.1.1. pct.162.

QIL - precizat la A.1.1. pct.163.

QIP - precizat la A.1.1. pct.164.

R - rezistenta electrica rotorica redusa la stator pentru alunecarea nominala.

RAN - precizat la A.1.1. pct.167.

RM - rezistenta electrica echivalenta a circuitului de magnetizare considerata fata de stator.

RP - rezistenta electrica rotorica considerata pentru alunecarea $s=1$, redusa la stator.

R1 - rezistenta electrica a fazei statorice.

R1BN - rezistenta electrica a fazei statorice, corespunzatoare partii infasurarii plasate in crestaturii.

Teza de doctorat

R1IN - rezistenta electrica a fazei statorice, corespunzatoare partii din afara crestaturilor.

R2BNL - rezistenta electrica a fazei rotorice, corespunzatoare partii plasate in crestaturi, redusa la stator, pentru colivia de lucru.

R2BNP - marime similara lui R2BNL, dar pentru colivia de pornire.

R2INL - rezistenta electrica a fazei rotorice, corespunzatoare partii din afara crestaturilor, redusa la stator, pentru colivia de lucru.

R2INP - marime similara lui R2INL, dar pentru colivia de pornire.

SK - alunecarea critica.

SN - precizat la A.1.1. pct.188.

TAU - pasul polar considerat pe cercul de diameru D.

TAU1 - factorul lui Heyland de dispersie.

TC1 - pasul crestaturii statorice, considerat pe cercul de diametru D.

TC2 - pasul crestaturii rotorice, considerat pe cercul de diametru D.

TETA - solenatia rezultanta a masinii pentru puterea nominala.

UE1 - t.e.m. indusa in faza statorica la sarcina nominala.

U1 - precizat la A.1.1. pct.189.

VDE - tensiunea magnetica corespunzatoare intrefierului.

VJ1 - tensiunea magnetica corespunzatoare jugului statoric.

VJ2 - tensiunea magnetica corespunzatoare jugului rotoric.

VZ1 - tensiunea magnetica corespunzatoare dintilor statorici.

VZ2 - tensiunea magnetica corespunzatoare dintilor rotorici.

W - marime criteriala conform comenzii COD (A.1.2. pct.1).

ZALIN - patura de curent pentru sarcina nominala.

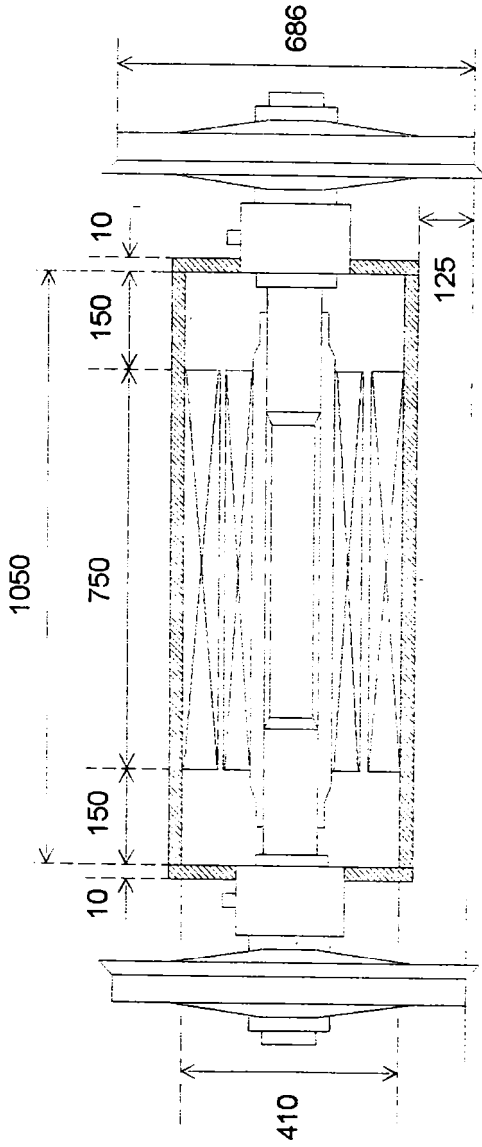
X1 - reactanta de dispersie statorica.

X2 - reactanta de dispersie rotorica, pentru alunecarea nominala, redusa la stator.

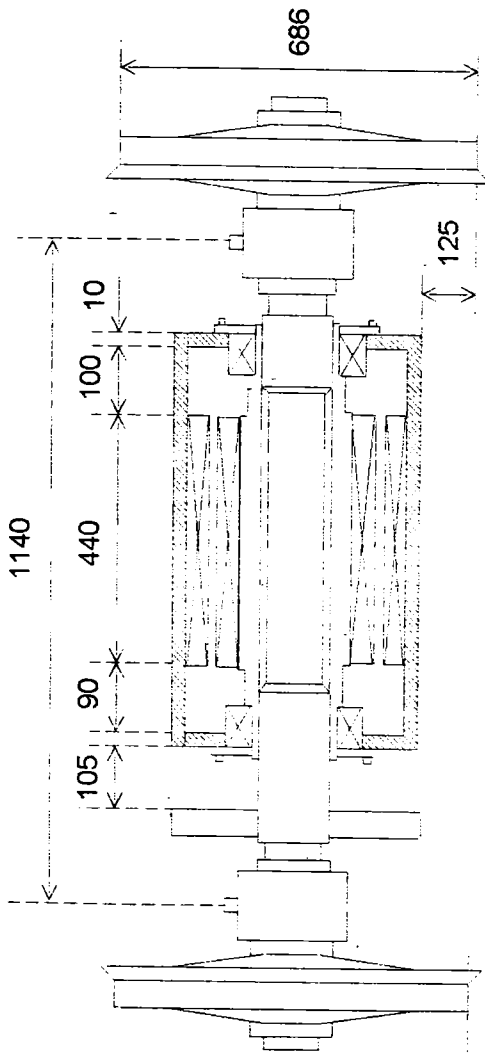
XM - reactanta circuitului de magnetizare pentru sarcina nominala.

XP - reactanta de dispersie rotorica, pentru pornire, redusa la stator.

A.3. TREN DE ROTI CU MIAD3



A.4. TREN DE ROTI CU MIAD8



BIBLIOGRAFIE

- [1] ALEXA D., HRUBARU O. : Aplicatii ale convertoarelor statice de frecventa. ET Bucuresti, 1989.
- [2] BALA C. : Masini electrice. EDP Bucuresti, 1982.
- [3] BOLDEA I., ATANASIU GH. : Analiza unitara a masinilor electrice. EA Bucuresti, 1983.
- [4] BOLDEA I., NASAR S.A. : Electric machine dynamics. Mc. Graw-Hill New York, 1986.
- [5] BUCURENTIU S. : Tractiune electrica. vol.1. IP Bucuresti, 1984.
- [6] CANTEMIR L., OPRISOR M. : Tractiune electrica. EDP Bucuresti, 1971.
- [7] CAMPEANU A. : Masini electrice. ESR Craiova, 1988.
- [8] CIOC I., NICA C. : Proiectarea masinilor electrice. EDP Bucuresti, 1994.
- [9] DORDEA T. : Masini electrice. EDP Bucuresti, 1977.
- [10] DORDEA T., BIRIESCU M. : Proiectarea si constructia masinilor electrice. Proiectarea masinilor electrice, vol 1,2. IP Timisoara, 1992.
- [11] DORDEA T., BIRIESCU M. : Proiectarea si constructia masinilor electrice. Constructia masinilor electrice, vol 1,2. IP Timisoara, 1993.
- [12] DORDEA T. : Metoda IPT de calcul cu calculatorul electronic a masinilor electrice de inductie. Programul IND. IP Timisoara, 1994.
- [13] DORDEA T. : Asupra cuplului electromagnetic al masinilor electrice. Studii si cercetari de energetica si electrotehnica, Tom. 18, nr. 1, pg. 131-146.
- [14] DRAGANESCU O. : Incercarile masinilor electrice rotative. ET Bucuresti, 1987.
- [15] FINNEY D. : The power thyristor and its applications. Mc. Graw-Hill book company UK Limited, 1980.
- [16] FRANSUA A. : Masini si actionari electrice. EDP Bucuresti, 1967.
- [17] GARREAU M. : La traction electrique. Edition scientifiques Riber Paris, 1965.
- [18] IANCU V., RADULESCU M., PAPUSOIU GH. : Tractiune electrica. IP Cluj-Napoca, 1989.
- [19] JÉRVE G. K. : Incercarile industriale ale masinilor electrice. ET Bucuresti, 1961.
- [20] KOPYLOV R. I. : Mathematical Models of Electrical Machines. Mir Publishers Moscow, 1984.
- [21] KELEMEN A. : Actionari electrice. EDP Bucuresti, 1976.
- [22] KELEMEN A., IMECS M. : Mutatoare. EDP Bucuresti, 1976.
- [23] KELEMEN A., IMECS M. : Sisteme de reglare cu orientare dupa camp ale masinilor de curent alternativ. EA Bucuresti, 1989.
- [24] KOVACS K. P. : Analiza regimurilor tranzitorii ale masinilor electrice. ET Bucuresti, 1980.
- [25] LEONHARD W. : Control of electrical drives. Springer Verlag Berlin, 1985.

- [26] LABUNTOV V. A., TUGOV N. M. : Tinistoare de putere, regimuri dinamice de exploatare. ET Bucuresti, 1983.
- [27] LARSEN B. : Power control electronics. Prentice-Hall New York, 1983.
- [28] MATLAC I. : Convertoare electrice. EF Timisoara, 1987.
- [29] MAGUREANU R. : Masini electrice speciale. ET Bucuresti, 1981.
- [30] MAGUREANU R., MICU D. : Convertizoare statice de frecventa in actionari cu motoare asincronc. ET Bucuresti, 1985.
- [31] ALEXA D., MICU D. : Invertoare si redresoare cu parametri energetici ridicati. ET Bucuresti, 1986.
- [32] MICLOSI C. : Tractiune electrica. EDP Bucuresti, 1961.
- [33] Magureanu R. (Coordonare si traducere). : Masini si actionari electrice. Tendinte actuale. Vol.1. ET Bucuresti. 1988.
- [34] NENE V.D. : Advanced propulsion systems for urban rail vehicles. Prentice-Hall New Jersey, 1985.
- [35] NICOLAIDE A. : Masini electrice . Teorie, proiectare. vol. 2. ESR Craiova, 1975.
- [36] NOVAC I. : Masini electrice. IP Timisoara, 1969.
- [37] RADOJKOVIC B. : Electricna vuca. NK Beograd, 1974.
- [38] STRAINESCU I. : Variatoare statice de tensiune continua. ET Bucuresti, 1983.
- [39] TUNSOIU GH., SERACIN E., SAAL C. : Actionari electrice. EDP Bucuresti, 1982.
- [40] VAZDAUTEANU V. : Tractiune electrica. IP Timisoara, 1984.
- [41] ABRAHAM L. : Power electronics in German railway propulsion. Proceedings of the IEEE, 76(1988), 4, pg.472-480.
- [42] APPELBAUM J., FUCHS E. F., WHITE J. C. : Optimization of Three Phase Induction Motor Design, Part 1. Formulation of the Optimization Technique. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, No.3, 1987, pg.407-414.
- [43] APPELBAUM J., KHAN I., FUCHS E. F. : Optimization of Three Phase Induction Motor Design. Part 2. The efficiency and Cost of an Optimal Design. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. EC-2, No.3, 1987, pg.415-422.
- [44] BAEGGLI H.H., s.a. : DC chopper control with automatic field weakening and combined recuperation/resistor brake for DC urban transit vehicles. IEEE Industry Applications Society Conference Record Toronto, 1978, pg.729-742.
- [45] BACHLER U., MULLER B. : Equipements de vehicules pour le trafic urbain et metropolitain fort demandes sur le marche d'exportation. Revue Brown Boveri. 12 (1984), pg.587-600.
- [46] BECK H. P. : GTO-Pulswechselrichter mit Wirkstromregelung für Schienenfahrzeuge mit Gleichspannungsspeisung. Elektrische Bahnen, 86 (1988), pg.81-93.
- [47] BEZOLD K. -H., s.a., : Anwendung von GTO - Thyristoren auf elektrischen Triebfahrzeugen. Elektrische Bahnen, 84(1986), 11, pg.333-342.

Teza de doctorat

- [48] BRECHBUHLER M., SKRABO B. : Der Stromrichter als modernes Leistungsstellglied. Brown Boveri Mitt., 12(1982), pg.441-452.
- [49] CIESSOW G., s.a., : Three Phase AC Drive Systems for Traction Vehicles. AEG Telefunken Progress, Vol. 3, 1977, pg.88-96.
- [50] COSSIE A., RAGUIDEAU J.L., TISSERAND C. : La chaîne de traction par moteurs synchrones autopilotés. Revue generale des chemins de fer, 12(86), pg. 731-739.
- [51] DREIMANN K. : Vergleich der Umrichtersysteme für Triebfahrzeuge mit Drehstrom-Fahrmotoren. Eisenbahntechnische Rundschau, 27(1978), pg.799-804.
- [52] DERY G., WETHERELL M. P. : AC cars revitalise Boston's Red Line. Railway Gazette International, october 1993, pg.705.
- [53] GATHMANN H., HARPRECHT W. und WEIGEL W. D. : Recent Developments in AC Drives for Traction. EPE Proceedings Grenoble, 1987, pg. 5-19.
- [54] GOUTHIÈRE J., HOLOGNE H. : Les hacheurs à thyristors en traction électrique. Revue ACEC, 1-2 (1976), pg.3-22.
- [55] ISAEW I. P., KURBASSOW A. S. : Die Entwicklung des Antriebes von elektrischen Triebfahrzeugen. Elektrische Bahnen, 84 (1986), pg. 85-92.
- [56] KARVINEN J. : Three Phase AC traction drives. Design and service experience. IEE Proceedings, 134 (1987), Pt. B, 3, pg. 135-140.
- [57] KAWAHIRA K. s.a., : AC motor drive system for electric vehicles. Toshiba Review, 159 (1987), pg.14-19.
- [58] KRISHNAN R., DORAN F. C. : Study of parameter sensitivity in high-performance inverter-fed induction motor drive systems. IEEE Transactions on Industry Applications, 23 (1987, 4) , pg.623-635 .
- [59] MACHEFERE Y., GACHE A. : La traction électrique par moteurs sans collecteurs. Revue generale des chemins de fer, 10 (85), pg. 511-528.
- [60] MEISSEN W., SAUER H. : Drehstromantrieb für Schienenfahrzeuge am Gleich und Wechselstrom Fahrdrabt. Eisenbahntechnische Rundschau, Vol. 26, No. 7/8, 1977, pg.445-452.
- [61] MOUNEIMNE Z. S., MELLITT B. : Modelling of inverter-controlled asynchronous drives for system simulation in DC railways. IEE Proceedings, 135 (1988), Pt. B, 5, pg.210-215.
- [62] MÜLLER G. : Renaissance du tramway. Revue generale des chemins de fer, 6 (93), pg. 9-18.
- [63] MULLER G. : Le tramway de Strasbourg. Revue generale des chemins de fer, 1 (94), pg.47-53.
- [64] NURDIN M., POLOUJADOFF M., FAURE A. : Synthesis of Squirrel Cage Motors: A Key to Optimization. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.6, No. 2, 1991, pg.327-335.
- [65] PETIT G., PALAIS G. : La transmission asynchrone des automotrices à deux niveaux Z20500. Revue generale des chemins de fer, 12 (87), pg. 9-20.
- [66] RANSON B. : Le tramway français standard. Revue generale des chemins de fer, 61 (82), pg. 347-352.

- [67] RUDIGER W., BRUNNECKER U. : Siemens Tests AC Motors on a Tram Car. Railway Gazette International, No.6, 1976, pg.228-229.
- [68] SCHAEER R., SCHMID A. und SEGER TH. : Strassenbahn - Gelenktriebwagen Typ "Tram 2000" der Verkehrsbetriebe der Stadt Zurich mit Drehstromantrieb. Brown Boveri Mitt. 12(1983), pg. 531-537.
- [69] UEDA A. s.a., : GTO inverter for AC traction drives. IEEE Transactions on Industry Applications, 19(1983), 3, pg.343-347.
- [70] WAIDMANN W. : Drehstromantrieb fur Gleichstrombahnen. Siemens Zeitschrift. 50 (1976), 7, pg.493-497.
- [71] WHITING J. M. W. : The GTO thyristor in DC traction. CEC Review, 2 (1986), 3, pg.158-162.
- [72] ZWAHLEN R., BRECHBUHLER M. : Traktionsleitsystem. Brown Boveri Mitt. 12(1982), pg.460-469.
- [73] *** : Drive Equipment with Three Phase Traction Motors for the Berlin Subway, Brochure N3/575E 05 77, AEG Telefunken, West Berlin.
- [74] *** : AC induction motor drives in locomotives. Brochure WW 6 GB 84-01, Stromberg Corporation, Helsinki.
- [75] *** : Traction drives for electric vehicles. Brochure WW 2 GB 84 - 06, Stromberg Corporation, Helsinki.
- [76] *** : Traction Inverter Controlled Induction Motor Drive System. Brochure 82-2(R)8219, Toshiba Corporation, Tokyo.

LISTA ACRONIMELOR UTILIZATE

- CR - cale de rulare
- CSF - convertor static de frecventa
- IC - invertor de curent
- IT - invertor de tensiune
- MIA - modularea impulsurilor in amplitudine
- MIAD - motor de inductie pentru actionare directa
- MID - modularea impulsurilor in durata
- RD - redresor (de putere) cu diode
- RT - redresor (de putere) cu tiristoare
- PWM - pulse width modulation
- RPF - reostat de pornire si franare
- STE - sistem de tractiune electrica
- VEM - vehicul electric motor
- VTC - variator static de tensiune continua